ZAHTEVI, TEHNOLOGIJE, APLIKACIJE, IZAZOVI I PRAVCI ISTRAŽIVANJA 6G BEŽIČNIH KOMUNIKACIONIH SISTEMA

By Majid H. Abdullah

WORD COUNT 61435
TIME SUBMITTED 18-NOV-2025 08:21AM
PAPER ID 119073241

UNIVERZITET SINGIDUNUM

BEOGRAD

DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE

DOKTORSKA DISERTACIJA

ZAHTEVI, TEHNOLOGIJE, APLIKACIJE, IZAZOVI I PRAVCI ISTRAŽIVANJA 6G BEŽIČNIH KOMUNIKACIONIH SISTEMA

MENTOR:

Prof. dr Marina Marjanović

KANDIDAT:

Majid H. Abdullah

Broj indeksa: 466038/2018

Beograd, 2025. godine

REZIME

Šesta generacija mobilnih mreža (6G) predstavlja tehnološki pravac koji će oblikovati digitalna društva budućnosti. Očekuje se da 6G donese novu eru u kojoj će milijarde povezanih uređaja, vozila, robota i dronova generisati ogromne količine podataka na nivou zetabajta i otvoriti moderne aplikacije koje prevazilaze mogućnosti 5G sistema. Među njima posebno se izdvajaju holografska teleprisustva, masivne XR/VR aplikacije, kao i interakcija u ljudsko-digitalno-fizičkom svetu.

Za razliku od prethodnih generacija, 6G neće biti samo evolucija u pogledu brzine i kapaciteta, već samostalan ekosistem zasnovan na veštačkoj inteligenciji (AI). Princip „AI svuda“ podrazumeva široku primenu veštačke inteligencije u mrežama – od optimizacije performansi i upravljanja saobraćajem do automatizovanog donošenja odluka i pružanja AI usluga korisnicima. Na taj način 6G postaje ključni oslonac za održivi društveni napredak, usklađen sa ciljevima održivog razvoja Ujedinjenih nacija, pri čemu se naglašava važnost privatnosti, bezbednosti, transparentnosti I inkluzivnosti.

Ključne karakteristike 6G mreža uključuju inteligentno i programabilno upravljanje, integrisano otkrivanje i komunikaciju, smanjenje energetskog otiska, fleksibilnost arhitekture, pouzdanost, skalabilnost i dostupnost širom sveta. Očekuje se da 6G mreže obezbede ultra-visoke brzine prenosa podataka (100–1000 Gb/s), gotovo trenutno kašnjenje, potpunu pokrivenost i povezivanje između zemaljskih i vanzemaljskih mreža, što će omogućiti široku primenu u oblastima kao što su zdravstvo, pametne fabrike, transport, javna bezbednost i mediji.

Na tehnološkom nivou, razvoj 6G oslanja se na napredak u fotonici, kvantnim tehnologijama, mikroelektronici, hibridnim RF/FSO komunikacionim sistemima i modernism sigurnosnim paradigmama („bezbednost po dizajnu“). Istraživanja obuhvataju nove modele bežičnih kanala, metode za smanjenje smetnji i fading efekata, razvoj naprednih primopredajnika i integraciju AI/ML tehnika u optimizaciju mrežnih procesa. Takođe, značajno mesto zauzimaju istraživanja u oblasti dubokog učenja, naročito u prepoznavanju i obradi vizuelnih podataka, što pokazuje širi doprinos 6G ekosistema u domenu analitike i inteligentne obrade informacija.

Pored tehničkih aspekata, naglašava se i potreba za evropskim tehnološkim suverenitetom, razvojem globalnih standarda i jačanjem regulatornog okvira koji obuhvata pitanja neutralnosti mreže, zaštite podataka, intelektualne svojine i etičke regulative.

Sve u svemu, 6G predstavlja temelj inteligentnog društva znanja 2030. Godine, gde će komunikacija, računarstvo, senzori, sigurnost i veštačka inteligencija biti objedinjeni u jedinstven i fleksibilan sistem. Njegova primena donosi transformaciju poslovnih procesa, nove modele rada i interakcije, kao i potpuno nove oblike digitalnih usluga, čineći ga ključnim pokretačem naredne industrijske i društvene revolucije.

Ključne reči:

6G, AI, IoT, mobilne mreže, α-*k*-μ model fedinga, smetnje na kokanalnom nivou CCI, odnos signal/interferencija SIR, verovatnoća otkaza, srednja verovatnoća greške po bitu, FSO, RF/FSO, modulacija.

ABSTRACT

The sixth generation of mobile networks (6G) represents a technological direction that will shape the digital societies of the future. 6G is expected to usher in a new era in which billions of connected devices, vehicles, robots, and drones will generate enormous amounts of data—at the zettabyte scale—and create opportunities for applications that surpass the capabilities of 5G systems. Among these, holographic telepresence, massive XR/VR applications, and interactions within the human-digital-physical world stand out as particularly significant.

Unlike previous generations, 6G will not merely be an evolutionary step in terms of speed and capacity but rather a standalone ecosystem powered by artificial intelligence (AI). The principle of "AI everywhere" implies the pervasive use of AI throughout networks—optimizing performance and traffic management, enabling automated decision-making, and offering AI as a service to users. In this way, 6G becomes a cornerstone for sustainable social progress, aligned with the United Nations Sustainable Development Goals, while emphasizing the importance of privacy, security, transparency, and inclusiveness.

Key features of 6G networks include intelligent and programmable management, integrated sensing and communication, reduced energy footprint, architectural flexibility, reliability, scalability, and global availability. 6G networks are expected to deliver ultra-high data transfer rates (100–1000 Gb/s), near-instant latency, complete coverage, and connectivity between terrestrial and non-terrestrial networks, enabling wide adoption in areas such as healthcare, smart factories, transportation, public safety, and media.

On the technological level, 6G development relies on advances in photonics, quantum technologies, microelectronics, hybrid RF/FSO communication systems, and modern security paradigms ("security by design"). Research efforts encompass new wireless channel models, methods to reduce interference and fading effects, advanced transceiver designs, and the integration of AI/ML techniques into network optimization. A significant role is also played by research in deep learning, particularly in image recognition and text segmentation, demonstrating the broader contribution of the 6G ecosystem in the field of analytics and intelligent data processing.

In addition to technical aspects, there is a strong emphasis on European technological sovereignty, the development of global standards, and strengthening regulatory frameworks

that cover issues such as network neutrality, data protection, intellectual property rights, and ethical regulation.

In summary, 6G represents the foundation of the intelligent knowledge society of 2030, where communication, computing, sensing, security, and artificial intelligence will converge into a unified and flexible system. Its implementation will transform business processes, introduce new models of work and interaction, and create entirely new forms of digital services, making it a key driver of the next industrial and social revolution.

Keywords:

6G, AI, IoT, mobile networks, α-k-μ fading model, co-channel interference CCI, signal-to-interference ratio SIR, outage probability, average bit error probability, FSO, RF/FSO, modulation.

SPISAK SLIKA

Slika 2.1.1: Različiti tipovi IoT mreža u smislu dometa (nezemaljske, mobilne, široke i kratkog dometa), njihov približni opseg pokrivenosti i glavni reprezentativni protokoli.

Slika 2.1.2: Različiti IoT segmenti i njihove karakteristike.

Slika 2.9.1. Poređenje ključnih zahteva za performanse između 5G i 6G.

Slika 2.13.1. Klasifikacija IOT napada.

Slika 2.19.1. Bezbedna i inteligentna arhitektura 6G.

Slika 4.13.1. Ključne osnovne aplikacije na Internetu pametnih stvari (IoST).

Slika 5.3.1. PDF nove kompozitne distribucije za različite vrednosti odgovarajućih parametara.

Slika 5.3.2. CDF funkcija kompozitnog procesa za različite vrednosti odgovarajućih parametara.

Slika 6.4.1. ABER za hibridni One-Hop RF/FSO sistem u uslovima jake turbulencije za različite vrednosti K-faktora kada se primenjuje CBPSK tehnika modulacije.

Slika 6.4.2. ABER za FSO sistem u uslovima jake turbulencije za različite vrednosti K-faktora kada se primenjuje CBPSK tehnika modulacije.

Slika 6.4.3. ABER za hibridni One-Hop RF/FSO sistem u uslovima slabe, umerene i jake turbulencije za vrednosti K=2, K=2 i m=2 pri primeni CBPSK tehnike modulacije.

Slika 6.4.4. ABER za FSO sistem u uslovima slabe, umerene i jake turbulencije za K=2 pri primeni CBPSK tehnike modulacije.

Slika 6.4.5. ABER za hibridne One-Hop RF/FSO i FSO sisteme kao funkcija greške pokazivanja.

Slika 6.4.6. ABER za hibridni RF/FSO sistem sa jednim skokom u uslovima slabe turbulencije za različite vrednosti statistike fedinga pri korišćenju CBPSK tehnike modulacije.

Slika 7.3.1. Modifikovana hibridna metoda za segmentaciju teksta.

SPISAK TABELA

Tabela 2.2.1. Globalni trendovi bežičnog povezivanja.

Tabela 2.3.1. Poređenje 6G sa 4G i 5G komunikacionim sistemima**.**

Tabela 2.4.1. Globalni trendovi bežičnog povezivanja.

Tabela 2.20.1. mm Talasi, THz i optički podopsezi za moguće bežične komunikacije u 6G.

Tabela 5.1. $\alpha - k - \mu$ raspodela i druge feding raspodele.

Tabela 6.3.1. Vrednosti parametara x i y u zavisnosti od tehnike modulacije.

Tabela 6.4.1. Vrednosti parametara korišćene za numeričke proračune

SKRAĆENICE

AI - Artificial Intelligence

ML - Machine Learning

UAV - Unmanned Aerial Vehicle

MIMO - Multiple-Input Multiple-Output

QoS - Quality of Service

GoS - Grade of Service

CCI - Co-channel Interference

FSO - Free Space Optics

KPI - Key Performance Indicator

IoT - Internet of Things

MMWAVE - Millimeter Wave

BS – Base Station

SC - Selection Combining

SSC - Switch And Stay Combining

SNR - Signal-to-Noise Ratio

OP - Outage Probability

PDF - Probability Density Function

CDF - Cumulative Density Function

LoS - Line of Sight

ABER - Average Bit Error Probability

ASEP - Average Symbol Error Probability

CPSK - Coherent Phase Shift Keying

AoF - Amount of fading

BPSK - Binary Phase Shift Keying

DE-QPSK - Differentially Encoded-Quadrature Phase Shift Keying

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. Konvergencija digitalnih, fizičkih i ličnih domena 6

2.1. Revolucija 6G podataka i potreba za programiranjem 7

2.2. Trendovi mobilne komunikacije 12

2.3. Specifikacije i zahtevi 13

2.4. Trendovi mobilne komunikacije 15

2.5. Integrisano otkrivanje i komunikacija 17

2.6. Obezbeđivanje održivosti 17

2.7. Zavisnost društva od 6G mreže 18

2.8. Pristupačnost, skalabilnost 18

2.9. Proširivanje KPI-ja 19

2.10. Arhitektura i kontrola mreže 6G sistema 22

2.11. Edge i sveprisutno računarstvo 24

2.12. Radio tehnologija i obrada signala 25

2.13. Sigurnost optičke mreže i usluga 36

2.14. Komunikacija vanzemaljskih mreža 40

2.15. Mreže/podmreže posebne namene 41

2.16. Nove karakteristike mreže 42

2.17. Nekoliko opštih zahteva u mrežnim karakteristikama 43

2.18. Mogućnosti za uređaje i komponente 44

2.19. Perspektive i primene 45

2.20. Fundamentalne tehnologije omogućavanja 6G 50

2.21. Analiza 6G arhitekture 58

2.22. Glavni principi budućeg sistema mobilnih komunikacija 58

2.23. Regulacija 65

3. Propagacija u industrijskim sredinama 66

3.1. Obrada u realnom vremenu i dizajn RF primopredajnika 68

3.2. Izazovi i mogućnosti RF primopredajnika 71

3.3. Povećanje energetske efikasnosti za zelene komunikacije 73
3.4. Sakupljanje energije 74
3.5. Ključne tačke prikupljanja energije 74
3.6. Backsactter komunikacija 75
4. Povećanje povezivanja i puna pokrivenost 77
4.1. Integracija zemaljskih i vanzemaljskih komunikacionih mreža 77
4.2. Komunikacije bespilotnih letelica (UAV) 78
4.3. Stanica platforme na velikoj nadmorskoj visini (HAPS) 81
4.4. Satelitska komunikacija 82
4.5. Masivni MIMO Sistem bez ćelija 83
4.6. Održavanje bezbednosti, tajnosti i privatnosti 85
4.7. Usmerena modulacija 86
4.8. Tehnologija Blockchain-a 87
4.9. Ostvarivanje ultra-pouzdanih komunikacija sa niskim kašnjenjem 88
4.10. Holografska teleportacija 89
4.11. Taktilni Internet 90
4.12. Multi-senzorne aplikacije proširene realnosti (KSR) 91
4.13. Aplikacije-Internet pametne stvari 91
4.14. EDGE računarstvo 98
4.15. Ostvarivanje inteligencije 100
4.16. Veštačka inteligencija i mašinsko učenje 101
5. Procena performansi bežičnog komunikacionog sistema u prisustvu fedinga pod uticajem interferencije i senke 104
5.1. Prenos pod uticajem kokanalne interferencije 105
5.2. Prenos pod uticajem senke 106
5.3. Numerički rezultati 107
6. Analiza performansi hibridne RF/FSO veze preko Nakagami-m fedinga i hi-kvadrat-inverzne gama atmosferske turbulencije sa greškama usmeravanja 109
6.1. Model sistema i kanala 110
6.2. Statističke karakteristike hibridnog RF/FSO sistema sa jednim skokom 112
6.3. ABER hibridnog RF/FSO sistema sa jednim skokom 112
6.4. Rezultati i diskusija 113

7. Modeli dubokog učenja za primenu prepoznavanja slika u 6G mrežnom okruženju 117
7.1. Korišćenje veštačke inteligencije za segmentaciju teksta iz slika 118
7.2. Materijali i metode Prikupljanje podataka 118
7.3. Segmentacija teksta 120
7.4. Rezultati segmentacije teksta 121
7.5. Poređenje sa najsavremenijim metodama 122
7.6. Analiza performansi algoritma 122
8. Zaključak 124
9. Literatura 127

1. Uvod

Tokom naredne decenije, 6G će uvesti novu eru u kojoj će milijarde povezanih uređaja, ljudi, vozila, robota i dronova proizvoditi nezamislive količine digitalnih podataka na nivou zetabajta. Ova tehnologija biće osnova za aplikacije koje zahtevaju ogromne resurse, poput holografskog prisustva na daljinu i potpuno imerzivne komunikacije. Upravo zbog toga, 2030-e će se verovatno pamtiti kao doba široke upotrebe lične mobilne robotike.

Za razliku od prethodnih generacija, 6G neće predstavljati samo povećanje brzine i kapaciteta, već će funkcionisati kao samostalni ekosistem veštačke inteligencije. On će se razvijati od pristupa usmerenog na čoveka ka sistemu u kojem će ljudi i mašine biti podjednako zastupljeni. 6G će omogućiti skoro trenutnu i neograničenu bežičnu povezanost. Ovaj razvoj će oblikovati nove poslovne pejzaže kroz spajanje tehnologija povezivanja, robotike, računarstva u oblaku i bezbedne digitalne trgovine, radikalno menjajući način na koji preduzeća rade.

Suštinski, 6G će biti jedan od temelja društava budućnosti. Da bi se obezbedio održivi društveni napredak, usklađen sa ciljevima UN, neophodno je da 6G istovremeno odgovori na urgentne društvene potrebe i omogući nove funkcionalnosti. Revolucija 6G tehnologije mora biti u skladu sa osnovnim vrednostima, kao što su privatnost, sigurnost, transparentnost i inkluzivnost. Istovremeno, digitalne tehnologije postaju ključni instrument državnog suvereniteta, a razvoj evropske 6G infrastrukture jedan je od ključnih faktora za obezbeđivanje suvereniteta u tehnologijama i sistemima.

Konvergencija 6G i operativnih tehnologija otvara mogućnost da se industrijski procesi, oprema i resursi razdvoje od fizičke lokacije ljudskih operatera. To bi moglo dovesti do ozbiljnih promena u načinu života, preusmeravajući ravnotežu između urbanih i ruralnih sredina, pa čak i menjajući ulogu gradova suprotno dosadašnjem trendu urbanizacije. Pandemija COVID-19 već je pokazala važnost IKT infrastrukture u oblastima rada na daljinu, digitalnog zdravstva i e-trgovine. U tom kontekstu, uključivanje krajnjih korisnika biće sve važnije za nesmetano prihvatanje novih tehnologija kao što je 6G. Kako bi se osiguralo da 6G može biti inkluzivan za sve ljude širom sveta, mora da bude pristupačan i skalabilan, sa odličnom pokrivenošću svuda.

Ključne osobine 6G uključuju inteligentno i programabilno upravljanje, integrisanu komunikaciju i detekciju, energetsku efikasnost, pouzdanost, skalabilnost i globalnu dostupnost.

Arhitektura 6G mreža mora biti dovoljno fleksibilna i efikasna da omogući jednostavnu integraciju različitih sistema – mreža mreža, kombinovane komunikacije i senzinga, kao i povezivanje zemaljskih i svemirskih tehnologija. Ona će uključivati napredne AI pokretače, kao i lokalne i distribuirane računarske resurse. Koncept „AI svuda“ podrazumeva primenu veštačke inteligencije u svim segmentima mreže, gde god to može doprineti unapređenju performansi. Na taj način, AI se ne koristi samo za optimizaciju rada već i za automatizuju nekih nivoa procesa i donošenja odluka.

Razvoj 6G oslanjaće se na više osnovnih tehnologija. Na radio polju biće potrebno proširiti kapacitete mreža do granica Šenonovog i Murovog zakona, a možda i iznad njih. Optička

transportna povezanost omogućiće mrežama da budu stalno dostupne, pouzdane i energetski efikasne, uz mogućnost fleksibilnog skaliranja. Fotonska integracija otvoriće vrata novim uređajima i IT rešenjima koji kombinuju optičke, radiofrekventne i digitalno-elektronske funkcije. Nove elektronske komponente biće neophodne – procesori, memorije, RF sistemi, analogno-digitalni konvertori, antene i optički elementi. Pored toga, istraživanje kvantne mehanike pružiće nova rešenja u oblasti kvantnog senzinga, komunikacije, bezbednosti i računarskih performansi.

Cilj razvoja 6G je postizanje liderstva u strateškim oblastima i obezbeđivanje alternativnih pristupa kada globalni lanci snabdevanja nisu dostupni. Javne i privatne investicije u istraživanju i inovacijama biće usmerene na ključne tehnologije: programabilnost, integrisanu komunikaciju i otkrivanje, pouzdanu i skalabilnu infrastrukturu, AI/ML, mikroelektroniku, fotoniku, softver i baterije za mobilne uređaje.

Konačni cilj razvoja 6G jeste postizanje potpune interoperabilnosti između svih aktera na svim nivoima, što znači uspostavljanje globalnih standarda. To bi omogućilo da 6G sistemi budu istovremeno dostupni, skalabilni i primenljivi širom sveta. Međutim, efikasna standardizacija zahteva jasan regulatorni okvir i usklađeno upravljanje, uključujući zajedničke procese sertifikacije. To je posebno važno zbog očekivanog rasta broja dobavljača u evropskom ekosistemu.

Uvođenje miliona specijalizovanih i lokalizovanih 6G podmreža otvoriće pitanja primene pravila mrežne neutralnosti i regulativa o zaštiti podataka (ePD i GDPR). To može proširiti postojeće okvire i zahtevati nove dimenzije regulisanja. Evropski akteri bi trebalo da budu podržani, dok će pitanja suvereniteta i bezbednosti dobiti još veću težinu. Pored toga, visoko automatizovane mreže zasnovane na veštačkoj inteligenciji zahtevaće nove regulatorne modele, zasnovane na etici i u skladu sa evropskim standardima.

Da bi bila konkurentna na svetskom tržištu, Evropa mora razviti vrhunske kompetencije u oblastima kao što su komunikacioni protokoli, softver, virtuelizacija, računarstvo u oblaku, sajber bezbednost, mikroelektronika i fotonika. Pored tehničkog znanja, potrebno je jačati i multidisciplinarne kompetencije koje uključuju prirodne i društvene nauke, umetnost i inženjering, jer će upravo raznovrsnost ideja i pristupa doprineti inovacijama. Poseban akcenat stavlja se na povećanje učešća ženskih tehničkih stručnjaka.

Pandemija COVID-19 jasno je pokazala koliki značaj imaju komunikacione platforme za održavanje društvenih i ekonomskih procesa. Uvođenje 6G dodatno će ojačati otpornost i konkurentnost evropske industrije, omogućavajući digitalizaciju i automatizaciju u oblastima kao što su povezani automobili, zdravstvo, proizvodnja medija, javna bezbednost i pametne fabrike. Dugoročno, kako 5G bude dostizao svoje limite, 6G će odgovoriti na sve strože performansne zahteve, naročito u domenu holografskih komunikacija.

Ogromne količine podataka koje će 6G obrađivati, naročito u kritičnim aplikacijama, zahtevaće ultravisoke nivoe sigurnosti, poverljivosti i zaštite privatnosti. Upravo zbog toga, povezana inteligencija biće jedno od ključnih obeležja 6G sistema – kako za povećanje efikasnosti mreže, tako i za podršku različitim vertikalnim primenama.

Pored tehničkih mogućnosti, razvoj 6G mora da uzme u obzir i ključne društvene i političke izazove. Nova generacija mreža treba da bude održiva, ali i da omogući održivost u drugim sektorima, poput industrije i javnih servisa. Pristupačnost je jedan od osnovnih ciljeva – posebno imajući u vidu da preko 3 milijarde ljudi u svetu i dalje nema pristup internetu.

Istovremeno, javnost sve više izražava zabrinutost u vezi sa izloženosti elektromagnetnim poljima (EMF). Stoga će biti neophodno da 6G zadovolji sve standarde vezane za zdravlje i bezbednost korisnika. Fokus na ciljeve održivog razvoja biće od ključne važnosti, kako bi se 6G razvijao u skladu sa globalnim prioritetima održivosti.

Od 6G se očekuje da omogući znatno veću efikasnost od 5G mreža, nudeći podršku za nove servise i aplikacije. To će ga učiniti pokretačem nastanka tzv. inteligentnog društva znanja do 2030. godine. Vizija uključuje širok spektar servisa – od aplikacija niskog kapaciteta i dugog kašnjenja, do ultrabrzih prenosa podataka od 100 pa čak do 1000 Gb/s, dostupnih na posebnim lokacijama.

6G će doneti sveobuhvatnu bežičnu povezanost, integrisati komunikaciju, senzing, računarstvo, keširanje, nadgledanje, pozicioniranje, navigaciju i radar. Na taj način, biće moguće razviti kompletne vertikalne aplikacije prilagođene različitim industrijama i društvenim potrebama.

Očekuje se da 6G funkcioniše kao samostalni ekosistem sa fleksibilnim mehanizmima upravljanja i automatizovanim donošenjem odluka, gotovo na nivou ljudske inteligencije. Biće zasnovan na postojećim arhitekturama, ali sa dodatkom vertikalno orijentisanih mrežnih isečaka, što omogućava holističku platformu za učenje i pružanje usluga različitih tipova i nivoa povezanosti.

U drugom poglavlju razmatrano je pozicioniranje svih aktera u procesu oblikovanja društvenog i poslovnog potencijala 6G ere. Poseban naglasak stavlja se na konvergenciju digitalnog, fizičkog i ličnog domena, identifikaciju trendova u mobilnim komunikacijama, kao i definisanje specifikacija i zahteva za buduće mreže. Regulatorna tela već ističu važnu ulogu Evropske unije u kreiranju 6G standarda i oblikovanju digitalnog sveta.

U trećem i četvrtom poglavlju biće opisani ključni ciljevi 6G koji su jasno definisani i obuhvataju unapređenje performansi u odnosu na 5G, ali i rešavanje izazova poput propagacije signala u industrijskim okruženjima, obrade podataka u realnom vremenu i dizajna RF primopredajnika. Istovremeno, razmatra se proširenje frekvencijskog spektra i povećanje propusnog opsega.

Tehnološki napredak koji se očekuje oslanja se na nekoliko kritičnih faktora – među njima su bežično sakupljanje energije pomoću radiofrekventnih signala, arhitektura bez dodira za upravljanje 6G mrežama, agnostičko povezivanje kroz optičke, bežične i svemirske mreže, kao i napredni dizajn čipova.

U pogledu arhitekture, 6G će omogućiti potpunu pokrivenost kroz integraciju zemaljskih i vanzemaljskih komunikacija, uključujući satelite, HAPS platforme (balone i vazdušne brodove), kao i bespilotne letelice (UAV). Masivni MIMO sistemi bez ćelija smatraju se ključnom

tehnologijom za povećanje povezanosti i obezbeđivanje sveobuhvatne pokrivenosti. Istovremeno, moraće da se osigura zaštita privatnosti, bezbednosti i tajnosti komunikacija.

Efikasna implementacija 6G zavisi od pravovremene i koordinisane standardizacije. Organizacije kao što su 3GPP, ETSI, IETF i IEEE imaće značajnu ulogu, ali u mnogo strožem režimu nego kod prethodnih generacija. Standardizacija će zahtevati ne samo tehnički rad, već i odgovarajuće zakonske okvire na globalnom nivou.

Režim intelektualne svojine za 6G biće potrebno redefinisati, uzimajući u obzir globalne geopolitičke trendove i sve veći značaj domaćih strategija. U Evropi se već razvijaju regulatorni „sandbox" koncepti, koji omogućavaju eksperimentalni pristup inovacijama i njihovo testiranje pre masovnog usvajanja. Kako 6G postaje sveprisutna tehnologija, izazovi regulacije postaće još složeniji, pa se predviđa budućnost u kojoj će u samim mrežama postojati AI agenti regulatora.

ITU-T je još 2020. godine objavio vizionarske dokumente o mrežama budućnosti, dok je u EU više asocijacija (poput NetworldEurope) započelo aktivnosti kroz strateške agende istraživanja i inovacija. Projekti poput Hexa-X, finansirani od strane EU, već se bave ključnim izazovima 6G razvoja. Pored toga, brojne velike privatne kompanije iz IKT sektora razvijaju interne programe fokusirane na ovu tehnologiju.

Na globalnom nivou, i druge zemlje razvijaju sopstvene vizije. U SAD je 2020. osnovan Next G Alliance sa ciljem jačanja liderske pozicije Severne Amerike u mobilnim tehnologijama. Kina je još 2019. formirala IMT-2030(6G) grupu za promociju istraživanja i međunarodnu saradnju, dok je Japan uveo plan od 70 milijardi jena za podsticanje istraživanja i izgradnju laboratorija za razvoj 6G tehnologija. Južna Koreja već planira pilot projekat 6G mreže do 2027. godine.

Do sada je digitalizacija najviše uticala na poslove koji su se obavljali za računarom, kao što su administrativne ili analitičke aktivnosti. Međutim, konvergencija informacionih i operativnih tehnologija koju omogućava 6G, proširiće digitalizaciju i na druge sektore, menjajući prirodu rada i svakodnevnog života.

Koncept radnika „bez stola" postaće široko rasprostranjen zahvaljujući daljinskoj povezanosti i interakciji. Takvi radnici će koristiti digitalne alate i uređaje koji im omogućavaju da zadatke obavljaju asinhrono – odnosno da sami odlučuju gde i kada će posao biti izvršen. Ovo će doneti veću fleksibilnost, ali i promeniti dinamiku brojnih industrija.

Radnici će prestati da budu samo pasivni korisnici aplikacija. Zahvaljujući adaptivnim sistemima i modularnim, interoperabilnim softverskim platformama, moći će da prilagođavaju i unapređuju sisteme na kojima rade. Njihovo iskustvo i stručnost postaće deo procesa stalnog poboljšavanja digitalnih rešenja.

Na taj način, 6G neće samo transformisati komunikacione mreže, već i način na koji ljudi rade i sarađuju, pružajući osnovu za novu eru produktivnosti i digitalne fleksibilnosti.

U petom poglavlju biće ispitane performanse bežičnog komunikacionog sistema u prisustvu α-κ-μ fading kanala. Biće analiziran uticaj smetnji na kokanalnom nivou (CCI). Konkretno, biće analiziran uticaj smetnji na kokanalnom nivou (CCI). Razvijaće se matematički izrazi za verovatnoću i kumulativnu distribuciju primljenog odnosa signal-interferencija (SIR).

Verovatnoća otkaza (OP) će se izračunati za različite sistemske parametre i za slučaj kada je na prijemniku prisutna raznolikost izbora (SC). Pored toga, uočiće se efekti istovremenog višeputajnog fedinga i senke uvođenjem nove kompozitne distribucije α-κ-μ/Gamma fadinga. Statistički parametri za ovu novu distribuciju biće izračunati i korišćeni za procenu standardnih mera performansi. Ovi rezultati će biti predstavljeni i diskutovani u vezi sa sistemskim parametrima.

U šestom poglavlju predstavljen je novi statistički model za analizu performansi hibridnih RF/FSO (radio-frekvencija/optika slobodnog prostora) komunikacionih sistema. RF kanal je modelovan korišćenjem Nakagami-mm raspodele fedinga, dok je FSO kanal okarakterisan Hi-kvadrat-inverznom gama raspodelom kako bi se objasnile atmosferske turbulencije i greške usmeravanja. Izraz zatvorenog oblika za kumulativnu funkciju raspodele (CDF) hibridnog RF/FSO sistema sa jednim skokom izveden je pri šemi selektivnog kombinovanja, formulisanoj kao funkcija prosečnog odnosa signal-šum (SNR).

Rezultujuća CDF je izražena u smislu proširene generalizovane bivarijantne Majer-G funkcije (EGBMGF). Štaviše, dobijeni su novi analitički izrazi za prosečnu stopu grešaka bita (ABER) i za hibridni RF/FSO sistem i za njegov FSO-samo pandan pri koherentnoj binarnoj fazno-pomerajnoj modulaciji (CBPSK). Detaljna uporedna analiza je izvršena pri različitim parametrima kanala i uslovima turbulencije. Numerički rezultati, predstavljeni grafički, demonstriraju superiornu robusnost predložene hibridne šeme pod jakim efektima turbulencije i neusklađenosti.

U sedmom poglavlju razmatrana je upotreba metoda dubokog učenja u sistemu prepoznavanja slika koja se oslanja na tehnike dubokog učenja za automatizovanu klasifikaciju ili prepoznavanje objekata, područja ili karakteristika unutar slika. Predstavljen je pristup segmentaciji teksta iz slika zasnovan na dubokom učenju, koristeći kombinaciju potpuno konvolucione mreže (FCN) i rekurentne neuronske mreže (RNN). Algoritam postiže visoku tačnost u identifikovanju i odvajanju tekstualnih regiona od netekstualnih regiona, dobro se snalazeći sa različitim stilovima teksta, fontovima, pozadinama i različitim jezicima. Nadmašuje najsavremenije metode i dokazuje se kao robusno i svestrano rešenje primenljivo za zadatke optičkog prepoznavanja znanja (OCR) i analize dokumenata.

2. Konvergencija digitalnih, fizičkih i ličnih domena

Šesta generacija mobilnih mreža (6G) zamišljena je kao tehnologija koja će omogućiti prevazilaženje izazova sa kojima će se čovečanstvo suočavati 2030. godine i u periodu nakon toga. Kako mobilne komunikacije postaju sveprisutne i još značajnije u svakodnevnom životu, očekuje se da 6G mreže pruže mnogo više od samog brzog pristupa internetu – one će morati da ispune čitav niz novih ciljeva i funkcionalnosti.

1) Konvergencija fizičkog, ljudskog i digitalnog sveta u 6G će zahtevati podršku za digitalno povezivanje, spoznaju i povezanu inteligenciju.

2) Da bi se obezbedila fleksibilnost, programiranje bi trebalo da bude u srcu 6G.

3) 6G treba da podrži deterministične usluge od kraja do kraja.

4) 6G treba da obezbedi integrisano otkrivanje i komunikaciju, što će omogućiti visoku preciznost lokalizacije i usluge sensinga visoke rezolucije.

5) 6G će igrati ambicioznu ulogu u pogledu održivosti, kako bi smanjio svoj otisak na energiju, resurse i emisije i poboljšao održivost u drugim delovima društva i industrije.

6) 6G treba da postane zaista pouzdana infrastruktura koja će postati osnova društava budućnosti.

7) Da bi se osiguralo da 6G može biti inkluzivan za sve ljude širom sveta, mora da bude skalabilan i pristupačan.

8) 6G treba, tamo gde je potrebno, da značajno proširi KPI koje 5G sada može da postigne.

Sa 6G treba očekivati da se približimo potpuno povezanom svetu, gde je fizički svet predstavljen sa visokim detaljima u digitalnom domenu, gde se može analizirati i delovati na njega. Mreža bi obezbedila veze između domena putem uređaja koji su svuda ugrađeni, kao i infrastrukturu i inteligenciju digitalnog domena. Ljudi bi bili smešteni u sredinu ovog sajber-fizičkog kontinuuma. Tri klase interakcija će biti omogućene ovom konvergencijom domena:

1) Povezivanje sistema između domena. Senzori i aktuatori mogu čvrsto da sinhronizuju domene da bi postigli digitalne blizance gradova, fabrika, čak i naših tela. Ovo će omogućiti bogato rudarenje podataka i visoko efikasnu kontrolu, ali integritet i sigurnost podataka moraju biti osigurani.

2) Povezana inteligencija. Mreža će služiti kao ključna infrastruktura koja nudi veze visokog kapaciteta sa malim kašnjenjem od kraja do kraja i sigurne računarske funkcionalnosti dostupne širom mreže. Pouzdane AI funkcije mogu da rade u mreži i na mreži. Virtuelne reprezentacije osoba i fizičkih uređaja mogu međusobno da razmenjuju informacije u digitalnom domenu, što podrazumeva novi način identifikacije virtuelnih predstava.

3) Imerzivna komunikacija. Ljudi mogu proširiti svoja čula kroz digitalni domen. Vizuelne/prostorne, taktilne/haptičke i druge senzorne podatke visoke rezolucije treba razmenjivati sa velikom propusnošću i malim kašnjenjem kako bi se stvorilo impresivno iskustvo boravka negde drugde. Da bi se ovo postiglo, potrebne su veze visoke propusnosti sa determinističkom latencijom od kraja do kraja sa novim uređajima.

4) Spoznaja. Nije dovoljno predstaviti ljude kao fizičke objekte u digitalnom domenu. Takođe je važno biti svestan njihovih namera, želja i raspoloženja. Na primer, postojeći način da saznate šta ljudi žele je korišćenje glasa uz pomoć veštačke inteligencije alata za prepoznavanje. Spoznaja objedinjuje sve ove senzorske ulaze sa znanjem o preferencijama, ranijim izborima, i na primer, raspoloženju osobe.

2.1. Revolucija 6G podataka i potreba za programiranjem

Mreže pete generacije (5G) postavile su temelje za podršku velikom broju krajnjih uređaja i omogućile funkcionisanje više logičkih mreža kroz koncept sečenja mreže (network slicing). Kako svet sve više prelazi ka potpunoj digitalizaciji, predviđa se generisanje ogromnih količina podataka koje će zahtevati nove pristupe u obradi i upravljanju [1-3].

Trenutni evropski planovi za dizajn 6G mreža razmatraju adresiranje nekoliko tema kao što su:

a) efikasno međusobno povezivanje komunikacionih mreža sa IoT uređajima,

b) podršku distribuiranih i naprednih računarskih rešenja,

c) dizajn mrežnih protokola koji su adekvatniji za podršku u oblaku za rad mreže (npr. uz korišćenje arhitekture zasnovane na uslugama/u oblaku) i prikupljanje i upravljanje prikupljenim podacima.

Štaviše, neki nivo programabilnosti korisničke opreme takođe treba da se istraži otkrivanjem API-ja bežičnih uređaja, omogućavajući prilagođavanje vazdušnog interfejsa bez potrebe da se standardizuje previše detalja za svaki slučaj upotrebe i/ili da se ubrza vreme izlaska na tržište za nove funkcije.

Obrada podataka je prilično složen proces u kojem se očekuje da AI i ML igraju ključnu ulogu. Izvorna podrška AI/ML može da obezbedi inovativna rešenja ne samo za optimizaciju mrežnih funkcija već i za rad krajnjih uređaja i telekomunikacionih i vertikalnih usluga i aplikacija. Očekuje se da će ovakva rešenja uticati na dizajn u 6G mrežne arhitekture i mrežnih funkcija, jer prikupljanje i obrada ogromne količine podataka zahteva poboljšanja u pogledu kapaciteta mreže i propusnosti komunikacije. Štaviše, upravljanje podacima uskladištenim u visokim performansama i distribuiranim računarskim objektima postavlja nove zahteve u pogledu poverenja u tačnost i doslednost prikupljenih podataka. Konačno, bezbednost i privatnost će se morati dalje istražiti od samog početka rada na 6G, kako bi se mogli primeniti adekvatni i evoluirani mehanizmi od kraja do kraja [3].

Danas je IoT ogromna mreža stvari – od jednostavnih senzora do pametnih telefona, nosivih uređaja, autonomnih automobila i dronova – koje su međusobno povezane i koriste se za prikupljanje i analizu podataka. Iako se prognoze različitih analitičara i konsultantskih agencija za obim tržišta IoT-a dosta razlikuju, svi se slažu da je obim tržišta IoT-a ogroman i da raste značajnom stopom. Prema IoT analitici, do 2025. godine biće više od 30 milijardi aktivnih IoT uređaja — pametni telefoni nisu uključeni u ovu statistiku. Business Insider predviđa da će do

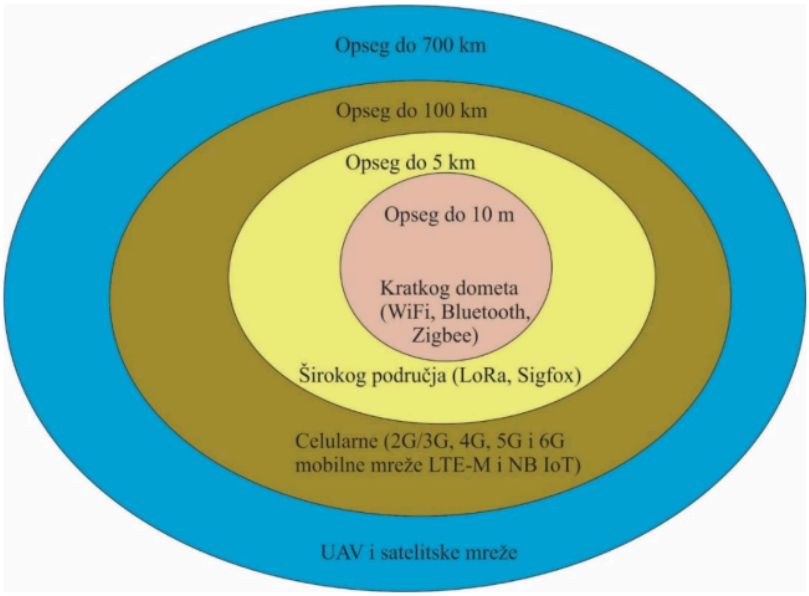
2025. godine biti više od 64 milijarde IoT uređaja. Očekuje se da će tržište interneta stvari dostići 1.854,76 milijardi američkih dolara u 2028. u poređenju sa 381,3 milijarde američkih dolara u 2021. sa kombinovanom godišnjom stopom rasta od 25,4%.

Internet stvari se odnosi na mreže, uređaje i podatke. Omogućava komunikaciju i interakciju između objekata i ugrađenih uređaja iz različitih okruženja radi prikupljanja podataka, obrade i korišćenja dobijenih informacija i znanja kako bismo svet oko nas učinili boljim putem pametnijeg i/ili automatizovanog donošenja odluka. Da bi napredovali ka ovom cilju, IoT uređaji, podaci i mreže su isprepleteni.

IoT uređaji i njihov povezani hardver su veoma raznovrsni i uključuju širok spektar: jeftine senzorske module (npr. senzore temperature, svetlosti, pritiska, vlažnosti, blizine) koji se koriste u pametnim kućama, industriji, poljoprivredi, logistici ili maloprodaji. Nosivi elektronski uređaji koji se nose na različitim delovima tela (npr. naočare, kacige, kragne, satovi, narukvice, čarape, cipele,…); moćniji uređaji kao što su aktuatori za automatizaciju, robotske ruke, bespilotne letelice, automobili bez vozača i tako dalje; kao i desktop računare, tablete i mobilne telefone koji su danas sastavni delovi IoT-a. Raznolikost uređaja i povezanih aplikacija rezultuje heterogenim podacima u različitim značenjima.

IoT uređaji generišu masivne tokove podataka koji su heterogeni, često opterećeni šumom i snažno povezani u prostorno-vremenskom smislu. Ovi podaci se najčešće opisuju kroz pravilo „6V“: obim (ogromna količina), brzina (visoka učestalost generisanja), raznovrsnost (različiti formati poput teksta, zvuka, videa i senzorskih informacija), varijabilnost (stalne promene u sadržaju), verodostojnost (pouzdanost i tačnost podataka) i vrednost (korisni uvidi i informacije koje se iz njih izvlače). Da bi se došlo do tih vrednih uvida, ovakvi podaci se obično šalju putem bežičnih mreža ka fuzionim centrima, gde se vrši njihova obrada i analiza.

Bežične pristupne mreže imaju ključnu ulogu u širokoj primeni IoT uređaja. U poslednjih nekoliko godina IoT tehnologije su detaljno proučavane i klasifikovane. Jedna od uobičajenih podela zasniva se na obimu pokrivenosti, pri čemu se IoT mreže svrstavaju u ćelijske, širokopojasne i kratkodometne IoT mreže. Nezemaljske mreže (NTN) predstavljaju novu kategoriju, nudeći izuzetno široku i trodimenzionalnu (3D) pokrivenost i mogu se posmatrati kao generalizacija ćelijskih i širokopojasnih mreža. Približan domet mreža koje pokriva jedna bazna stanica ili pristupna tačka, zajedno sa poznatim primerima, prikazan je na Slici 2.1.1. Ćelijske i širokopojasne IoT mreže beleže najbrži rast; prema Ericssonovom izveštaju o mobilnosti, predviđa se povećanje od 23% i 22% za ove tipove IoT-a u periodu od 2025. do 2027. godine, što će imati značajan uticaj na postojeće i buduće ćelijske mreže.



Slika 2.1.1. Različiti tipovi IoT mreža u smislu dometa (nezemaljske, mobilne, široke i kratkog dometa), njihov približni opseg pokrivenosti i glavni reprezentativni protokoli

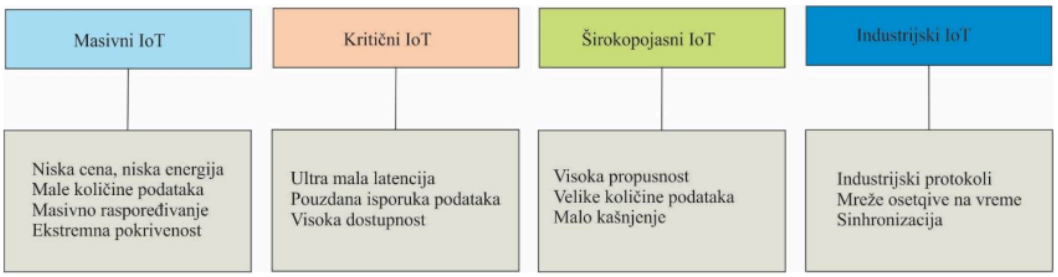
Što se tiče aplikacija (potrebna brzina prenosa podataka, kašnjenje, itd.), imamo dva veoma različita tipa IoT-a: masivni IoT i kritični IoT. Postoje i dva druga važna oblika IoT-a, naime, širokopojasni i industrijski IoT, kao što je prikazano na Slici 2.1.1. Ova četiri IoT segmenta su ukratko opisana u nastavku [4].

IoT tipovi:

1) Masivni IoT,
2) Kritični IoT,
3) Industrijski IoT,
4) Širokopojasni IoT.

Masivni IoT, takođe poznat kao masovni mašinski tip komunikacije (mMTC), odnosi se na aplikacije koje služe za prikupljanje podataka i uključuju ogroman broj niskopotencijalnih krajnjih uređaja (npr. jeftini senzori) koji povremeno šalju male količine informacija ka cloud centrima ili sistemima za fuziju podataka. Tipični primeri masovnog interneta stvari uključuju senzore za merenje temperature, pritiska, svetlosti i sličnih parametara u pametnim domovima, zgradama, pametnim brojilima i pametnoj poljoprivredi. U ovakvim scenarijima, količina prenesenih podataka je mala, ali je broj IoT uređaja izuzetno veliki. Očekuje se da uređaji za masivni IoT funkcionišu i do 10 godina bez zamene baterije. LTE mreže već omogućavaju podršku za masivni IoT preko NB-IoT i LTE-MTC (LTE-M) [4].

Nasuprot tome, kritični IoT uključuje manje krajnjih tačaka koje rukuju velikim količinama podataka. IoT uređaji u ovoj kategoriji prevazilaze samo prikupljanje podataka i predstavljaju aplikacije sa velikim propusnim opsegom i malim kašnjenjem, tehnički poznate kao ultra-pouzdane komunikacije sa malim kašnjenjem (URLLC) [4]. Industrijska kontrola, robotske mašine i autonomna vozila su primeri kritičnog IoT-a, koji zahtevaju prenos podataka u realnom vremenu. Ove dve vrste IoT aplikacija imaju veoma različite zahteve, kao što je prikazano na Slici 2.1.2.



Slika 2.1.2. Različiti IoT segmenti i njihove karakteristike.

Industrijski IoT (IIoT) integriše ljude, podatke i mašine unutar proizvodnog okruženja i njegovih digitalnih blizanaca. IIoT je ključni element Industrije 4.0, koja predstavlja četvrtu fazu industrijske revolucije – prethodne tri su bile: mehanička proizvodnja (1784), masovna proizvodnja (1870) i automatizacija pomoću elektronike i računara (1970). Industrija 4.0 je proces digitalne transformacije fokusiran na korišćenje međusobnog povezivanja, automatizacije i podataka u realnom vremenu. Tehnologije poput IIoT-a, veštačke inteligencije (AI), velikih podataka, cloud infrastrukture i sajber bezbednosti rade zajedno kako bi omogućile ovu transformaciju. Podaci prikupljeni putem IIoT-a mogu se koristiti za optimizaciju efikasnosti u proizvodnim operacijama, od snabdevanja do distribucije i postprodajnih usluga. Najvažnije prednosti za proizvođače uključuju optimizovane procese, bolju iskorišćenost resursa, povećanu produktivnost, detaljniji uvid u lanac snabdevanja i proizvodnju, kao i poboljšane postprodajne usluge [5-7].

Širokopojasni IoT omogućava mobilnu širokopojasnu vezu za IoT uređaje, nudeći niže kašnjenje i veću propusnost u poređenju sa mMTC-om. Ovaj tip IoT-a je pogodan za napredne uređaje za nošenje, dronove, proširenu stvarnost, kao i za uređaje i senzore virtuelne realnosti koji zahtevaju veće performanse nego što LTE-M ili NB-IoT mogu da pruže. Pametni satovi sa LTE podrškom i LTE mreže već omogućavaju funkcionisanje širokopojasnog IoT-a, dok LTE takođe povezuje dronove, što predstavlja primer ovih vrsta uređaja.

Pouzdana veza između uređaja, senzora i IoT platforme je ključ svakog uspešnog IoT projekta. IoT bežične mreže moraju podržavati širok spektar povezanih uređaja i aplikacija, kao što je ranije opisano. Ovako široka raznolikost otežava i onemogućuje postojanje jedne tehnologije koja odgovara svakoj situaciji. Izbor prave mreže zahteva razmatranje različitih faktora od

pokrivenosti, potrošnje energije, veličine baterije i troškova primene. Dakle, mora postojati kompromis tako što treba izabrati bilo koji od ovih bežičnih tehnologija [4].

IoT bežično povezivanje i tehnologije mogu se klasifikovati na nekoliko načina, na primer, u smislu opsega pokrivenosti (kratak, srednji, dug ili 3D), spektra (licenciran ili nelicenciran), brzine prenosa podataka (nizak ili visok), tehnologija (ćelijske ili ne -ćelijski), zahtevi za napajanje (niski ili visoki), standardni (projekat partnerstva treće generacije (3GPP) ili ne-3GPP), cena (niska ili visoka), itd. Uobičajena klasifikacija je ćelijski IoT, široki IoT i IoT kratkog dometa, koji imaju dug, srednji i kratki domet [4, 9]. Unutar svake kategorije može postojati nekoliko bežičnih protokola kao što je prikazano na Slici 3. Konkretno, ćelijski IoT standardi se mogu podeliti kao:

Celularna IoT rešenja:

1) 2G/3G,
2) 4G,
3) LTE-M,
4) NB-IoT,
5) 5G,
6) 6G.

Uopšteno govoreći, IoT uređaji mogu da pristupe bilo kojoj od gore navedenih ćelijskih mreža uključujući stare mreže druge generacije (2G) i treće generacije (3G). Ove mreže i dalje igraju važnu ulogu i prihvataju mnoge IoT uređaje. Konkretno, skoro milijardu IoT uređaja je još uvek povezano na stare 2G/3G mreže sa tendencijom povećavanja. Takođe, eksponencijalno rastući broj širokopojasnih IoT uređaja se povezuje na postojeće mreže četvrte generacije (4G). Međutim, gornja rešenja nisu dizajnirana za masivne IoT uređaje, koji su moduli male snage i kojima je potrebna proširena pokrivenost [10].

Da bi se rešili takvi slučajevi korišćenja, nova rešenja kao što su NB-IoT i LTE-M su uvedena u LTE mreže. NB-IoT je standardizovan u 3GPP LTE izdanju da bi se obezbedila konekcija na širokom području za mMTC. U LTE izdanju, NB-IoT je dalje razvijen kako bi pružio poboljšano korisničko iskustvo. 2 NB-IoT podržava glavne mMTC zahteve, kao što su dug životni vek baterije i ogroman broj uređaja u ćeliji, i proširuje pokrivenost van granica postojeće ćelijske tehnologije [11].

Za razliku od 4G mreža koje su prvenstveno dizajnirane sa MMB aplikacijama na umu, a IoT rešenja poput NB-IoT-a su se pojavila kasnije, 6G bežični pristup nije namenjen samo za razvoj mobilnog širokopojasnog pristupa, već i da bude ključni pokretač Interneta stvari. Konkretno, 6G bežični pristup je razvijen imajući na umu tri široka slučaja upotrebe [12]:

1) poboljšani mobilni širokopojasni (eMBB),
2) masovne komunikacije mašinskog tipa (mMTC),
3) ultra-pouzdane komunikacije sa malim kašnjenjem (URLLC).

Mnoge buduće (distribuirane) aplikacije za daljinsko upravljanje i XR (taktilni internet) zahtevaju da rade na strogim i determinističkim ograničenjima kašnjenja od kraja do kraja. Paket

koji stigne prerano može biti odložen na kraju primaoca. Paket koji stiže prekasno je izgubljen paket. Dakle, povećanje latentnog podrhtavanja može povećati stopu gubitka paketa [13].

Kontrolni sistemi koji deluju na jedan ili niz interaktivnih mobilnih robotskih uređaja mogu da olabave svoje zahteve za propusnost i kašnjenje za redove veličine, koristeći prediktivnu kontrolu modela (MPC). Stohastički MPC se takođe pokazao kao efikasna mera za prevazilaženje strogih zahteva. Primer za primenu ovoga u bežičnom okruženju na postrojavanju, veliki dobici su dostižni da bi se smanjili zahtevi za gubitke paketa ili ograničenja kašnjenja [14].

Zbog ćega je od najveće važnosti učiti iz taktilnih internet aplikacija koje se testiraju i uvode u 5G u narednih 5 godina. Tek tada će biti moguće precizno definisati stope greške u paketu, kao i kašnjenja koja su zaista neophodna za 6G [15].

2.2. Trendovi mobilne komunikacije

Od pojave prvih analognih komunikacionih sistema 1980-ih, svaka nova generacija sistema uvodila se otprilike svakih deset godina. Prelazak na novu generaciju poboljšava kvalitet usluge (QoS), uvodi nove servise i omogućava dodatne funkcionalnosti. Cilj B5G i 6G mreža je da unaprede kapacitete za faktor od 10–100 u odnosu na prethodne generacije. Tokom poslednje decenije, mobilni saobraćaj je značajno porastao zbog širenja pametnih uređaja i komunikacija mašina-mašina (M2M). Procene pokazuju da će globalni obim mobilnog saobraćaja do 2030. godine biti 670 puta veći nego 2010. godine, a Međunarodna unija za telekomunikacije (ITU) predviđa da će ukupni mesečni mobilni saobraćaj premašiti 5 ZB.

Broj mobilnih pretplata će dostići 17,1 milijardu u poređenju sa 5,32 milijarde u 2010. Štaviše, upotreba M2M konekcije će takođe eksponencijalno rasti. Obim saobraćaja za svaki od mobilnih uređaja će se takođe povećati. Obim saobraćaja mobilnog uređaja u 2010. godini iznosio je 5,3 GB mesečno. Međutim, ovaj obim će porasti 50 puta u 2030. Broj M2M pretplata će se povećati 33 puta u 2020. i 455 puta u 2030. u poređenju sa 2010. Tabela 1 predstavlja nekoliko poređenja korišćenja mobilne konekcije u 2010, 2020, i 2030.

Nedavno su se istraživački interesi pomerili na prilagodljive i inteligentne metode zasnovane na podacima. Bežične mreže 5G će izgraditi osnovu inteligentnih mreža koje pružaju AI operacije. Procenjuje se da će do 2030. kapacitet 5G dostići svoj limit. Tada će se potpuno inteligentna mrežna adaptacija i upravljanje za pružanje naprednih usluga realizovati samo pomoću 6G mreža.

Dakle, 6G bežična komunikacija je rezultat porasta potreba korisnika iznad onoga što 5G mreža može da ponudi. Istraživači širom sveta već proučavaju kakve bi bile 6G komunikacije 2030. godine; oni takođe razmatraju moguće pokretače za uspešnu 6G bežičnu komunikaciju. Neki od kritičnih motivacionih trendova koji stoje iza evolucije 6G komunikacionih sistema su: visoka brzina prenosa, visoka pouzdanost, mala latencija, visoka energetska efikasnost, visoka spektralna efikasnost, novi spektri, zelena komunikacija, inteligentne mreže, dostupnost mreže,

konvergencija komunikacija, lokalizacija, računarstvo, kontrola i sensing. Stoga će 6G biti svet potpuno digitalne povezanosti.

Tabela 2.2.1. Globalni trendovi bežičnog povezivanja

Issue	2010	2020 (predviđanja)	2030 (predviđanja)	Jedinica
Mobilne pretplate	5.32	10.7	17.1	Bilion
Pametni telefoni pretplate	0.645	1.3	5	Bilion
M2M pretplate	0.213	7	97	Bilion
Obim saobraćaja	7.462	62	5016	EB/mesečno
M2M obim saobraćaja	0.256	5	622	EB/mesečno
Saobraćaj po pretplatniku	1.35	10.3	257.1	GB/mesečno

2.3. Specifikacije i zahtevi

5G tehnologije podrazumevaju određene kompromise u pogledu protoka podataka, kašnjenja, energetske efikasnosti, troškova implementacije, pouzdanosti i složenosti hardvera. Verovatno je da 5G neće moći da zadovolji sve zahteve tržišta nakon 2030. godine, pa će tada 6G tehnologija preuzeti ulogu popunjavanja ovog jaza između kapaciteta 5G i rastućih tržišnih potreba. Na osnovu prethodnih trendova i očekivanih budućih zahteva, glavni ciljevi 6G sistema su:

1) izuzetno visoke brzine prenosa podataka po uređaju;
2) veoma veliki broj povezanih uređaja;
3) globalna povezanost;
4) veoma nisko kašnjenje;
5) smanjenje potrošnje energije sa uređajima za internet stvari (IoT) bez baterija;
6) ultra-visoka pouzdana povezanost;
7) povezana inteligencija sa mogućnošću mašinskog učenja.

Tabela 2.3.1 prikazuje poređenje 6G sa 4G i 5G komunikacionim sistemima. Očekuje se da će 6G zahtevati nove upravljačke programe ključnih indikatora performansi (KPI), pored KPI-ja 5G komunikacionih sistema.

Tabela 2.3.1. Poređenje 6G sa 4G i 5G komunikacionim sistemima

Issue	4G	5G	6G
Maksimalna brzina prenosa podataka po uređaju	1 Gbps	10 Gbps	1 Tbps
Kašnjenje od kraja do kraja (E2E).	100 ms	10 ms	1 ms
Maksimalna spektralna efikasnost	15 bps/Hz	30 bps/Hz	100 bps/Hz
Podrška mobilnosti	Do 350 km/hr	Do 500 km/hr	Do 1000 km/hr
Satelitska integracija	Ne	Ne	Potpuno
AI	Ne	Delimično	Potpuno
Autonomno vozilo	Ne	Delimično	Potpuno
XR	Ne	Delimično	Potpuno
Haptic komunikacija	Ne	Delimično	Potpuno
THz komunikacija	Ne	Veoma ograničeno	Široko
Nivo usluge	Video	AR, VR	Taktilno
Arhitektura	MIMO	Masivne MIMO	Inteligentna površina
Maksimalna frekvencija	6 GHz	90 GHz	10 THz

Mnogi KPI-ovi 5G sistema važiće i za 6G. Međutim, 5G KPI se moraju pregledati i moraju se razmotriti novi KPI za 6G. Postoji nekoliko klasa KPI koje je trenutno teško definisati za 6G i očekuje se da će biti finalizovane budućim istraživanjima. Komunikacioni sistemi od 5 GB imaju za cilj da u većini tehnoloških domena ponovo povećaju odgovarajuću sposobnost za faktor od 10–100 u poređenju sa prethodnom generacijom komunikacionih sistema. Neki istraživači iz akademske zajednice i industrije ciljaju KPI-je za 6G komunikaciju na sledeći način: vršna brzina podataka od 1 Tbps, radio latencija od 0,1 ms, vek trajanja baterije od 20 godina, povezanost uređaja od 100/m3, povećanje saobraćaja od 10,00 puta, energetska efikasnost 10 puta, maksimalni prekid 1 od 1 milion, i 10 cm unutrašnja i 1 m spoljašnja preciznost u pozicioniranju. Početni 6G KPI se mogu široko klasifikovati u dve kategorije:

1) KPI vođeni tehnologijom i produktivnošću i
2) održivost i KPI vođeni društvom.

Prva kategorija uključuje KPI za nekoliko parametara kao što su podrhtavanje, budžet veze, prošireni domet/pokrivanje, 3D mapiranje, mobilni širokopojasni pristup, tačnost pozicioniranja, troškovi i ušteda energije. Druga kategorija uključuje KPI za nekoliko činjenica kao što su standardizacija, privatnost/bezbednost/poverenje, sve otvorenog koda, etika, inteligencija i slučaj

globalne upotrebe. KPI koji se odnose na kapacitet, efikasnost spektra, energetsku efikasnost, brzinu prenosa podataka, kašnjenje i povezanost su osnovni zahtevi svih tradicionalnih komunikacionih sistema. Međutim, KPI-ji u vezi sa bezbednošću i obaveštajnim podacima su novo dizajnirani za 6G. Svi potencijalni KPI prema 6G sistemima biće postignuti zajedno sa evolucijom 5G sistema.

Očekuje se da će 6G komunikacioni sistemi biti predstavljeni sledećim tipovima KPI povezanih usluga:

1) Sveprisutni mobilni ultra-širokopojasni (uMUB);
2) Ultra velike brzine sa komunikacijama sa malim kašnjenjem (uHSLLC);
3) Masivna komunikacija mašinskog tipa (mMTC);
4) Ultra-visoka gustina podataka (uHDD).

Procenjuje se da će 6G sistem imati 1000 puta veću simultanu bežičnu povezanost od 5G sistema. U poređenju sa poboljšanim mobilnim širokopojasnim pristupom (eMBB) u 5G, očekuje se da će 6G uključivati sveprisutne usluge, odnosno uMUB. Ultra-pouzdane komunikacije sa malim kašnjenjem, što je ključna karakteristika 5G, ponovo će biti suštinski pokretač u 6G komunikaciji koja pruža uHSLC dodavanjem funkcija kao što je E2E kašnjenje manje od 1 ms, više od 99,99999% pouzdanosti, i brzina prenosa podataka od 1 Tbps.

U 6G komunikacionom sistemu biće obezbeđeni masovno povezani uređaji (do 10 miliona/km2). Očekuje se da 6G ima za cilj da obezbedi Gbps pokrivenost svuda sa pokrivenošću novih okruženja kao što su nebo (10.000 km) i more (20 nautičkih milja). Volumenska spektralna efikasnost, za razliku od često korišćene spektralne efikasnosti područja, biće mnogo bolja u 6G. 6G sistem će obezbediti ultra-dugo trajanje baterije i naprednu baterijsku tehnologiju za prikupljanje energije. U 6G sistemima, mobilni uređaji neće morati da se posebno pune.

Sledeći ključni faktori će karakterisati 6G komunikacioni sistem:

1) AI integrisana komunikacija
2) Taktilni internet
3) Visoka energetska efikasnost
4) Niska zagušenja prenosa i pristupne mreže
5) Poboljšana bezbednost podataka

2.4. Trendovi mobilne komunikacije

Komunikacioni sistemi mogu biti fiksni, fiksno-mobilni i mobilni. Fiksni sistemi su oni kod kojih su predajnik i prijemnik stalno na određenim mestima, bez mogućnosti premještanja, kao što je klasična fiksna telefonija u domovima. Fiksno-mobilni sistemi imaju ili predajnik ili prijemnik fiksiran na određenoj lokaciji. Primer ovakvog sistema je mobilna telefonija, gde je predajnik (antena) stacioniran na visokoj tački u nekom području, dok je prijemnik (mobilni

telefon) mobilan, što omogućava korisniku kretanje uz zadržavanje veze sa predajnikom. Mobilni sistemi su oni u kojima su i predajnik i prijemnik pokretni, kao kod direktne komunikacije između dva mobilna uređaja koristeći Bluetooth tehnologiju, pri čemu je domet ograničen na oko 10 metara.

Današnje mobilne komunikacije oslanjaju se na ćelijske sisteme. U ćelijskom sistemu predajnik i prijemnik pokrivaju određenu geografsku oblast određenim frekvencijama. Da bi se, na primer, pokrio ceo grad mobilnim signalom, postavlja se veći broj baznih stanica, pri čemu svaka pokriva svoju oblast – ovaj raspored se naziva klasterski sistem i podseća na pčelinje saće. Unutar jednog klastera koristi se kompletan skup frekvencija (npr. za mobilne telefone kod nas 1800 MHz, sa opsegom od 1750 do 1850 MHz), ali svaka ćelija u klasteru radi na različitoj frekvenciji kako bi se izbegla interferencija sa susednim ćelijama. Frekvencije se ponavljaju samo u ćelijama koje nisu susedne. Ako je potrebno povećati broj korisnika u nekoj ćeliji, dodaju se nove ćelije unutar postojeće, uz pažljivo planiranje frekvencija i kontrolu interferencije.

Bežične mreže 5G će izgraditi osnovu inteligentnih mreža koje pružaju AI operacije. Procenjuje se da će do 2030. kapacitet 5G dostići svoj limit. Tada će se potpuno inteligentna mrežna adaptacija i upravljanje za pružanje naprednih usluga realizovati samo pomoću 6G mreža. Dakle, 6G bežična komunikacija je rezultat porasta potreba korisnika iznad onoga što 5G mreža može da ponudi. Istraživači širom sveta već proučavaju kakve bi bile 6G komunikacije 2030. godine; oni takođe razmatraju moguće pokretače za uspešnu 6G bežičnu komunikaciju. Neki od kritičnih motivacionih trendova koji stoje iza evolucije 6G komunikacionih sistema su: visoka brzina prenosa, visoka pouzdanost, mala latencija, visoka energetska efikasnost, visoka spektralna efikasnost, novi spektri, zelena komunikacija, inteligentne mreže, dostupnost mreže, konvergencija komunikacija, lokalizacija, računarstvo, kontrola i sensing. Stoga će 6G biti svet potpuno digitalne povezanosti.

Tabela 2.4.1. Globalni trendovi bežičnog povezivanja

Issue	2010	2020 (predviđanja)	2030 (predviđanja)	Jedinica
Mobilne pretplate	5.32	10.7	17.1	Bilion
Pametni telefoni pretplate	0.645	1.3	5	Bilion
M2M pretplate	0.213	7	97	Bilion
Obim saobraćaja	7.462	62	5016	EB/mesečno
M2M obim saobraćaja	0.256	5	622	EB/mesečno
Saobraćaj po pretplatniku	1.35	10.3	257.1	GB/mesečno

2.5. Integrisano otkrivanje i komunikacija

6G mreža će se proširiti na više frekvencije i koristiće masivne tehnologije antenskog niza, prateći trend započet u 5G sistemima. Ove tehnologije neće biti iskorišćene samo za obezbeđivanje sveprisutne komunikacije, već i za druge svrhe, posebno kao što je otkrivanje okoline (npr. THz snimanje) i postizanje lokalizacije sa centimetarskom preciznošću. Lokalizacija i sensing će postojati zajedno sa komunikacijom i deliće resurse u vremenu, frekvenciji i prostoru; oni će biti inteligentno povezani kroz uzajamno koristan odnos. 6G će takođe iskoristiti prednosti Age of Information (AoI), koje meri svežinu ažuriranja statusa za aplikacije koje zahtevaju daljinsko praćenje i kontrolu. Međutim, AoI je nemoćan u dobijanju semantike informacija koja obuhvata vremensko/prostorno različiti značaj razmene informacija i njenu dinamičku evoluciju. Stoga će 6G sistemi uvesti nova sredstva za prikupljanje i tumačenje „konteksta“ komunikacije; povezani aspekti će obuhvatiti visoko preciznu lokalizaciju pored vremena komunikacije i AoI. U 6G inteligentnim mrežama svesnim na kontekst, primena, rad i upotreba energije biće minimizovani u zavisnosti od informacija prikupljenih sensingom i lokalizacijom bez ljudske intervencije. Snimanje frekvencije THz i spektroskopija će podržati u realnom vremenu i trajne podatke o ljudskom telu kroz nenametljiva, beskontaktna i dinamička merenja u, na primer, digitalnoj zdravstvenoj tehnologiji. U 6G metode simultane lokalizacije i mapiranja (SLAM) omogućiće implementaciju naprednih aplikacija unakrsne realnosti (XR) i navigaciju autonomnih vozila i dronova. Na kraju, u 6G sensingu, jer će geolokacija, radar i spektroskopija obezbediti preciznu sliku podešavanja, pasivni i aktivni sensing će se neprekidno prenositi jedno drugom i obrađivati informacije [16-18].

2.6. Obezbeđivanje održivosti

Održivi razvoj zauzima centralno mesto na evropskoj agendi, a politike EU ističu značaj njegovih ekonomskih, društvenih i ekoloških aspekata koje treba sagledavati zajedno. Kada se razmatra održivost u kontekstu informacionih i komunikacionih tehnologija (IKT), važno je razlikovati održive IKT od IKT za održivost.

Održive IKT imaju za cilj smanjenje energetskog i resursnog otiska, uključujući emisije, odnosno osiguravaju da IKT doprinosi održivom društvu. Jedan od glavnih izazova za 6G biće zaustavljanje rasta energetske potrošnje uprkos povećanju saobraćaja. Ključni indikatori performansi (KPI) koji se odnose na potrošnju energije po bitu podataka i ukupnu potrošnju biće komplementarni. Takođe, KPI za kružno korišćenje resursa razmatraće se u okviru IKT-a kako bi se uzeli u obzir različiti aspekti održivosti [3].

IKT za održivost definiše način na koji informaciono-komunikacione tehnologije mogu da transformišu industrije, zajednice i druge sektore, pružajući povezivanje i inteligenciju kroz 6G. Cilj je smanjenje potrošnje energije i resursa, smanjenje emisija i unapređenje društvenih aspekata koji zahtevaju poboljšanja u svetu. Prvi deo se odnosi na ambiciju IKT za održivost, dok drugi deo

obuhvata ciljeve održivog razvoja postavljene od strane Ujedinjenih nacija. Ključni indikatori performansi (KPI) biće potrebni za merenje smanjenja emisija i potrošnje resursa, uz korišćenje dostupnih metrika vezanih za ciljeve održivog razvoja.

2.7. Zavisnost društva od 6G mreže

2030-te će postati poznate kao početak doba široke upotrebe lične mobilne robotike. Ćelijske generacije 1G i 2G su obezbedile teleprisustvo govornih usluga, a 3G i 4G dodale su teleprisustvo podataka. Sa 5G je počela pojava taktilnog interneta, odnosno postaće moguća teleprisutnost i kontrola stvarnih i virtuelnih objekata putem mobilne mreže. Baš kao što su 1G i 3G dominirali poslovnim korisnicima koji su koristili nove usluge, 5G to takođe doživljava. Sada govorimo o 5G pružanju novih usluga za „vertikalne industrije“, sa manje fokusa na potrošače. 2G i 4G, međutim, isporučili su mobilni telefon za široku upotrebu i potrošački pametni telefon. Da bi sledio istu liniju, 6G mora da isporuči funkcionalnost da postane infrastruktura koja omogućava široku upotrebu mrežno kontrolisane lične stvarne i virtuelne robotike [19]:

1) Omogućavanje privatnosti: isporučiti mrežnu funkcionalnost kako bi lokacija terminala ostala privatna (npr. za automatizovanu vožnju);

2) Pouzdanost po dizajnu: Kako ćelijske mreže postaju glavna infrastruktura za društva, moramo osigurati da sve mrežne funkcije, kao i operativni sistemi i hardverske platforme mogu biti kontinuirano formalno verifikovane, izgrađujući 6G od istinskog poverenja.

3) Društvena pravičnost: Da bi se osiguralo da se sva društva mogu pridružiti svetu koji ima 6G, pokrivenost mora biti omogućena za udaljene regione. Ukupna potrošnja energije 6G infrastrukture mora se vratiti na nivoe 4G, nezavisno od broja terminala.

Ukratko, 6G će postati osnova društava budućnosti. Mora da se bavi hitnim društvenim potrebama i istovremeno pruži novu funkcionalnost. Razvoj i primena 6G moraju biti postignuti uzimajući u obzir ljudske faktore i angažovanje krajnjeg korisnika kako bi se razvilo u društvo istinski usmereno na čoveka [3].

2.8. Pristupačnost, skalabilnost

Da bi se osiguralo da 6G može biti inkluzivan za sve ljude širom sveta, mora da bude pristupačan i skalabilan sa velikom pokrivenošću svuda. Jedan od načina da se postigne pristupačan i skalabilan 6G sistem je da se uveri da je sistem globalan, tj. isti sistem se koristi širom sveta. Dok u trenutnoj fazi fundamentalnog istraživanja i eksploatacije tehničkih komponenti postoje različite lokalne inicijative, u nekom trenutku je važno da globalni standardi i dalje budu glavni pokretač 6G (npr. 3GPP). Prelazak sa 3G na 4G, konsolidovan sa 5G, dokazao

je da su globalni standardi uspešan način da se tehnologija učini dostupnom. To naravno ne sprečava uključivanje ili više standardnih grupa (npr. 3GPP i O-RAN), sve dok postoji vrlo jasna granica između njihovih odgovornosti [3].

Pored globalnih standarda, takođe je važno da 6G ima dizajn arhitekture kojim se može upravljati smanjenjem broja opcija (tj. opcija bez stvarnog tržišnog potencijala). Drugim rečima, 6G standardizacija treba da ima za cilj odgovarajući broj interfejsa kojima se može upravljati sa relevantnim poslovnim uticajem.

Za 6G, pristupačnost i skalabilnost moraju uzeti u obzir da operateri moraju ulagati u mrežnu opremu i upravljati mrežom. Uz korišćenje viših frekvencija, biće potrebno sve više baznih stanica da bi se obezbedila pokrivenost svuda. Značajno povećanje broja piko-ćelija – na primer, jedna po prostoriji – moguće je samo ako se cena ovih baznih stanica može sniziti radi kompenzacije.

Mobilni uređaji će takođe morati da budu pristupačni. Jeftini uređaji treba da budu dostupni tamo gde je potrebna samo osnovna funkcionalnost (npr. sa senzorima). Pa ipak, i ovde se primenjuju osnove da će previše različitih tehnoloških opcija povećati ukupne troškove.

2.9. Proširivanje KPI-ja

Tokom poslednje decenije bili smo svedoci godišnjeg rasta obima saobraćaja mobilnih podataka od 50% do 100%. Nema razloga za pretpostavku da će se u narednoj deceniji ovaj rast mobilnih podataka usporiti. Možemo očekivati kontinuirano povećanje broja povezanih uređaja (senzora, povezanih automobila, kućnih uređaja, kamera za telo, itd.) u kombinaciji sa sve većim zahtevima novih aplikacija i usluga.

Treba imati na umu da ovaj rast obima saobraćaja mobilnih podataka ne može rezultovati uporedivim rastom potrošnje energije. Da bi potrošnja energije 6G ostala uporediva sa 5G, ukupna potrošnja energije po terminalu, baznoj stanici, mrežnom čvoru mora da se smanji i energetska efikasnost po transportovanim i obrađenim podacima treba da se poboljša u skladu sa rastom obima mobilnog saobraćaja podataka.

Jedno od najvećih obećanja sledeće decenije je da će impresivna komunikacija, holografska teleprisutnost i AR/VR postati naš podrazumevani način komunikacije. Da bismo podržali ovu vrstu aplikacija, očekuje se da će 6G morati da isporuči brzine podataka do 10 Gbit/s.

Sve veći broj mobilnih uređaja ne znači nužno da se povećava gustina mobilnih uređaja. Međutim, 6G će verovatno koristiti manje ćelije u kojima gustina uređaja može biti veća. 6G treba da podržava vršne gustine do 10 uređaja po m^2. Štaviše, kada se poveća promet mobilnih podataka za svaki uređaj, povećaće se i potreban kapacitet. Za scenarije kao što su gledaoci na stadionu sa naočarima proširene stvarnosti ili radne stanice na podu u kancelariji, biće potrebni kapaciteti u opsegu od 150 Tpbs/km2, što znači 10 puta više od zahteva za kapacitetom od 5G.

Komunikacije pete generacije (5G), sa daleko više funkcija od komunikacija četvrte generacije, uskoro će biti raspoređene širom sveta. Očekuje se da će nova paradigma bežične

komunikacije, sistem šeste generacije (6G), uz punu podršku veštačke inteligencije, biti implementirana između 2027. i 2030. Osim 5G, neka fundamentalna pitanja koja treba da se reše su veći kapacitet sistema, veća brzina prenosa podataka, manja latencija, veća sigurnost i poboljšan kvalitet usluge (QoS) u poređenju sa 5G sistemom. Zbog čega je neophodno razjasniti i opisati nove tehnologije kao što su veštačka inteligencija, teraherc komunikacije, bežična optička tehnologija, optička mreža slobodnog prostora, trodimenzionalno umrežavanje, kvantne komunikacije, bespilotne letelice, komunikacije bez ćelija, integracija bežičnih informacija i prenos energije, integrisano otkrivanje i komunikacija, integrisane pristupno-pokrovne mreže, dinamičko presecanje mreže, holografsko oblikovanje snopa, komunikacija povratnog rasejanja, inteligentna reflektujuća površina, proaktivno keširanje i analitika velikih podataka koji mogu pomoći razvoju 6G arhitekture u garantovanju QoS-a. Pored toga, biće predstavljene očekivane aplikacije sa zahtevima za 6G komunikaciju i moguće tehnologije. Takođe, biće opisani potencijalni izazovi i pravci istraživanja za postizanje ovog cilja [3].

Brz razvoj različitih aplikacija u nastajanju, kao što su veštačka inteligencija (AI), virtuelna stvarnost (VR), trodimenzionalni (3D) mediji i internet sveta (IoE), doveo je do ogromnog obima saobraćaja. Globalni obim mobilnog saobraćaja bio je 7.462 EB/mesečno u 2010. godini, a predviđa se da će ovaj saobraćaj biti 5016 EB/mesečno u 2030.-oj. Ova statistika pokazuje važnost unapređenja komunikacionih sistema. Idemo ka društvu potpuno automatizovanih sistema daljinskog upravljanja. Autonomni sistemi postaju popularni u svim oblastima društva, uključujući industriju, zdravstvo, puteve, okeane i svemir. U tom smislu, milioni senzora su integrisani u gradove, vozila, domove, industrije, hranu, igračke i druga okruženja kako bi obezbedili pametan život i automatizovani sistemi. Zbog toga će biti potrebna visoka brzina prenosa podataka i pouzdano povezivanje da bi se podržale ove aplikacije. U određenim delovima sveta, bežične mreže pete generacije (5G) su već postavljene. Očekuje se da će do 2023. godine 5G biti u potpunosti korišćen širom sveta.

5G mreže neće imati kapacitet da isporuče potpuno automatizovanu i inteligentnu mrežu koja pruža sve kao uslugu i potpuno impresivno iskustvo. Iako će 5G komunikacioni sistemi ponuditi značajna poboljšanja u odnosu na postojeće sisteme, oni neće moći da ispune zahteve budućih inteligentnih i automatizovanih sistema nakon deset godina. 5G mreža će obezbediti nove karakteristike i obezbediti bolji kvalitet usluge (QoS) u poređenju sa četvrtom generacijom (4G) komunikacija. 5G tehnologija uključuje nekoliko novih dodatnih tehnika, kao što su novi frekventni opsezi (npr. milimetarski talasi (mmVave) i optički spektri), napredno korišćenje i upravljanje spektrom, kao i integracija licenciranih i nelicenciranih opsega. Bez obzira na to, brz rast sistema usmerenih na podatke i automatizovanih sistema može premašiti mogućnosti 5G bežičnih mreža. 5G komunikacija je značajno previdela konvergenciju komunikacija, inteligencije, senzora, kontrole i računarskih funkcionalnosti. Međutim, buduće IoE aplikacije će zahtevati ovu konvergenciju. Specifični uređaji, kao što su VR uređaji, moraju da prevaziđu 5G (B5G) jer zahtevaju minimalne brzine prenosa podataka od 10 Gbps [3].

Nove stavke koje mogu zahtevati sistemi šeste generacije (6G) uključuju i masivne interfejse čovek-mašina, sveprisutno računarstvo između lokalnih uređaja i oblaka, multi-senzornu

fuziju podataka za kreiranje mapa, kao i preciznost u osećaju i aktiviranje za kontrolu fizičkog sveta.

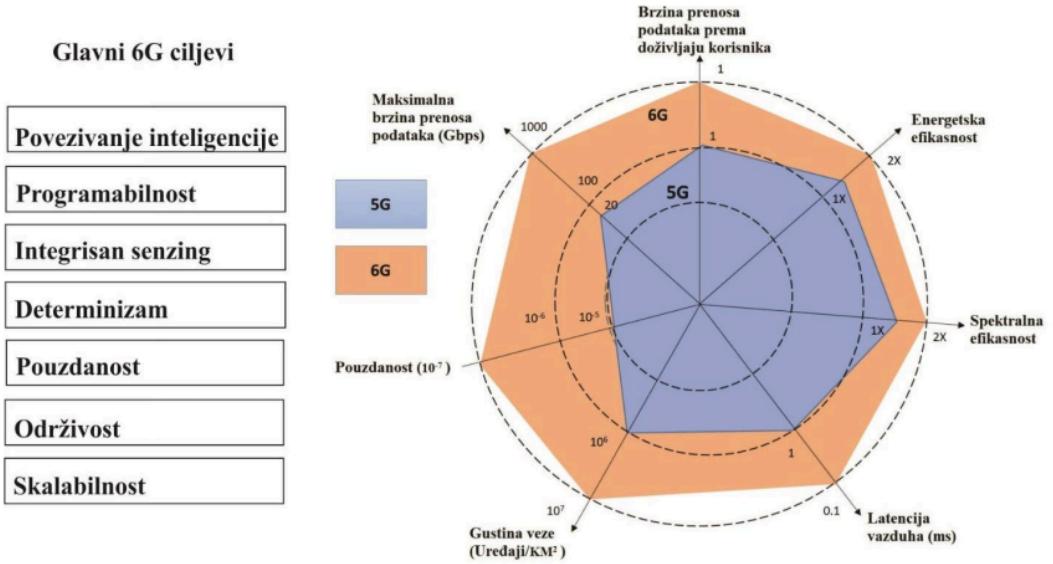
Da bi se postigao cilj 6G i da bi se prevazišla ograničenja 5G za podršku novim izazovima, B5G bežični sistemi će morati da budu razvijeni sa novim atraktivnim karakteristikama. Komunikacione mreže 6G će ispuniti zaostajanja 5G sistema uvođenjem nove sinteze budućih usluga kao što su inteligencija senzora ambijenta i nova interakcija čovek-ljudi i čovek-mašina, sveobuhvatno uvođenje veštačke inteligencije i ugradnja novih tehnologija kao što su teraherc (THz), 3-dimenzionalno (3D) umrežavanje, kvantne komunikacije, holografsko formiranje snopa, komunikacija povratnog rasejanja, inteligentna reflektujuća površina (IRS) i proaktivno keširanje. Ključni pokretači 6G biće konvergencija svih prošlih karakteristika, kao što su zgušnjavanje mreže, visoka propusnost, visoka pouzdanost, niska potrošnja energije i ogromna povezanost.

6G sistem bi takođe nastavio trendove prethodnih generacija, koji su uključivali nove usluge uz dodatak novih tehnologija. Nove usluge uključuju veštačku inteligenciju, pametne nosive uređaje, implantate, autonomna vozila, računarske uređaje za realnost, sensing i 3D mapiranje. Najkritičniji zahtev za 6G bežične mreže je sposobnost rukovanja ogromnim količinama podataka i povezivanje sa veoma velikom brzinom podataka po uređaju [20].

5G paradigma će se dalje razvijati i proširivati u 6G. Međutim, 6G sistem će povećati performanse i maksimizovati korisnički QoS nekoliko puta više od 5G, zajedno sa nekim uzbudljivim karakteristikama. Može da zaštiti sistem, obezbedi korisničke podatke i pruži udobne usluge. Očekuje se da će 6G komunikacioni sistem biti globalno komunikaciono sredstvo. Predviđeno je da će brzina bitova po korisniku u 6G biti približno 1 Tbps u mnogim slučajevima. Očekuje se da će 6G sistem obezbediti istovremenu bežičnu vezu koja je 1000 puta veća od 5G [20].

Iako industrija i tela za standardizaciju još uvek rade oko 5G mobilne tehnologije, a komercijalizacija 5G je još uvek u početnim fazama, mnogi istraživači u akademskoj zajednici i industriji već su počeli da se pitaju šta je sledeće. Međunarodna mobilna telekomunikacija (IMT) planira da dovrši svoju viziju 6G do 2023. i da razvije tehničke zahteve za 6G preko organizacija za industrijske standarde, kao što je 3GPP [20].

Slika 2.9.1 ilustruje željene potrebe bežičnih mreža u 2030-im, ili 6G mreže, zasnovane na ITU. Zahtevi se takođe upoređuju sa zahtevima za 5G mreže, na primer, IMT-2020. Drugi aspekti mreža 2030-ih, kao što su arhitektura, novi slučajevi upotrebe, metodologija evaluacije, su u fazi proučavanja.



Slika 2.9.1. Poređenje ključnih zahteva za performanse između 5G i 6G.

Što se tiče specifikacija i zahteva, 5G tehnologije podrazumevaju određene kompromise u oblastima kao što su protok podataka, kašnjenje, energetska efikasnost, troškovi implementacije, pouzdanost i složenost hardvera. S obzirom na to da se očekuje da 5G neće moći da zadovolji sve tržišne potrebe nakon 2030. godine, 6G će preuzeti ulogu popunjavanja ovog jaza između kapaciteta 5G i rastuće potražnje. Na osnovu prethodnih trendova i predviđanja budućih zahteva, glavni ciljevi 6G sistema su:

1) izuzetno visoke brzine prenosa podataka po uređaju;
2) veoma veliki broj povezanih uređaja;
3) globalna povezanost;
4) veoma nisko kašnjenje;
5) smanjenje potrošnje energije sa uređajima za internet stvari (IoT) bez baterija;
6) ultra-visoka pouzdana povezanost;
7) povezana inteligencija sa mogućnošću mašinskog učenja.

2.10. Arhitektura i kontrola mreže 6G sistema

Istraživanje 6G tehnologije ima za cilj da omogući efikasno, održivo, pametno i pouzdano distribuirano računarstvo. Integracija komunikacionih i računarskih algoritama zahteva ko-dizajn komunikacije i računanja, što spada u oblast upravljanja mrežnom veštačkom inteligencijom. Ovo uključuje alokaciju resursa zasnovanu na AI, instanciranje mrežnih funkcija, upravljanje kolaborativnim AI komponentama širom mreže, kao i razvoj distribuiranih AI mehanizama, na

primer putem federativnog učenja (FL) ili primene AI mehanizama za donošenje odluka koji omogućavaju objašnjivu AI.

Iz perspektive upravljanja uslugama, AI/ML će biti neophodan da bi se održala isplativost rada predviđenih kompleksnih 6G usluga, kao što je interakcija na ljudsko-digitalnim fizičkim svetovima i Internet of Senses. Osim toga, proliferacija višestrukih tehnologija virtuelizacije, uključujući virtuelne uređaje, mikroservise, kontejnere, funkcije bez servera i njihova interoperabilnost će povećati složenost mrežnih operacija. Stoga će AI/ML mehanizmi postati ključni za automatizaciju procesa donošenja odluka [3], [21].

AI/ML će takođe omogućiti implementaciju prediktivne orkestracije u 6G, na primer, da bi se postigle skoro optimalne odluke o postavljanju (uključujući postavljanje funkcija virtuelne mreže imajući u vidu, na primer, geografsku gustinu uređaja), servis i konfiguraciju mrežnog preseka ili održavanje u realnom vremenu i raspoloživost resursa. Ovo bi omogućilo da se postigne pristup bez dodira. 6G orkestracija će ciljati na kontinuum od krajnjih uređaja, do ivice, do RAN (gde treba razmotriti nove arhitekture i paradigme usmerene na korisnika, kao što je umrežavanje bez ćelija), i oblak/jezgro. Predviđanje budućeg stanja uređaja treba uzeti u obzir za samoprilagođavanje usluge, kako bi se obezbedilo najniže moguće kašnjenje, energetska efikasnost i drugi ključni ciljevi performansi, kao i migracija između dostupnih uređaja, ivica i resursa u oblaku za adekvatnu podršku mobilnosti podataka proizvođača i/ili potrošača [3], [21].

Da bi takva operacija sistema vođena veštačkom inteligencijom uopšte bila izvodljiva, svaka komponenta u komponenti infrastrukture i svaka komponenta usluge moraju postati i ostati pod kontrolom zakupca (npr. operater mobilne mreže). Komponente infrastrukture obuhvataju:

1) fizičke uređaje sa različitim mogućnostima (npr. računarski serveri, mrežna oprema, senzori/aktuatori) i životnim vekom (npr. na baterije, ekološki napajani);

2) elementi mobilne ili fiksne mreže (na primer, zemaljske, satelitske ili bazne stanice montirane na voz);

3) virtuelni uređaji koji rade na fizičkim uređajima, koje karakteriše iznenadna pojava ili nestanak u gustim klasterima i, potencijalno, u velikom broju slučajeva (npr. unutar centara podataka)

4) usluge koje koriste treća lica (npr. iznajmljene linije, usluge transporta).

Sve usluge koje pruža zakupac, uključujući funkcije korisnika, kontrolne i upravljačke ravni, obezbeđuju se iz te infrastrukture. Konkretno, gore pomenute AI/ML funkcije same po sebi će biti instancirane i pokrenute na vrhu te iste infrastrukture. Pored toga, takva infrastruktura će suštinski imati više zakupaca. Iako deljenje skupa resursa ne podrazumeva da se svaki fizički uređaj deli, pretpostavka mapiranja jedan-na-jedan usluga-infrastruktura može se smatrati zastarelom.

Sve ovo zahteva veoma raznovrsnu, prodornu i autonomnu kontrolu resursa. Mora da ima sposobnost da održi upravljivost svih dostupnih komponenti resursa bez obzira na:

1) prirodu komponente, rezultujuće mrežne topologije, gustine i adrese;

2) opterećenja i fluktuacije upotrebe;

3) sopstvene operativne odluke operatera, o korišćenim AI/ML funkcijama, kontrolorima, itd. Imperativ je rukovati greškama koje su sami izazvali (npr. presecanje podgrana resursa, neslaganja između pogleda kontrolora i stvarnih situacija sa resursima, itd.), što će biti nemoguće izbeći u bilo kom većem distribuiranom sistemu kao što je gore navedeno;

4) operativne odluke trećih strana, oba operatera na istom nivou, koji paralelno koriste zajedničke resurse, i operatera pružaoca, odnosno vlasnika osnovnih resursa.

Stoga su autonomni, distribuirani mehanizmi potrebni u svim infrastrukturnim i servisnim komponentama za organizaciju i održavanje takve kontrole resursa. Dodatni autonomni mehanizmi su potrebni za operacije sa više zakupaca i višenamenskih operacija tog skupa resursa, pre svega distribuirano rešavanje konflikta tokom izvršavanja i raspoređivanje resursa.

2.11. Edge i sveprisutno računarstvo

Razvoj i značaj ivičnog računarstva motivisani su faktorima kao što su masovni IoT, Industrija 4.0, pametni gradovi i nove distribuirane aplikacije zasnovane na AI/ML. Povećanje računarskih resursa na ivici mreže omogućava podršku ovakvim slučajevima upotrebe. Glavni ciljevi ivičnog i sveprisutnog računarstva su smanjenje kašnjenja, povećanje odziva i redukcija obima podataka koji se prenose između korisničkih/IoT uređaja i centralizovanih cloud resursa (što omogućava uređajima da prebace deo obrade na mrežu, čineći ih jednostavnijim, manjim i energetski efikasnijim). Pored toga, nove paradigme u organizaciji usluga, kao što su lanci mikroservisa ili funkcija, dovode do scenarija u kojima se virtuelizovane mrežne funkcije mogu distribuirati između osnovnih i ivičnih računarskih resursa. Računarstvo na dalekoj ivici, gde se resursi približavaju samoj ivici mreže, dodatno obogaćuje distribuirano računarsko okruženje. Iako je ovaj razvoj započeo sa ranijim generacijama mobilnih mreža, u 6G mrežama značaj ivice i sveprisutnog računarstva biće još veći, jer tranzicija ka distribuiranoj (mikro)uslužnoj arhitekturi i koncept „nultog kašnjenja“ čine lokalnu obradu ključnom i održivom opcijom u ovim scenarijima [3], [21].

U 5G mrežama, napredne računarske tehnologije će se razvijati na evolutivni način koristeći različite tehnologije računarske platforme razvijene za otvorena okruženja i okruženja računarstva u oblaku. U praksi, to znači prilagođavanje tehnologija virtuelizacije kao što su kontejneri i orkestracija kontejnera, kao i modela kompozicije usluga kao što su SaaS (Softver kao usluga), FaaS (Funkcija kao usluga) itd. Računarstvo zahteva bolje upravljanje heterogenim resursima i lokaciju instanci usluga. Štaviše, ograničeni resursi na ivici, kao i potreba za poboljšanom energetskom efikasnošću, zahtevaju laganu virtuelizaciju i detaljnije metode orkestracije. To znači da su potencijalno potrebna mnoga poboljšanja i modifikacije trenutnih metoda specifičnih za oblak i nije nužno jasno da se sve može efikasno podvesti pod istu orkestraciju u ovom evolucionom pristupu [3].

Predviđeno je da se računarski i mrežni resursi (in-netvork computing) spoje u jedan računarski kontinuum koji se proteže od korisnika/IoT uređaja do centralizovanog oblaka. U takvom slučaju, svim uslugama i resursima bi se prirodno upravljalo na jedinstven integrisani način, uključujući ne samo resurse i funkcije u aplikacijskoj, servisnoj i podatkovnoj ravni, već i funkcionalnosti upravljačke ravni telekomunikacionog sistema. Ovo bi prirodno zahtevalo mnogo razvoja računarskih platformi i tehnologija virtuelizacije. Međutim, ovo bi ponudilo mnogo raznovrsniju i efikasniju platformu za 6G mreže i stoga su potrebne metode za prikupljanje distribuiranih podataka za AI/ML i keširanje za pravovremeno korišćenje na ivici i u jezgru. Konačno, ovakav razvoj bi takođe značio da će ivično računarstvo kao nezavisan koncept nestati [21].

2.12. Radio tehnologija i obrada signala

5G podržava usluge poput eMBB, mMTC i URLLC, zajedno sa pripadajućim ključnim indikatorima performansi (KPI). Međutim, očekuje se da će 6G mreže omogućiti znatno zahtevnije aplikacije, kao što je holografska teleprisutnost, i ispunjavati mnogo strožije zahteve, uključujući protok podataka u Tbps, latenciju ispod milisekunde do mrežnog sloja, izuzetno visoku pouzdanost sa stopom greške paketa od 10^{-8}, veću gustinu uređaja, ekstremnu energetsku efikasnost i ultra-nisku potrošnju energije, visoku bezbednost i preciznu lokalizaciju na nivou centimetra. Neki od ovih izazova mogli bi se prevazići korišćenjem šireg elektromagnetnog spektra u terahercima (THz), sub-THz opsegu, infracrvenim i vidljivim svetlosnim talasima. Paralelno, centimetarski i milimetarski spektar koji se danas koristi za 5G i druge starije sisteme potrebno je efikasno obraditi i ponovo koristiti, uz pažljivo rešavanje pitanja koegzistencije mobilnih i nemobilnih sistema.

Uzimajući u obzir izazove koje nameće zakon fizike na THz spektar, dizajn komercijalno održivih THz komunikacionih sistema će zahtevati zajedničko proučavanje talasnog oblika i modulacije, karakterizaciju radio kanala, formiranje snopa i izvodljivost hardvera zajedno. Radio gradivni blokovi (talasni oblik, modulacija i kodovanje, neortogonalni višestruki pristup, puni dupleks, masivni MIMO (mMIMO) koji se obično distribuira, itd.) treba dalje da se razvijaju kako bi se ispunili strogi zahtevi 6G. Između ostalog, potrebna su istraživanja, na primer, inteligentnih reflektujućih površina (IRS), integrisanog pozicioniranja, sensinga i komunikacija (da bi se, na primer, omogućila široka upotreba robotike u industrijskim aplikacijama), slučajnog pristupa za velike veze, bežičnog keširanja ivica itd. Štaviše, ML i AI kao alati su uspešno korišćeni u mnogim aplikacijama. Ipak, njegovu primenu u dizajnu radio interfejsa treba pažljivo proučiti.

Konkretno, za dizajn 6G interfejsa, trebalo bi istražiti sledeće ključne tehnologije koje omogućavaju:

1) Ponovno korišćenje spektra: 5G obično koristi „niske opsege" (< 2 GHz) i „srednje opsege" (2-8 GHz) za eMBB, URLLC & mMTC i „visoke opsege" (> 24 GHz) za eMBB i URLLC aplikacije. Dodeljeni frekvencijski spektar i njegova dostupnost jedan je od glavnih faktora koji

određuje kapacitet sistema. Međutim, radio spektar je veoma oskudan resurs. Posebno su opsezi nižih frekvencija dragoceni i strogo regulisani. Da bi se zadovoljili zahtevi za velikim propusnim opsegom nadolazećih 6G sistema, ključno je efikasno ponovo iskoristiti postojeće resurse spektra niskog, srednjeg i visokog opsega (npr. zajedničko korišćenje licenciranog i nelicenciranog spektra, koristeći npr. kognitivna rešenja zasnovana na radiju).

2) Komunikacija milimetarskim talasima (mmVave): U poređenju sa niskim i srednjim opsegom, mmVave ima mnogo veći raspoloživi propusni opseg što je veoma dragocena prednost za 6G. Trenutno, mmVave otprilike ispod 50 GHz se razmatra za 5G NR i očekuje se da će za 6G biti potrebni dodatni mmVave opsezi (npr. iznad 100 GHz). mmVave tehnologija pruža dobro rešenje za backhaul, fronthaul i pristupne mreže. Pošto može da podrži visoku brzinu prenosa podataka, mmVave je primenljiv na autonomnu vožnju, pametne fabrike itd. Posebno za zahteve 6G, potrebno je prevazići dalje izazove kao što je efikasan dizajn za formiranje snopa za prenos i prijem, implementacija modulacione šeme kodovanja sa malom snagom, niskom cenom , i visoka propusnost, itd.

Komunikacija milimetra-talasa (MMVAVA) je korisna za buduće 6G mreže da bi se zadovoljile sve rastuće zahteve za izuzetno brzim brzinom prenosa podataka [21]. To je zbog ogromne raspoložive propusne širine u MMVAV-u koji se potencijalno mogu iskoristiti u mobilnim širokopojasnim aplikacijama za postizanje vršnih brzina podataka više gigabit-po sekundi (Gbit / s) za unutrašnje i fiksne bežične sisteme na otvorenom [22]. Veliki spektar je uključen u MMVAVE frekvencije. Ovaj spektar se kreće od 30 do 300 GHz, što odgovara talasnoj dužini od 10 mm do 1 mm [23]. Dakle, višestruke frekvencije Gigahertz-a mogu se u potpunosti podržati da bi se ponudilo naređenje poboljšanja kapaciteta velike veličine za buduće 6G mreže. Pored toga, zahvaljujući većoj propusnosti, MMVAVE komunikacije mogu biti korisne za aplikacije osetljive na kašnjenje. MMVAVE komunikacije su već razmotrene u IEEE standardu (IEEE 802.11ad [24]).

MmVave komunikacije su neophodne za ćelijske heterogene mreže [25], [26] za povećanje brzine prenosa podataka. Osim toga, mmVave može efikasno da se koristi za podršku automatizovane komunikacije vozila, što bi omogućilo vozilima sa velikom brzinom da nesmetano razmenjuju informacije [27], [28]. mmVave komunikacija takođe ima potencijal da podrži samostalni bežični backhaul u ćelijskim mrežama [29]. Eksperimentalni rezultati u [30] pokazuju da mmVave ima potencijal da podrži spoljnu i unutrašnju komunikaciju. Rezultati pokazuju da se brzina prenosa podataka od oko 500 Mb/s može postići u okruženjima bez vidnog polja (NLoS) i sa mobilnošću od 8 km/h. MmVave se može koristiti sa postojećim mikrotalasnim frekvencijama u ćelijskim komunikacijama. U ovom kontekstu, rad u [31] predlaže način korišćenja mikrotalasnih frekvencija za slanje kontrolnih informacija i mmVave frekvencija za prenošenje prenosa podataka korisnog opterećenja. mmVave komunikacija ima potencijal da podrži brzinu prenosa podataka velike brzine za različite bežične uređaje kao što su pametni telefoni, pametni satovi i proširena i virtuelna stvarnost [32], [33]. Međutim, komunikacija na frekvencijama mm talasa pati od specifičnog ponašanja širenja kao što je veliko slabljenje i apsorpcija signala, kao i veliki gubitak penetracije. MmVave signali su podložni velikom povećanju gubitka putanje u

poređenju sa mikrotalasnim signalima, koji se trenutno koriste u većini ćelijskih sistema [34]. Međutim, opseg kratkih talasnih dužina u mmVave komunikacijama omogućava postavljanje nizova malih dimenzija sa velikim brojem antenskih elemenata koji mogu biti sadržani u maloj fizičkoj dimenziji. Zbog toga se korišćenjem velikog broja antenskih nizova može postići dovoljan dobitak u formiranju snopa koji je potreban da bi se prevazišao gubitak putanje i omogućilo prostorno multipleksiranje nekoliko tokova podataka radi daljeg poboljšanja spektralne efikasnosti [34]. Osim toga, veliko pojačanje pri formiranju snopa koje pruža mmVave komunikacija ima potencijal da poboljša kvalitet veze, proširi pokrivenost i smanji smetnje [35]. Postoje fundamentalne razlike između korišćenja velikih antenskih nizova na konvencionalnoj mikrotalasnoj frekvenciji i frekvenciji mm talasa u smislu kanala propagacije, dizajna hardvera i algoritama za obradu signala [36]. Na primer, postojeća arhitektura hardvera podržava potpuno digitalno formiranje snopa baznog opsega na mikrotalasnoj frekvenciji, što direktno kontroliše fazu i amplitudu signala i omogućava fleksibilan prenos [36]. Međutim, zajednička upotreba analognog i digitalnog oblikovanja snopa je poželjna na frekvenciji mm talasa da bi se prevazišla ograničenja radio-frekvencije hardvera [36]. Vredi napomenuti da analogno-digitalni pretvarači (ADC) u mmVave sistemima mogu biti skupi i energetski neefikasni u poređenju sa mikrotalasnim sistemima. Obično se veliki elementi antene bazne stanice mogu lako implementirati korišćenjem potpuno digitalnih nizova, ali složenost implementacije može da raste sa frekvencijom mm talasa [36]. Osim toga, može biti potreban poseban radio-frekvencijski lanac za svaku antenu sa mmVave sistemom [25]. Pored toga, zajedničko korišćenje analognog i digitalnog oblikovanja snopa u mmVave komunikaciji smanjilo bi sposobnost multipleksiranja za opsluživanje više korisnika istovremeno tokom istog vremena i frekvencije, a samim tim i smanjilo spektralnu efikasnost u poređenju sa punim digitalnim formiranjem snopa [36]. Stoga, da li će mmVave sa velikim antenskim nizovima biti implementiran sa potpuno digitalnim ili hibridnim formiranjem snopa ostaje otvoreno istraživačko pitanje [36]. NOMA tehnika se može kombinovati sa mmVave frekvencijama da bi se poboljšale brzine prenosa podataka, postigla istovremena višekorisnička komunikacija i smanjile smetnje [37]–[39]. Štaviše, komunikacija bespilotnih letelica može imati značajne koristi od mmVave frekvencije kako bi se obezbedile visoke brzine prenosa podataka za 6G mreže [40], [41]. MmVave se može koristiti za radarske aplikacije za obavljanje zajedničkih radarskih komunikacija, koje koriste visoku rezoluciju opsega signala postignutu velikim propusnim opsegom i radarskim funkcionalnostima.

3) Optička bežična komunikacija (OWC): Uprkos konceptu malih ćelija i novoj alokaciji spektra radio frekvencija, eksponencijalni rast mobilnog saobraćaja može dovesti do zagušenja u delu radio frekvencije elektromagnetnog spektra. Korišćenje OWC u infracrvenom i vidljivom spektru svetlosti (koji je oko 2600 puta veći od celokupnog RF spektra od 300 GHz), može to ublažiti i dopuniti tradicionalne RF komunikacije, posebno u gustim zatvorenim prostorima. Neke dalje prednosti OWC-a su kombinovano osvetljenje i komunikacija podataka, dostupnost gotovih optičkih uređaja, obezbeđivanje geofencinga i poboljšanja geolokacije, nedostatak prostiranja po više putanja, pozicioniranje na nivou cm u zatvorenim okruženjima, itd. Glavni izazovi uključuju, npr. blokada zbog prenosa svetlosti u blizini vidnog polja, ublažavanje smetnji kako bi se osiguralo

da UE može da postigne visok SINR, i razvoj OWC mreže i integracija u 6G. Laka komunikacija se može koristiti za povezivanje jezgrene mreže putem žičanih/optičkih vlakana i/ili bežičnog povezivanja, mreža kablovske televizije, optičkih mreža slobodnog prostora i vanzemaljskih mreža (npr. veze zasnovane na vazdušnim ili svemirskim vozilima), itd.

Osim THz komunikacije, sistemi optičke bežične komunikacije (OVC), koji uključuju infracrvene (IR), vidljive i ultraljubičaste frekventne opsege [42], smatraju se efikasnim načinom za istraživanje dostupnog elektromagnetnog spektra kako bi se obezbedilo više širokopojasnog povezivanja i pokrivenosti za 6G mreže [43]. Zbog dostupnosti izuzetno širokog opsega nelicenciranog i bezbednog spektra, OVC ima potencijal da prevaziđe izazove nedostatka spektra u bežičnim komunikacijama zasnovanim na RF [44]. Istraživanje tako ogromnog propusnog opsega u OVC-u bi podržalo širok spektar IoT povezivanja i aplikacija. Ove primene uključuju bolnice, velike tržne centre, stadione, kuće i kancelarije, stanice javnog prevoza, na primer, železničke stanice i aerodrome, industriju, podvodne komunikacije i svemirske komunikacije [43]. Upotreba OVC-a u telekomunikacijama može biti korisna jer obezbeđuje brze prenose podataka, ekonomičnu infrastrukturu, sigurnu komunikaciju i malu latenciju, stoga deluje kao komplementarna efikasna tehnika za postojeće bežične komunikacije zasnovane na RF radi ispunjavanja potencijalnih zahteva 6G mreža [45]. Na performanse OVC sistema mogu uticati buka ambijentalnog svetla [46], atmosferska turbulencija i gubitak putanje u spoljnim scenarijima [47] i greške u usmeravanju [48]. Nekoliko tehnologija je uključeno u OVC sisteme uključuju komunikaciju vidljivog svetla (VLC), vernost svetlosti (LiFi), optičku komunikaciju slobodnog prostora (FSO), LiDAR i komunikaciju optičkih kamera (OCC). Svaka od ovih komunikacionih tehnologija ima svoj jedinstveni princip rada (kao što je prenos, prijem, modulacija), prednosti i izazove.

Komunikacija sa vidljivim svetlom (VLC) je poseban oblik OVC koji koristi vidljivi deo spektra za bežični prenos informacija [49]. VLC je predstavljen kao ključna tehnologija koja obećava za 6G mreže zbog svoje sposobnosti da kombinuje osvetljenje i brzu bežičnu komunikaciju u jednom izvoru, odnosno, energetski efikasne svetleće diode (LED), i da dopuni postojeće RF mreže [49]. U VLC sistemima, LED diode se koriste na predajniku za prenos podataka velikom brzinom, gde se podaci bežično prenose korišćenjem tehnike modulacije intenziteta (IM). VLC koristi fotodiode (PD) ili laserske diode (LD) i tehniku direktne detekcije (DD), koja ima potencijal da konvertuje primljeni intenzitet svetlosti u koristan signal na prijemniku. Tehnike prostorne modulacije i multipleksiranja sa podelom talasne dužine (VDM) mogu biti korisne za poboljšanje preferencije VLC komunikacije. VLC je uključen u standard IEEE 802.15.7 [49].

VLC ima potencijal da obezbedi brzu brzinu prenosa podataka uz održavanje potrošnje energije. Pošto VLC koristi LED svetla, smatra se da je komunikaciona tehnika niske složenosti i isplativost u poređenju sa radio frekvencijskom komunikacijom. Pored toga, VLC je u stanju da postigne veću brzinu prenosa podataka sa manjom latencijom u poređenju sa konvencionalnim radio-frekventnim mrežama. Zahvaljujući svojstvu usmerenosti vidljive svetlosti, VLC komunikacija ima potencijal da obezbedi relativno pozicioniranje sa tačnošću ispod metra. Zbog

komunikacije kratkog dometa, VLC tehnika se smatra sigurnijom u poređenju sa konvencionalnom radio-frekventnom komunikacijom. VLC pruža visok imunitet protiv neovlašćenog prisluškivanja ili signala napada koji se emituju ili primaju izvan vidokruga. Osim toga, VLC se smatra obećavajućom tehnologijom za dopunu klasičnim tehnikama šifrovanja, koje bi se mogle primeniti za rešavanje ključnih bezbednosnih izazova u 6G mrežama. VLC nudi visok stepen imuniteta protiv smetnji elektromagnetnog zračenja [49].

VLC tehnologija ima potencijal da podrži različite IoT aplikacije za buduće 6G mreže, koje uključuju pametne zgrade, pametne kuće, pametne mreže, pametne gradove, pametne fabrike i pametan transport. Integrisanje VLC-a i IoT-a bi oslobodilo novi koncept pod nazivom Internet lakih stvari (IoLT) [50]. U IoLT-u, VLC se može smatrati jednim od ključnih izvora za snabdevanje i prenošenje bežične komunikacije, kao i za omogućavanje prikupljanja energije. VLC tehnologija se može primeniti u pametnoj unutrašnjoj mreži uključujući kućno/kancelarijsko okruženje. Dakle, VLC bi doneo i osvetljenje i bežičnu komunikaciju za kućna i kancelarijska okruženja, što bi omogućilo olakšanje opsega RF spektra. VLC se takođe može koristiti za prenos korisnih podataka u velikim tržnim centrima i supermarketima. VLC se može primeniti sa RF sistemom za formiranje hibridne RF/VLC bežične komunikacije, što bi omogućilo visoko energetski efikasnu komunikaciju i poboljšalo korisničko iskustvo. Konkretno, VLC se može fleksibilno integrisati sa trenutnim RF mrežama kako bi podržao visoku povezanost i pokrivenost. Na primer, VLC bi mogao da proširi pokrivenost RF signalima kako bi pokrio mrtve tačke, kao što su tuneli i podzemne železnice [51]. Moguća primena VLC-a na otvorenom mogla bi biti u komunikacijama vozilo-vozilo (V2V) i vozilo-infrastruktura (V2I), koje bi se mogle koristiti u rasterećenju saobraćaja, pružajući korisne informacije o radovima na putu i nesrećama. VLC ima potencijal da omogući komunikaciju pod vodom na većoj udaljenosti u poređenju sa RF elektromagnetnim talasima, za koje se smatra da se veoma apsorbuju u vodi.

Light-Fidelity (LiFi) je uveden kao ključna obećavajuća tehnologija za dopunu trenutno primenjene bežične mreže vernosti (ViFi) [52]–[54]. LiFi se smatra efikasnim proširenjem VLC tehnologije sa ciljem da se obezbedi sigurnija, dvosmerna, veća brzina prenosa podataka i da se realizuju potpuno povezane bežične mreže [52]–[54]. LiFi je deo optičke bežične komunikacije koji istražuje infracrveni i vidljivi spektar svetlosti. Ovo omogućava da se raspoloživi nelicencirani spektar u potpunosti iskoristi i obezbeđuje bežičnu komunikaciju podataka zajedno sa osvetljenjem. To je zato što potpuno korišćenje kombinacije infracrvene i vidljive svetlosne komunikacije može ponuditi oko 2600 puta veći spektar resursa od veličine trenutnog RF spektra. LiFi tehnologija koristi diode koje emituju svetlost (LED) za prenos simbola podataka u dovnlink-u, dok se fotodetektori (PD) koriste na prijemniku za prijem ovih simbola podataka. Rezultati eksperimenta pokazuju da je LiFi sposoban da obezbedi brzinu prenosa podataka do 3Gb/s iz mikrosvetla sa LED dioda sa jednom tačkom upotrebom modulacije optičkog ortogonalnog frekvencijskog multipleksiranja (DCO-OFDM) jednosmerne struje.

LiFi tehnologija ima potencijal da podrži dvosmernu višekorisničku komunikaciju, koja uključuje prenos od tačke do više tačaka i takođe od više tačaka do jedne tačke [52]. LiFi se takođe može efikasno integrisati sa trenutno raspoređenim RF bežičnim mrežama da bi se postigle

heterogene bežične mreže iz optičkih i RF domena [52]. LiFi ima mogućnost da podrži mobilnost korisnika i primopredaju [52]. Korišćenje LiFi tehnologije u bežičnoj mreži poznato je kao optička attoćelijska mreža, što može biti obećavajuća topologija za prevazilaženje nadolazeće krize spektra u trenutnim RF bežičnim mrežama.

Nedavno su eksperimentalni rezultati, pokazali da se LiFi koncept može efikasno koristiti sa ViFi mrežom. Rezultati su pokazali da korišćenje softverski definisanog umrežavanja sa LiFi tehnologijom omogućava značajno poboljšanje performansi ViFi mreže, koja se koristi za rasterećenje saobraćaja i balansiranje opterećenja. Rezultati su takođe pokazali da se korišćenjem LiFi tehnologije može postići poboljšanje gustine podataka za više od tri reda veličine. Sa ekonomske perspektive, LiFi se može smatrati isplativim rešenjem jer se lako može integrisati sa trenutnom RF mrežom i koristi istu postojeću infrastrukturu osvetljenja. U mreži zasnovanoj na LiFi, moguće je kombinovati optički difuzor sa LD izvorom da bi se istovremeno postiglo široko osvetljenje i bežični komunikacioni prenos [55]. S obzirom da LiFi tehnologija zavisi od LED osvetljenja, smatra se da je to sigurniji izvor komunikacije, koji se može bezbedno objediniti u kabinama aviona, nuklearnim i hemijskim postrojenjima, benzinskim pumpama, bolnicama, kao i u spoljašnjem okruženju, odnosno uličnim svetiljkama, vozilima, farovima i saobraćajnoj signalizaciji [56]. Ove ključne karakteristike i prednosti promovišu LiFi tehnologiju kao jednu od osnovnih tehnologija za buduće 6G mreže. LiFi je takođe uključen u IEEE 802.15.7 standard i očekuje se da će biti integrisan sa trenutno postojećim bežičnim standardima. Arhitektura primopredajnika integrisanih kola (ASIC) može se efikasno koristiti sa trenutnim pametnim mobilnim i nosivim uređajima za podršku potpuno povezanih IoT-a u 6G mrežama.

4) Teraherc (THz) komunikacija uključujući poluprovodničke tehnologije i nove materijale: Tehnologija koja omogućava komunikaciju u THz opsezima (0,1–10 THz, gde se 100–300 GHz takođe smatra gornjim opsegom mm talasa) takođe je zamišljena kao ključ za zadovoljavanje potreba za mnogo višim zahtevima za brzinu prenosa podataka, na primer, Tbps. THz radio uređaji će se razviti iz velikih faznih nizova u mmVave regionu, ali će se suočiti sa više prepreka u efikasnoj implementaciji zbog fizičkih ograničenja modernih poluprovodnika i tehnologija pakovanja. Novi materijali (kao što je grafen) mogu igrati ulogu kada postanu zreli za masovnu proizvodnju. Pre toga, rešenja će se oslanjati na nove RF arhitekture, kontinuirani razvoj antena, pakovanja i poluprovodničkih procesa u pažljivom balansu između performansi i cene. Ostali izazovi u ovoj oblasti uključuju npr. novi modeli THz kanala, novi talasni oblik i šeme modulacije, nove eksperimentalne platforme i testne platforme, novi MAC protokoli, modelovanje i ublažavanje nelinearnosti i faznog šuma, ADC/DAC-ovi za desetine Giga uzoraka/sec sa razumnom potrošnjom energije, šeme za formiranje snopa za ispunjavanje 6G zahteva u pogledu pokrivenosti, mobilnosti i robusnosti; efikasne realizacije MIMO antenskih nizova i lanaca prenosa/prijema, regulacija i standardizacija THz opsega, itd. Nove paradigme u smislu dizajna jednolančanih radija koji rade u više opsega istovremeno mogu pomoći u postizanju ciljeva performansi sistema. Hibridna optička obrada takođe može poboljšati efikasnost.

THz komunikacija je zamišljena kao ključna komponenta za 6G mreže zbog svoje sposobnosti da postigne ultra-velike brzine prenosa podataka (do 1 terabita po sekundi (Tbps)) i

podržava aplikacije koje intenzivno koriste propusni opseg [57] . THz komunikacija ima potencijal da ublaži oskudicu u spektru trenutnih bežičnih komunikacionih sistema. THz komunikacija istražuje odgovarajući opseg talasnih dužina između (0,03 mm-3 mm) [58]. Frekvencijski opseg THz se nalazi između mm Talasnog i infracrvenog (IR) opsega.

THz komunikacija ima potencijal da ponudi veći propusni opseg od frekvencije mmVave i obezbedi poboljšane uslove širenja u poređenju sa IR opsegom. Rad na višim frekventnim opsezima, koje obezbeđuju THz komunikacije, može se efikasno iskoristiti za podršku različitim aplikacijama daljinskog otkrivanja za 6G mrežu. Pored toga, THz komunikacije mogu efikasno da podrže tradicionalne makro-razmere i buduće nove aplikacije mikro-razmera, koje uključuju Internet nanostvari (IoNT) i internet bionanostvari (IoBT). Nedavno je Federalna komisija za komunikacije (FCC) razmotrila da se frekvencije spektra između 95 GHz i 3 THz koriste za buduća istraživanja 6G. THz frekvencija je razmatrana u IEEE standardima (IEEE 802.15 IG-THz i IEEE 802.15.3d-2017) za komunikacije kratkog dometa. THz se može koristiti za omogućavanje holografske teleportacije, koja zahteva brzinu prenosa podataka od približno 5 Tbps i latenciju u mikrosekundnom opsegu manju od 1 ms. Komunikacija na frekvencijama THz bi zahtevala upotrebu sićušnih ćelija gde bi radijus takvih ćelija mogao biti nekoliko desetina metara. Pored toga, zbog veće frekvencije nosioca i kraće talasne dužine, THz komunikacija bi mogla da koristi ultra masivne antenske nizove kako bi omogućila efikasno formiranje snopa. Zbog toga se stotine uskih zraka mogu generisati ultramasivnim antenskim nizovima, koji su efikasni u povećanju jačine signala, poboljšanju brzine prenosa podataka i smanjenju smetnji. Iako je potpuno digitalno oblikovanje snopa i dalje trajno i optimalan izbor, hibridno ili analogno formiranje snopa može se koristiti sa THz i ultramasivnim antenskim nizovima komunikacije u 6G mrežama. THz se takođe može integrisati sa drugim bežičnim komunikacionim sistemima da bi se formirale fleksibilne hibridne mreže. Na primer, hibrid između THz i optičkog sistema slobodnog prostora i hibrid između THz i VLC sistema mogu se koristiti u budućim 6G mrežama za postizanje robusnih komunikacionih rešenja. Štaviše, THz se može koristiti sa IRS-ovima za obezbeđivanje NLOS propagacije i poboljšanje pokrivenosti komunikacije. THz frekvencije se takođe mogu istražiti u aplikacijama u zdravstvu kao što su teraherc pulsno snimanje u dermatologiji, farmaceutskoj industriji i druge nove kognitivne i sensing IoT komunikacije, koje bi mogle da se iskoriste automatizovanim mašinama i autonomnim vozilima. Tehnika prostorne modulacije se može koristiti sa THz komunikacijom da bi se postigli dovoljni prostorni stepeni slobode za prostorno multipleksiranje. THz komunikacije se mogu koristiti u D2D komunikacijama, drona i vozila, kao i alternativa povezivanju žične kičme u centrima podataka [59]-[61].

5) Masivni i ultramasivni MIMO: Koncept mMIMO je uveden i proučavan u kontekstu 5G. Posebno za veće frekvencije, zbog kraće talasne dužine, veliki broj antena se može spakovati na malom prostoru, što dovodi do koncepta mMIMO i ultra mMIMO, kao i mMIMO dvostruko na baznoj stanici i UE. Drugi način da se poboljša bežična komunikacija je promena karakteristika propagacije bežičnih kanala, na primer, preko inteligentnih reflektujućih površina (IRS) ili velikih inteligentnih površina (LIS). Trenutni pristup usredsređen na ćeliju/mrežu može se promeniti u onaj koji je usredsređen na korisnika gde se klaster koji opslužuje određeno UE može dinamički

odrediti izborom podskupa AP-ova u blizini. Njegova kombinacija sa distribuiranim mMIMO operacijama dovodi do takozvanog mMIMO-a bez ćelija. U ovom konceptu, svi AP su u mogućnosti da kooperativno opslužuju UE bez ikakvih ograničenja ćelije, uz mogućnost koherentnog prenosa i prijema, a mogu se ponuditi gotovo uniformne usluge širom mreže. Da bismo efikasno realizovali distribuirani MIMO, moramo da se pozabavimo upravljanjem snopom, praktičnim pristupima nekoherentnom radu u višim opsezima i potpuno digitalno upravljanje snopom. Trošak treba proceniti uzimajući u obzir i mMIMO i transport kao E2E rešenja. Drugi raspored sa mnogo antena raspoređenih na velikoj površini, odnosno fasadi zgrade, dovodi do koncepta izuzetno velikog mMIMO. Ipak, ostaju mnogi izazovi, kao što je modelovanje kanala; napajanje i kontrola svakog antenskog elementa; procena u realnom vremenu i povratna informacija velikog broja elemenata kanala; sinhronizacija; zakazivanje veoma velikog broja terminala; arhitektura i funkcionalne opcije podele; integrisani pristup, backhaul i fronthaul u mrežnim konfiguracijama; orijentisano na korisnika, dinamičko i skalabilno klasterovanje pristupnih tačaka i balansiranje opterećenja; distribuirano prostorno-vremensko-frekventno kodiranje da bi se iskoristili svi različiti izvori; FDD operacija; i podršku mobilnosti [62].

Vredi napomenuti da se SDMA, može smatrati tehnikom neortogonalnog prostornog multipleksiranja jer prostorno multipleksira prenete podatke u prostornom domenu, tj. u domenu snage. SDMA koristi linearno prethodno kodovanje za prostorno odvajanje korisnika u domenu snage. Masivni MIMO sistem se smatra proširenom verzijom SDMA. Masivni MIMO sistem se može koristiti za ublažavanje smetnji. Međutim, upravljanje smetnjama korišćenjem masovne MIMO tehnologije može biti nedovoljno zbog izuzetno ograničene prostorne rezolucije velikih antenskih nizova, što bi moglo da se desi kada je niz za prenos daleko od korisnika [62].

6) Talasni oblik, višestruki pristup i full-duplex dizajn: CP-OFDM (OFDM ciklični prefiks) talasni oblik je usvojen u xDSL, Vi-Fi, 4G i 5G. Potrebna je stroga sinhronizacija da bi CP-OFDM održao ortogonalnost. Drugi talasni oblici, na primer, grupa filtara sa više nosilaca, univerzalno filtrirani više nosilaca ili generalizovano multipleksiranje sa frekvencijskom podelom, predloženi su za različite scenarije primene. U scenarijima visoke mobilnosti sa velikim doplerovim širinama, takođe je uvedena ortogonalna vremenska frekvencijska prostorna modulacija. Komplementarno, ublažavanje ograničenja ortogonalnosti može dovesti do efikasnije i fleksibilnije upotrebe bežičnog kanala. Na primer, neortogonalni višestruki pristup (NOMA) ili višestruki pristup sa podelom brzine (RSMA) mogu rezultovati većim dostižnim stopama i obezbediti sredstva za pristup bez odobrenja. Osim toga, dizajn talasnog oblika može se proširiti na radarski domen kako bi ponudio potencijal za kombinovane radarske i komunikacione mogućnosti. Štaviše, napredne tehnike samosmetnji i poništavanja interferencije unakrsne veze mogu potencijalno da udvostruče spektralnu efikasnost i omoguće primopredajnike punog dupleksa unutar opsega koji nude širok spektar prednosti, na primer, za relejnu i dvosmernu komunikaciju. Za smanjenje negativnog uticaja hardverskih ograničenja prisutnih na frekvencijama THz, kao što su niska vršna izlazna snaga, jaka nelinearna distorzija i visoki fazni šum, potrebni su talasni oblici prilagođeni hardveru sa optimizovanim parametrima, na primer, koji imaju niske fluktuacije omotača.

Nekoliko tehnologija ortogonalnog višestrukog pristupa (OMA) korišćeno je u mnogim praktičnim sistemima, uključujući višestruki pristup sa podelom frekvencije (FDMA), koji se koristio u 1G, višestruki pristup sa vremenskom podelom (TDMA), koji je usvojen u 2G, višestruki pristup sa kodnom podelom pristup (CDMA), koji je korišćen u 3G, i višestruki pristup sa ortogonalnom frekvencijskom podelom (OFDM), koji se trenutno koristi u DL 4G i 5G NR mrežama [63]. Među gore navedenim tehnikama, OFDM je bila dominantna tehnika modulacije za komunikacije sa više nosilaca i dobila je značajnu pažnju istraživanja. Ovo je zbog njegove sposobnosti da obezbedi imunitet protiv frekventno selektivnog bleđenja, smetnji na kokanalnom nivou i impulsnog šuma [63]. OFDM modulacioni prenos ima nekoliko prednosti kao što su (a) omogućavanje upotrebe adaptivnih modulacionih šema za povećanje brzine prenosa podataka; (b) poboljšanje efikasnosti spektra, odnosno efikasno korišćenje raspoloživog propusnog opsega, tj. efikasna podela raspoloživog spektra između korisnika; (c) obezbeđivanje imuniteta protiv intersimbolskih smetnji (ISI); i (d) podržavanje širenja kašnjenja sa više putanja [63]. Ove ključne prednosti omogućavaju da se OFDM koristi u nekoliko standarda žičanih i bežičnih komunikacija, kao i da se koristi u 5G NR mrežama, iako je nekoliko radova na razvoju i standardizaciji još u toku. Vredi napomenuti da 5G NR mreže podržavaju OFDM sa više nosilaca u DL i OFDM sa jednim nosiocem u UL prenosu.

Uprkos atraktivnosti tehnike OFDM prenosa u povećanju brzine prenosa podataka, ona do danas "pati" od visokog odnosa vršne i prosečne snage (PAPR) [63]. Ovo rezultuje neželjenim unutarpojasnim izobličenjem i neželjenim vanpojasnim (OOB) zračenjem zbog nelinearnosti pojačala snage (PA). Dakle, da bi se garantovalo linearno pojačanje ulaznog signala, PA treba da radi na poleđini od svoje tačke zasićenja, i na taj način postaje manje efikasan kako se back-off povećava. Ovo može imati direktan uticaj na trajanje baterije mobilnih telefona i aplikacije osetljive na energiju. Zbog toga su potrebne napredne tehnike višestrukog pristupa.

Nekoliko alternativnih tehnika prenosa sa više nosilaca, koje rešavaju neke od nedostataka OFDM-a, predložene su kao novi kandidati za sledeću generaciju mobilnih komunikacija. Na primer, filter banke sa više nosilaca (FBMC) sa ofset kvadraturnom amplitudnom modulacijom (OKAM) mogu da obezbede veću brzinu podataka i smanje neželjeno OOB zračenje koje se suočava sa OFDM tehnikom. U FBMC prenosu, nesusedni podnosioci su dobro razdvojeni upotrebom grupe dobro dizajniranih filtera. FBMC može biti dobro dizajniran da smanji uskopojasne smetnje i neželjene bočne opsege. Međutim, dužina impulsnog odziva filtera u FBMC treba da se poveća za najmanje četiri puta simbole za prenos. Ovo ograničenje dizajna može učiniti da se FBMC tehnika ne može primeniti na aplikacije osetljive na kašnjenje, pri čemu visoka spektralna efikasnost zahteva da se postigne kratkim brzim prenosima. Zbog toga se fokus pomerio na univerzalni filtrirani višenosač (UFMC), gde se grupa od nekoliko podnosaca filtrira zajedno umesto filtriranja po podnosoču sa većom dužinom korišćenjem u FBMC. Stoga, primenom operacije filtriranja na grupu uzastopnih podnosača u UFMC tehnici, dužina impulsnog odziva filtera može biti smanjena uz istovremeno smanjenje neželjenog vanpojasnog zračenja. Međutim, UFMC tehnika uključuje potrebu za umetanjem cikličkog prefiksa (CP), što je obično potrebno u većini talasnih oblika sa više nosilaca, što čini UFMC tehniku ranjivijom na vremensko

neusklađenost u poređenju sa većinom tehnika zasnovanih na CP. Takođe, UFMC je podložan ISI sa umereno velikim rasponima kašnjenja. Filtrirani-OFDM (f-OFDM) je takođe predstavljen kao novi talasni oblik za buduće bežične sisteme da bi se prevazišla ograničenja UFMC tehnike. Za razliku od UFMC, tehnika filtriranog OFDM dozvoljava da se dužina filtera menja i čak premaši CP dužinu u konvencionalnim tehnikama zasnovanim na CP da bi se postigao bolji balans između vremenske i frekvencijske lokalizacije. Međutim, povećanje CP dužine nije nužno izvodljivo rešenje za aplikacije sa malim kašnjenjem u budućim komunikacionim mrežama. Fleksibilnija tehnika modulacije, nazvana generalizovano multipleksiranje sa frekvencijskom podelom (GFDM), kao talasni oblik kandidata za buduće bežične komunikacije. GFDM tehnika koristi prednosti i OFDM i frekvencije sa jednom nosećom frekvencijom. U GFDM tehnici, podnosioci se filtriraju i kombinuju u blokove i svaki blok se modeluje nezavisno. Međutim, takav pristup filtriranju i kombinovanju može dovesti do neortogonalnih podnosaca, što može dovesti do povećanja interferencije među nosiocima i ISI. Zbog toga su potrebne efikasne tehnike prijema sa tehnikama zasnovanim na GFDM-u kako bi se ublažili ISI i ICI. Iako bi korišćenje takvih tehnika poništavanja smetnji moglo biti korisno za postizanje razumnih performansi, ovo dolazi na račun povećanja složenosti računara. Vredi napomenuti da se FBMC i GFDM smatraju tehnikama modulacije za oblikovanje impulsa, dok se UFMC i f-OFDM smatraju šemama za filtriranje podpojasa. Nedavno je predložena dvodimenzionalna modulaciona šema, koja je generalizacija i CDMA i OFDM, nazvana ortogonalni vremensko-frekventni prostor (OTFS) za podršku prenosa velikih brzina, visokih frekvencija i velikih antenskih nizova. OTFS modulacija ima mogućnost da prikrije vremenski promenljivi višeputni bežični kanal u vremenski nezavisan kanal, što omogućava da svaki emitovani simbol doživi skoro konstantno pojačanje kanala. Rezultati pokazuju da OTFS modulacija može da obezbedi veće dobitke u diverzitetu tokom vremena i frekvencije u poređenju sa konvencionalnom OFDM modulacionom šemom. Takvi ukupni simboli konstantnog pojačanja kanala bi omogućili smanjenje troškova i složenosti sistema. Analogni tipovi modulacija takođe mogu biti mogući za buduće 6G mreže. Vredi napomenuti da su tipični ključni indikatori performansi koji su korišćeni u proceni performansi gore pomenutih tehnika prenosa PARP, složenost dizajna, dužina filtera, spektralna gustina snage (PSD), brzina greške u bitovima (BER), spektralna efikasnost (SE) i kašnjenje [64]-[66].

7) Poboljšano kodovanje i modulacija: Kodovanje kanala ima za cilj ispravljanje grešaka u prenosu i stoga je ključno za osiguranje „pouzdanosti“. Međutim, to je jedan od najsloženijih blokova za obradu osnovnog pojasa. Savremene šeme kodovanja kanala kao što su Turbo, LDPC i Polar kodovi sa odličnim performansama ušli su u nekoliko komunikacionih standarda, uključujući 2G, 3G, 4G i 5G. Na primer, 5G podržava protok do 20 Gbps i pouzdanost do 1-10-5. Budućnost 6G KPI i slučajevi upotrebe postavljaju nove zahteve u vezi sa dizajnom kodeka, tako da je potrebno istraživanje o naprednim šemama kodovanja i modulacije kanala blizu Šenonove granice, sa ciljem izuzetno velike propusnosti, izuzetno visoke pouzdanosti, veoma niske potrošnje energije i niske latencije kodovanja/dekodovanja.

Korišćenje antenskih nizova izuzetno velikih razmera, koje su veoma potrebne 6G mrežama za povećanje brzine prenosa podataka, moglo bi predstavljati neke tehničke izazove

vezane za složenost implantacije, korišćenje skupih višestrukih radio-frekventnih lanaca i povećanje potrošnje energije [67]. Sa velikim antenskim nizovima, svaki element antene zahteva kompletan radio-frekventni lanac za proizvodnju digitalne modulacije. Ovo implicira da bi veliki broj potpuno aktivnih antena mogao imati velike faktore oblika koji zahtevaju skupe komponente da bi se garantovao efikasan prenos. Pored toga, verovatno je da će veći deo potrošnje energije dolaziti od RF pojačivača snage i povezane obrade signala osnovnog opsega [68], [69], pa bi to moglo da smanji energetsku efikasnost 6G mreža. Stoga je mehanizam kodovane modulacije niske složenosti, poznat kao prostorna modulacija, predložen kao efikasan modulacioni prenos da bi se ispunili zahtevi energetske efikasnosti bežičnih komunikacija sledeće generacije. Paradigma dizajna prostorne modulacije ima za cilj da smanji troškove i složenost antenskih prenosa velikih razmera uz održavanje izvodljive brzine prenosa podataka i performansi sistema od kraja do kraja. Osnovni princip prostorne modulacije je mapiranje bloka informacionih bitova na predajniku u dve jedinice: 1) informacioni simbol, koji se bira iz konstelacionog dijagrama, i 2) informacija preko kanala, koja se bira iz skupa indeksa koji se odnose na jedinstvene predajne antene [70], [71]. Ovo bi omogućilo da se prostorni položaj svake signalne antene na predajniku u antenskom nizu iskoristi kao dodatna dimenzija za slanje informacija [70].

Prenos prostorne modulacije predstavlja priliku da se koristi jeftina RF struktura sa jednim nosiocem sa detekcijom jednog toka male složenosti. Ovo bi takođe omogućilo da signali za prenos budu otporniji na RF hardverska oštećenja, kao što su fazni šum i inter-kanalna interferencija (ICI), do kojih može doći usled slanja superponiranja nezavisnih informacija [67], [70]. Pored toga, prostorna modulacija ima koristi od implementacije RF sa jednim nosiocem kako bi se ublažila disipacija snage pojačavača snage. Štaviše, prostorna modulacija ima potencijal da smanji potrošnju RF energije zahvaljujući inherentnom pojačanju multipleksiranja koje se može postići dijagramom prostorne konstelacije [71].

8) Integrisano pozicioniranje, sensing i komunikacija: Svest o kontekstu je od suštinskog značaja za mnoge postojeće i nove aplikacije koje zahtevaju integraciju mogućnosti pozicioniranja, detekcije i komunikacije. Svest o lokaciji visoke preciznosti identifikovana je kao ključni faktor za mnoge aplikacije, uključujući autonomne automobile, fabrike budućnosti, pametne gradove, virtuelnu/proširenu stvarnost i javnu bezbednost (npr. V2X otkrivanje ranjenih učesnika u saobraćaju). Integrisano pozicioniranje, senzing i komunikacija će omogućiti pametno upravljanje mrežom za poboljšanu spektralnu i energetsku efikasnost, kao i smanjenje kašnjenja. Budući bežični sistemi koji rade na višim frekvencijama, sa većim propusnim opsegom, više antena, gustom mrežom i D2D vezama, i moguće namenskom infrastrukturom, olakšaće radio pozicioniranje sa preciznošću na nivou cm. Ali kako dizajnirati takav sistem? Kako se pozicioniranje može iskoristiti za bolju efikasnost komunikacije? Radar je možda u stanju da oseti okolinu, prepozna ljudske gestove i oseti različite materijale, pružajući isplative alternative postojećim tehnologijama, ali kako bi radar i komunikacija trebalo da se spoje u 6G? Ova oblast je veoma perspektivna za bolje društvo, ali od danas ni malo zrela. Potrebno je rešiti značajne istraživačke izazove pre nego što se senzori standardizuju u 6G infrastrukturi i mrežama, uključujući dizajn talasnog oblika, upravljanje smetnjama (npr. samoometanje/puni dupleks),

deljenje spektralnih resursa, ponovnu upotrebu hardvera, deljenje vremena između pozicioniranja i komunikacija, garancije performansi u pasivnom režimu, ograničenja teorije informacija i teorije procene, korišćenje AI/ML i tehnika računarstva na ivici, cena i energetska efikasnost [3].

9) Nasumični pristup za masivne veze: 5G već može da podrži mMTC sa velikim brojem povezanih uređaja. U budućim mrežama, međutim, milioni uređaja će biti povezani i za mnoge od njih će se generisati samo vrlo sporadični podaci. Kako koordinirati takvu mrežu bez trošenja čitavog mrežnog resursa i energije čvora treba pažljivo istražiti. Štaviše, pristupni protokoli čija je pouzdanost zasnovana na ponovnim prenosima predstavljali bi ozbiljne izazove jer broj uređaja postaje veoma veliki. Stoga, pristupi bez grantova u kojima uređaji emituju svoje (obično kratke) pakete bez ikakvog pregovaranja o resursima sa baznim stanicama, eventualno ograničavajući ili izbegavajući retransmisije, izgledaju obećavajuće. Komplementarno, uređaji koji su svuda ugrađeni bi morali da budu napajani nekim oblikom prikupljanja energije i da rade na energetski efikasnim protokolima [3].

10) Bežično keširanje na ivici: video strimovanje na zahtev i pretraživanje Interneta karakteriše asinhrona ponovna upotreba sadržaja; visoko predvidljiva distribucija potražnje; tolerantno na kašnjenje i promenljiv kvalitet. Za takve aplikacije, trenutni mobilni sistemi često imaju neke probleme, na primer, bežični kapacitet makro ćelija nije dovoljan i/ili žičani backhaul do malih ćelija je slab ili skup. U takvim slučajevima, bežično keširanje ivica pruža efikasno rešenje. Keširanje može smanjiti opterećenje mreže i smetnje, a samim tim i povećati spektralnu i energetsku efikasnost i smanjiti kašnjenje u komunikaciji. Ali keširanje se obično implementira u jezgru mreže, pa treba proučiti kako ga efikasno implementirati za bežičnu vezu (npr. kombinovanje sa višekorisničkim MIMO šemama fizičkog sloja) [3].

Pored toga, 6G radio tehnologije treba pažljivo istražiti da bi se nosile sa budućim uslugama emitovanja/višestrukog prenosa, koje bi se za razliku od 5G mogle uzeti u obzir od prvog izdanja, kako bi se omogućila isplativa i skalabilna platforma za masovnu isporuku sadržaja za TV aparate, povezane automobile, pametne telefone, tablete i nosive uređaje. 6G predstavlja sjajnu priliku za konvergenciju mobilnih širokopojasnih i tradicionalnih mreža za emitovanje. U Evropi, opseg 470-694 MHz se koristi za pružanje usluga zemaljskog emitovanja najmanje do 2030. godine, što je vremenski okvir koji je dobro usklađen sa prvim izdanjem 6G. Naročito, 6G širokopojasno emitovanje, koje bi trebalo da podrži infrastrukturu od niske snage niskog tornja do visoke snage visokog tornja, može smanjiti snagu odašiljanja za oko 90% i doprineti inicijativi zelenog dogovora uz zadržavanje kapaciteta koji obezbeđuje postojeća digitalna zemaljska mreža televizijski sistemi.

2.13. Sigurnost optičke mreže i usluga

6G će otvoriti novu eru u kojoj će milijarde uređaja, ljudi, povezanih vozila, robota i dronova generisati digitalne informacije u obimu ZB-a. Osnova ove ere biće pametna optička transportna povezanost, koja će biti uvek dostupna, ekološki prihvatljiva i fleksibilno skalabilna.

Obezbeđivanje potrebnih performansi, otpornosti i nivoa bezbednosti, uz ispunjavanje zahteva za troškovima, energetskom efikasnošću i tehnološkim ograničenjima, predstavlja ogroman istraživački izazov za narednu deceniju. 6G će se nastaviti oslanjati na napredak u optičkoj infrastrukturi kroz povećanje kapaciteta, smanjenje kašnjenja, unapređenu programabilnost i rekonfiguraciju, veću ekološku održivost i značajno smanjenje potrošnje energije [3].

Potrebni su razorni pristupi da bi se približili Šenonovim granicama i dalje pomerili Murove granice. Sve dimenzije u prostoru i frekvenciji su potrebne da se eksploatišu, otvarajući nove optičke opsege talasnih dužina i multipleksiranje svemirske podele. To će dovesti do razvoja nove paketne/optičke komutacione arhitekture. Ovo uključuje studiju o hibridnoj upotrebi elektronskog i optičkog prebacivanja, kao i studije o skalabilnosti garantovanja determinističkih QoS performansi od kraja do kraja za veliki broj tokova/aplikacija. Inherentno niska potrošnja energije optike može se direktno koristiti za smanjenje ukupne potrošnje energije, ako optičke funkcije zamene elektroniku sa većom potrošnjom energije.

Čvršća integracija između optičkih i bežičnih tehnologija i konvergentne mrežne infrastrukture će podstaći usvajanje zajedničke platforme za prenos i komutaciju koja podržava različite granularnosti komutacije koje se kreću od paketa do vremenskog intervala i nivoa kanala talasne dužine. Pored toga, napredak u fotonskoj integraciji otvoriće put za niz novih IT i mrežnih uređaja u kojima se optičke, RF i digitalne elektronske funkcije mogu kombinovati, na primer, u modulima sa više čipova (MCM) koji se sastoje od visoko integrisanih CMOS matrica. Trebalo bi istražiti potencijal da se novi materijali pojave u ovom domenu komponenti.

Sva ova tehnološka dostignuća u optičkim mrežama, uključujući povećanu programabilnost i daljinsko konfigurisanje na nivou uređaja, takođe zahtevaju napredak u kontroli mreže, automatizaciji i autonomiji. Međutim, pametno povezivanje zahteva dodatna rešenja i inovacije za automatizaciju optičkih mreža izvan jednostavnog programiranja do zaista samovozećih mreža. Štaviše, složenost osnovne optičke tehnologije, koja rezultuje velikim brojem međusobno zavisnih konfiguracionih parametara, zahteva kognitivne mreže koje se napajaju strimovanjem telemetrije, mrežnim merenjima u realnom vremenu, AI i ML. Hakovanje i špijunaža, ali i prirodne katastrofe, terorizam ili sabotaže ugrožavaju našu kritičnu infrastrukturu. Stoga, dizajn optičke mrežne opreme treba da koristi savremene paradigme bezbednosti i pouzdanosti (sigurnost po dizajnu) i primeni modernu softversku tehnologiju.

Još jedan relevantan aspekt za optičku tehnologiju biće definisanje rešenja koja pronalaze pravi balans između visoke programabilnosti i ekstremnih performansi (npr. velikog propusnog opsega i kašnjenja) sa jedne strane, sa niskim troškovima sa druge strane. Možda samo smanjenje tradicionalne optičke opreme neće omogućiti postizanje odgovarajućeg ciljanog troška koji je potreban za 6G, posebno u oblastima radio pristupa koje karakteriše visok nivo gustine opreme. Nova tehnologija kao što je integrisana silicijumska fotonika mogla bi biti relevantno rešenje za rešavanje takvih izazova.

Rešenja za sajber bezbednost zavise od prirode ciljnog sistema. Kao neposredna posledica, sajber bezbednost mora da se razvija i kao sistem. Dok je 6G zamišljen kao visoko distribuirana arhitektura računarstva i povezivanja, softverizacija i automatizacija kritičnih funkcija upravljanja

(putem, na primer, inteligentne distribuirane kontrole zasnovane na AI/ML-u i orkestracije usluga) stvaraju površinu napada daleko širu i složeniju nego u trenutnom 5G domenu. Sistem nije samo ranjiv na direktne napade na sajber bezbednost, već i loše ponašanje automatizovanih funkcionalnosti, čija je identifikacija neophodna kao i činjenica da njihov uticaj treba minimizovati. Garantovanje pouzdanosti i pouzdanosti sistema biće jedan od glavnih izazova. Rešenja kao što su mikro-segmentacija i presecanje bez dodira moraju biti zagarantovana, a distribuirane AI/ML funkcije i modeli moraju biti ojačani da bi se izbegli kvarovi i sajber napadi i garantovali njihovu pouzdanost i sigurnost (npr. da bi se izbeglo trovanje modela i napadi zaključivanja članstva u distribuiranim arhitekturama sa federalnim učenjem). Glavni faktori koji utiču na pravce istraživanja u kontekstu mreža i usluga ka 6G uključuju dinamičke promene sa neviđenom distribucijom vremena i prostora (neuspeh statičkog i perimetrijskog pristupa), uvođenje dubokih tehnologija (što podrazumeva novu površinu napada), kao i promene u (potencijalno) kritične upotrebe i očekivanja [3].

Osim klasičnih pristupa, bezbednost u 6G sistemima će istražiti strategije koje ometaju kao što su:

1) Virtuelizacija, od osnovnih funkcija do virtuelnih parametara od kraja do kraja pomoću rezova;

2) Softverizacija, čineći pametno korišćenje fleksibilnosti i programiranja;

3) Koncepti kao što su obmana ili odbrana pokretne mete.

4) Holistički pristupi koji obuhvataju ceo životni ciklus, od razvoja originalnih komponenti/koda do uvođenja tehnologija (npr. AI Kuantum).

5) Oblačenje: isporuka bezbednosti „kao usluge“, definisanje/upravljanje atributima usluge za SNS. Integrisan u opštu paradigmu zasnovanu na uslugama.

Kvantifikacija bezbednosti u 6G kontekstu treba da se bavi složenošću i fragmentacijom i zahtevima istraživanja mehanizama za identifikaciju, procenu, sertifikaciju i praćenje nivoa bezbednosti. Na osnovu takve kvantifikacije, poverenje se može dati provajderima i uslugama koje omogućavaju rast sektora tako što će se odgovoriti na raznolikost potražnje od masovnog tržišta do specifičnih B2B vertikala.

Uprkos sličnostima sa drugim digitalnim uslugama, neka pitanja vezana za podatke ili zelena pitanja ostaju poseban izazov za buduće 6G sisteme. Kao takva, privatnost usmerena na čoveka, relevantna verodostojna veštačka inteligencija ili jednostavno orkestrirane operacije između strana ili uticaj i održivost rešenja biće ključni za oblikovanje prihvatljive digitalne budućnosti.

Istraživanje bezbednosnih rešenja takođe treba da uzme u obzir performanse, lakoću upravljanja i potrošnju energije, kada cilja da garantuje bezbednost i pouzdanost 6G telekomunikacija i platformi za usluge ili aplikacije.

Brojni sajber napadi u obliku prisluškivanja, lažnog predstavljanja, vađenja ključeva, ometanja, uspešno su ometali primenu ćelijskog i širokog interneta stvari. Napadi povezani sa lozinkom i dalje preovlađuju na IoT uređajima zbog slabih lozinki koje je postavio proizvođač i loših korisničkih praksi. Nedavni izveštaji o pejzažu IoT napada ukazuju na to da napadači obično

koriste botnete za sprovođenje distribuiranih napada uskraćivanja usluge (DDoS) ili koriste malver koji se širi mrežom. Glavne teme kao što su upravljanje ključem i autentifikacija i dalje igraju centralnu ulogu u tekućim istraživanjima [72], [73].

Data je kategorizacija najrasprostranjenijih napada na ćelijski/široki IoT na osnovu njihove ulazne tačke. Zlonamerni entiteti a) ili koriste fizička sredstva za kompromitovanje uređaja ili posrednih prolaza i servisa, b) napadaju aplikacije višeg sloja na IoT uređaju, ili c) napadaju samu mrežu kao što je prikazano na Slici 2.13.1. Poslednji tip napada je veliki problem koji napreduje kako se mreža uređaja povećava; napadi se sada mogu širiti sa jednog uređaja na drugi i na kraju imati razorniji efekat na IoT infrastrukturu.

1) Fizički napadi: Fizička bezbednost je neophodan uslov za bezbednost IoT uređaja. Bilo koji sofisticirani kriptografski algoritam neće uticati na to da li se uređaj može jednostavno isključiti ili manipulisati. Fizički tipovi napada ili ciljaju okruženje da proizvedu zlonamerna očitavanja senzora i izazivaju lažne uzbune, ciljaju na hardver/softver IoT uređaja pod pretpostavkom da napadač ima fizički pristup uređaju, ili ciljaju gatevai koji povezuje IoT uređaj na ostatak mreže. Takvi napadi uključuju krađu kriptografskih ključeva iz nepromenljive memorije uređaja i ubrizgavanje lažnih senzorskih signala koji zbunjuju kontrolnu logiku sistema. Napadač bi takođe mogao fizički da cilja gatevai, kako bi blokirao komunikacione signale između IoT uređaja i backhaul mreže. Napadi ometanja su jedan od najozbiljnijih problema za IoT bezbednost jer napadači mogu da prenose radio signale u blizini uređaja sa dovoljno snage koja prekida radio komunikaciju. Jeftina ploča mikrokontrolera poput Arduino ploče sa radio modulom može se koristiti za izvođenje napada ometanja. Glavni cilj napadača je da prenese širokopojasni signal sa većim SNR-om od korisnika. Napadi iscrpljenosti baterije i napadi isključenja u LoRaVAN-u su druge vrste napada sa fizičkim ispoljavanjem [74-76].

2) Softverski napadi: Softverski napadi na bilo koji uređaj, ne samo na ćelijski/široki IoT, počinju od operativnog sistema. Ako napadač uspe da zaobiđe operativni sistem, može pristupiti delovima sistema datoteka koji su privatni ili može da izvrši nepouzdani kod. Prekoračenje bafera i injekcije jezika strukturiranih upita (SKL) su neke uobičajene eksploatacije koje dovode do izvršenja zlonamernog koda i kršenja privatnosti [77]. Vredi napomenuti da neki IoT uređaji ne mogu čak ni da podržavaju operativni sistem zbog svoje veličine i ograničenja memorije.

U istoj kategoriji imamo zlonamerni softver koji može da dovede do pristupa, kopiranja ili izmene informacija, i backdoor trojance koji se mogu umetnuti kako bi stalno curili podaci [78]. Napadi zasnovani na lozinki čine približno 15% pretnji Interneta stvari, loša korisnička praksa koja onemogućava jake lozinke i korišćenje slabih lozinki koje je postavio proizvođač u velikoj meri doprinose nesigurnosti IoT uređaja.

Kako prelazimo na decentralizovanije mrežne implementacije (npr. 5G), softver nije samo u srži IoT uređaja, već iu srži mrežne infrastrukture. Istovremeno, bezbednosne provere da su ranije tehnologije korišćene na centralizovanom nivou više nisu moguće. Da bi se povećala fleksibilnost, mreže su postale programabilne i virtuelizovane u softveru. Ovo povećava potencijalne pretnje na samom nivou mreže, pošto je testiranje softvera neodlučiv problem i uvek će postojati rupe koje odlučni napadač može da iskoristi. Iako se resursi smatraju izolovanim u

isečenim mrežama, postoji zabrinutost da se izolovanim mrežnim participama i dalje može pristupiti na hardverskom nivou.

Na putu ka 6G IoT sistemima, funkcije zasnovane na veštačkoj inteligenciji mogu se primeniti na distribuiranim ivičnim čvorovima. Na tom frontu, ivična inteligencija može da se suoči sa bezbednosnim napadima, kao što su ubrizgavanje zlonamernih podataka, trovanje podataka ili lažiranje koji utiču na izlazne rezultate obuke neuronskih mreža.

3) Mrežni napadi: Tehnologije kao što su LoRaVAN, Sigfok i NB-IoT imaju nekoliko šema za autentifikaciju i šifrovanje podataka za zaštitu podataka između IoT uređaja i mrežnog prolaza. Međutim, nedavne publikacije otkrivaju da su implementacije IoT-a na širem području i dalje podložne napadima lažnog predstavljanja i dostupnosti. Jedan primer je napad ponovne reprodukcije, gde zlonamerni entitet hvata i skladišti duplikat pravog mrežnog paketa koji se koristi za autentifikaciju legitimnog korisnika, a zatim u kasnijem trenutku, napadač „ponovno reprodukuje“ ovaj mrežni paket sistemu u cilju dobijanja usluga koje su dostupne samo autentifikovanim korisnicima. Da bi izvršio ovaj napad u bežičnim mrežama, zlonamerni entitet bi trebalo da zna komunikacijske frekvencije i kanale za pronalaženje podataka iz prenosa između uređaja. Napadi rutiranja na mreže širokog područja male snage su takođe dobro proučavana tema [74-76].



Slika 2.13.1. Klasifikacija IOT napada

2.14. Komunikacija vanzemaljskih mreža

Integracija arhitekture nezemaljske mreže (NTN) u 6G mreže zahteva istraživanje i razvoj u sledećim oblastima [3]:

1) Dizajn arhitekture kao jedinstvene pristupne mreže: Dizajn arhitekture bez razlike između zemaljskih i NTN elemenata koji se stoga može orkestrirati da obezbedi ekonomičnu konfiguraciju mreže dinamičkim kretanjem funkcionalnosti stvarajući fleksibilnu topologiju mreže. Potrebno je razviti tri glavna pokretača, a to su softverizacija NT pristupne mreže, virtuelizacija i dezagregacija.

2) Konstelacija sa hijerarhijskim dizajnom: Hijerarhijske konstelacije će se sastojati od čvorova koji lete na različitim visinama i komuniciraju među njima preko horizontalnih međučvornih veza, odnosno među čvorovima na istoj nadmorskoj visini, i vertikalnih međučvornih veza, odnosno među čvorovima koji lete na različite visine, ili zemaljski čvorovi.

3) Pametni NTN sa računarstvom i skladištenjem na oblaku: Leteći čvorovi će postati pametni ivični čvorovi 6G mreže. Obrada, skladištenje i komunikacija na oblaku treba da budu omogućeni kao podrška realizaciji vanzemaljskih oblaka i svemirskih informacionih mreža (SIN).

4) Optimizacija resursa sa infrastrukturom kao resursom: Pored dimenzija propusnog opsega, vremena, snage i prostora, optimizacija resursa treba da se pozabavi samom infrastrukturom kao resursom koji treba da se konfiguriše u skladu sa zahtevima usluge.

5) Dinamičko upravljanje spektrom, koegzistencija i deljenje: Koegzistencija i deljenje dinamičkog spektra između zemaljskih i NTN segmenata, kao i između različitih slojeva arhitekture, npr. GEO i NGSO čvorova, čvorova u svemiru i vazduhu, moraju biti razvijeni.

6) Novi spektar izvan THz: Upotreba novih spektralnih opsega, sve do optičkih komunikacija, treba da se istraži, u bliskoj saradnji sa zemaljskim. Ovo uključuje karakterizaciju uslova širenja i razvoj modela kanala sa kojima se susreću NTN elementi kako u komunikacijama među čvorovima tako i u komunikacijama nezemaljskim i zemaljskim.

7) Tehnologije radio pristupa sa fleksibilnošću i prilagodljivošću: Dizajn talasnog oblika će se zajedno baviti karakteristikama nezemaljskih i zemaljskih kanala, kao što su Doplerovi efekti koje uvode NGSO čvorovi, aspekti kašnjenja i kašnjenja čvorova na većoj nadmorskoj visini, kao i potreba za efikasnu podršku procene kanala. Integrisana pristupna mreža takođe treba da podržava diskontinualni backhauling u scenarijima gde leteća bazna stanica ne može da preuzme kontinuiranu vezu sa osnovnom mrežom, na primer, u nepotpunim konstelacijama LEO ili vLEO.

8) NTN komponente sa izvan postojećih tehnologija: softverski definisana korisna opterećenja, novi dizajn i tehnologije antene, i nove komponente na THz i šire.

9) AI za eksploataciju NT dinamike: Autonomni i inteligentni sistem upravljanja mrežom će biti na odgovarajući način razvijen, koristeći predvidljivu dinamičku komponentu NT segmenta.

2.15. Mreže/podmreže posebne namene

Vođeni sposobnošću da ispunimo zahteve za ultra-pouzdanim i malim kašnjenjem, počinjemo da vidimo upotrebu 5G u vertikalnim industrijama za industrijsku automatizaciju. Trend će se verovatno dalje širiti što će rezultovati povećanjem potražnje za 6G za vertikale sa primenom na mreže posebne namene ili na čak i manji opseg "podmreža" koje generalno mogu da rade na samostalan način, ali mogu imati koristi od povezivanja sa širokom mrežom. Primeri podmreža koje će imati koristi od poboljšanja performansi 6G će se kretati od podmreže unutar tela, unutar robota zatim unutar automobila i podmreže roja dronova. Na primer, podmreže u telu mogu da se koriste za kontrolu životno kritičnih funkcionalnosti kao što su srčani bit (bežični pejsmejker) ili insulinska pumpa kod pacijenata sa dijabetesom, dok podmreže u vozilu mogu da

podržavaju bežično CAN magistralu i automobilske Ethernet operacije, za kontrolu motora, antiblokiranje i asistenciju vožnje. Upotreba visoko specijalizovanih podmreža male snage kratkog dometa omogućava oslobađanje mikro/makro infrastrukture od najzahtevnijih aplikacija, utirući put ka isplativoj podršci usluga visokih performansi [3].

Dok mreže unutar tela mogu zahtevati ekstremnu pouzdanost i kašnjenje u kombinaciji sa veoma velikom gustinom senzora, rojevi dronova će pre zahtevati proširenje zahteva vezanih za vanzemaljske mreže (NTN), kao što su optimizacija budžeta veze i ad-hoc saradnja između letećih objekata. Energetski optimizovane podmreže kratkog dometa sa bežičnim uređajima sa nultom potrošnjom energije (kao što su pasivne radio frekvencijske identifikacione oznake) omogućiće vek trajanja baterije do deset godina. U isto vreme, takođe specijalizovani slučajevi upotrebe na širokom području, kao što je za praćenje životne sredine, mogu zahtevati senzorske uređaje sa veoma dugim vekom trajanja baterije.

Podmreže će biti ključni pokretački faktor za 6G arhitektonske promene zbog lokalne topologije podmreža u kombinaciji sa potrebnim specijalizovanim atributima performansi kao što su ekstremno kašnjenje ili pouzdanost. Podmreže su definisane da rade u samostalnom režimu, kao i da su povezane na 3GPP mrežu širokog područja. Takav pristup će omogućiti istovar u oba smera, kao i poboljšane šeme za otkrivanje; u isto vreme, opseg funkcionalnosti i složenost steka protokola se mogu prilagoditi u skladu sa tim.

Dizajn vazdušnog interfejsa za podmreže treba da bude prilagođen potrebama specijalizovanih aplikacija. Konkretno, latencije ispod milisekunde i ekstremna pouzdanost mogu se postići korišćenjem velikih razmaka podnosećih (npr. iznad 120 kHz), ultra kratkih intervala prenosa, slepih ponavljanja paketa i skakanja kanala radi prikupljanja frekvencija i raznolikosti interferencije. Iako je osnova ovakvih tehnoloških komponenti već poznata od 5G, shvatamo da one treba dalje da se razvijaju kako bi se nosile sa ekstremnijim zahtevima. Takođe, vazdušni interfejs bi trebalo da bude dizajniran tako da bude otporan na ometanje jer je to jedna od glavnih potencijalnih pretnji za podršku ultra-pouzdanih usluga. U slučaju gustog rasporeda, kao što su roboti u pretrpanoj fabrici ili vozila na zakrčenom putu, upravljanje smetnjama je od najveće važnosti za obezbeđivanje dovoljnog kvaliteta signala u operativnim opsezima. Upravljanje smetnjama treba da iskoristi mogućnosti lokalnog sensinga u svakoj podmreži, zajedno sa, kada su dostupne, dodatnim informacijama o trenutnoj dodeli frekvencija u susednim podmrežama koje obezbeđuje široka 3GPP mreža.

2.16. Nove karakteristike mreže

Još jedna važna oblast koju postojeće mobilne komunikacione mreže nisu u stanju da obezbede je satelitska komunikacija. Ključno je neophodno imati integraciju satelitske komunikacije; 6G predviđa postizanje transformacije „zemaljskog 2D“ u „globalnu 3D povezanost“. Ovo će postići cilj neograničene sveprisutne povezanosti, povezujući kopno, more i vazduh. Da bi se postigao širi globalni nivo pokrivenosti, post 6G scenario opisuje širu upotrebu

različitih tehnologija „satelitske komunikacije“. Tako se vizija 6G za „sveprisutnu povezanost“, „širu globalnu pokrivenost“ i „veću propusnost“ može ostvariti integracijom ćelijskih mreža sa satelitskim komunikacijama. Dalje, u eri 6G, komunikacija putem satelita može olakšati „UAV i komunikacione tehnologije potpomognute satelitom“ kako bi se obezbedila globalna povezanost kako bi se olakšale „pametne fizičke uređaje“ i IoT za „pouzdanu“, „sigurnu širu pokrivenost“ i „ brza ruralna implementacija“, itd. Štaviše, 6G satelitska komunikacija takođe može olakšati „zdravstvene sisteme“ i „navigacione“ aplikacije, itd.

Kompanije kao što su „Globalstar“ i „Iridium Communications“ su preduzele projekte „IoT zasnovane na satelitima“ za gore pomenute scenarije slučaja upotrebe, koji su bili izazovni zadaci za tradicionalne „sisteme celularne komunikacije“ i „zemaljske tehnologije“. Štaviše, u eri nakon 6G, integracija „nezemaljskih tehnologija“ bespilotnih letelica i satelitski potpomognutih „komunikacijskih tehnologija“ doneće prednosti ne samo većim brzinama prenosa podataka, već će olakšati živote ljudi koji žive u udaljenim regionima, efektivno prirodne nepogode i mogućnosti upravljanja katastrofama [3], [79], [80].

Satelitska komunikacija je neophodna da bi se obezbedila sveprisutna povezanost. Može da podrži besprekornu globalnu pokrivenost različitih geografskih lokacija kao što su kopno, more, vazduh i nebo kako bi obezbedila korisniku sveprisutno povezivanje. Stoga, da bi se obezbedilo stalno uključeno širokopojasno mobilno društvo, očekuje se da će se integrisati zemaljski i satelitski sistemi kako bi se postigao cilj 6G. Integracija zemaljskih, satelitskih i vazdušnih mreža u jedan bežični sistem biće ključna za 6G. Samo ova integracija može postići potražnju za uMUB uslugama.

Povezana inteligencija: Za razliku od ranije generacije bežičnih komunikacionih sistema, 6G će biti transformativan i ažuriraće bežični napredak sa „povezanih stvari“ na „povezanu inteligenciju“. AI će biti uveden u svaki korak procesa komunikacije, kao i upravljanje radio resursima. Sveobuhvatno uvođenje AI će proizvesti novu paradigmu komunikacionih sistema. U poređenju sa 5G, kompletan AI sistem mora biti potreban za ultra guste složene mrežne scenarije 6G, omogućavajući inteligentnim komunikacionim uređajima da pribave i izvrše proces alokacije resursa [3], [79], [80].

Besprekorna integracija bežičnih informacija i prenosa energije: 6G bežične mreže će takođe prenositi snagu za punjenje baterijskih uređaja, kao što su pametni telefoni i senzori. Stoga će bežični prenos informacija i energije (VIET) biti integrisan.

Sveprisutna super 3D konekcija: Pristup mreži i funkcionalnosti jezgrene mreže na bespilotnim letelicama i satelitima na veoma niskoj zemljinoj orbiti učiniće super-3D povezivanje u 6G univerzalnom.

2.17. Nekoliko opštih zahteva u mrežnim karakteristikama

Mreže malih ćelija: Ideja o mrežama malih ćelija je uvedena da poboljša kvalitet primljenog signala kao posledica povećanja propusnosti, energetske efikasnosti i spektralne efikasnosti u ćelijskim sistemima. Kao rezultat toga, mreže malih ćelija su suštinska karakteristika

za 5G i dalje (5GB) komunikacione sisteme. Stoga, 6G komunikacioni sistemi takođe usvajaju ovu mrežnu karakteristiku [70-73].

Ultra guste heterogene mreže: Ultra guste heterogene mreže biće još jedna kritična karakteristika 6G komunikacionih sistema. Višeslojne mreže koje se sastoje od heterogenih mreža će poboljšati ukupni QoS i smanjiti troškove.

Backhaul velikog kapaciteta: Backhaul povezanost mora biti okarakterisana backhaul mrežama velikog kapaciteta kako bi se podržao značajan obim 6G saobraćaja podataka. Sistemi optičkih vlakana velike brzine i optički sistemi slobodnog prostora (FSO) su moguća rešenja za ovaj problem.

Radarska tehnologija integrisana sa mobilnim tehnologijama: Lokalizacija visoke preciznosti sa komunikacijom je takođe jedna od karakteristika 6G bežičnog komunikacionog sistema. Dakle, radarski sistemi će biti integrisani sa 6G mrežama.

Softvarizacija i virtuelizacija: Softvarizacija i virtuelizacija su dve kritične karakteristike koje su osnova procesa projektovanja u mrežama od 5 GB kako bi se osigurala fleksibilnost, rekonfiguracija i programibilnost. Pored toga, omogućiće da se milijarde uređaja dele na zajedničkoj fizičkoj infrastrukturi.

2.18. Mogućnosti za uređaje i komponente

Napredak u svim aspektima bežičnih mreža u velikoj meri zavisi od elektronskih tehnologija, komponenti i uređaja koji se koriste za njihovu implementaciju. To obuhvata širok spektar elemenata, uključujući procesore, memorijske module, analogne i RF komponente, DAC i ADC konvertore, antene, pakovanje uređaja i optičke komponente.

U RF domenu, tehnologije ispod 10 GHz, mm talasa i THz koje se koriste u 6G mrežama suočavaju se sa svojim specifičnim izazovima. Prvo, izazovi ispod 10GHz leže u oblastima arhitekture i kola primopredajnika ka sve boljoj linearnosti, faznom šumu, bržim, energetski efikasnijim pretvaračima sa većom rezolucijom, više antenskih kanala, višepojasnih. Izbor pravog CMOS tehnološkog čvora (prelazak na 7, 5, 3 ili 2nm, migriranje sa FinFET-a na tranzistore sa gejt-all-around, upotreba GaN-a za TKS napajanje), zajedno sa ograničenjima troškova i snage, pogoršavaju izazov. Uređajima ultra male snage su potrebne performanse od μVatt-a, što zahteva napredak u primopredajnicima za prikupljanje energije i povratno rasejanje. Drugo, izazovi sa milimetarskim talasima su u oblasti MIMO/hibridnih arhitektura oblikovanja zraka za velike i veoma velike nizove, poluprovodničke tehnologije i srednje rezolucije, pretvarača velike brzine. Pakovanje i međusobno povezivanje su veoma izazovni na ovim frekvencijama, metamaterijali nude mogućnosti za lepe smetnje. Ovi izazovi sve više rastu za THz opseg (tj. >100 GHz) gde je potreban napredak u CMOS, SiGe i III-V poluprovodnicima (AsGa, InP, GaN, ...) i potencijalno novim tehnologijama, kolima, pakovanju, širokopojasnoj mreži formiranje snopa (uključujući pravo vremensko kašnjenje), velike nizove, antene na čipu, ultra-širokopojasni osnovni opseg (5

do 10GHz) i pridružene pretvarače. Ove tehnologije takođe mogu doprineti ili imati koristi od senzora mm-talasa i THz, aktivnih i pasivnih, kao što su uređaji za snimanje i radari [58], [67].

Izazovi u optičkom domenu su u sve većoj potražnji za propusnošću (3,2 TBauds primopredajnici do 2030.), povećanom korišćenju koherentnog (tj. KAM) prenosa čak i za kratke udaljenosti, monolitnoj integraciji optičkih komponenti i CMOS obrade, fotoničkim uređajima, nove komponente na čipu kao što su laserski izvori i optičke fazno zaključane petlje. Troškovi, a posebno snaga, su glavno pitanje za zelenu infrastrukturu.

Što se tiče digitalne obrade, potrebno je istraživanje kako bi se premostio jaz između visokoefikasnih ASIC-a i programabilnih uređaja visoke fleksibilnosti. Očekuje se da će kapacitet memorije porasti za izazovan faktor od 1,4 puta svake godine. Za ekstremnu efikasnost, računarstvo u memoriji se smatra obećavajućom tehnikom da se snaga svede na minimum. Za AI, potreban je značajan napredak u smanjenju snage, kako na strani servera (zeleni serveri), tako i na ivičnim uređajima (veoma mala snaga). U tu svrhu mogu se iskoristiti jedinice za neuronsku obradu (NPU). Bio-inspirisane spiking neuronske mreže su arhitektura u nastajanju koja nudi redukciju snage, ali je daleko od realizacije [3].

Hardveru za bezbednost je potrebna istraživanja kako bi se povećala pouzdanost, ponudila graciozna degradacija i automatski oporavak, kao i otpornost na napade kvantnog računarstva. Za hardversku bezbednost postoji i potreba za novim multiprocesorskim sistem-na-čipu arhitekturama (MPSoC). Kako se moderni MPSoC-ovi često oslanjaju na nepouzdane IP blokove treće strane da bi minimizirali troškove dizajna, mora se obezbediti pouzdanost celokupnog sistema. Nepouzdane komponente moraju biti pravilno izolovane i njihovo ponašanje verifikovano. Takav sistem takođe može biti podržan sa ISA ekstenzijama i sa mikrokernel OS-om.

2.19. Perspektive i primene

Za nadolazeću šestu generaciju mobilnih sistema potrebno je istražiti brojne tehnologije. Radio teme (korišćenje spektra, mMIMO, nasumični pristup, modeliranje kanala, itd., posebno u THz komunikacijama) biće potrebne da bi se globalno proširio kapacitet mreže približavajući se Šenonovim i Murovim granicama. Štaviše, tehnike sondiranja, mešanje komunikacija i mapiranje okruženja biće od suštinskog značaja za mnoge društvene scenarije. Viši slojevi će takođe zahtevati specifična istraživanja, kao što su nove arhitekture komutacije i novi protokoli rutiranja, efikasni kontejneri i orkestracija kontejnera, sa pouzdanom virtuelizacijom softvera, sa brzim instancama i mobilnošću, kao i širokim izazovima u domenu bezbednosti (kvantifikacija, činjenice provere usluga zasnovanih na veštačkoj inteligenciji, bezbednog softverskog inženjeringa i operativnih procedura, itd.). Razvoj sistemskih arhitektura koje obuhvataju sve vrste resursa, bez obzira na njihovu prirodu (računanje, umrežavanje), realizaciju (virtuelno/fizičko) i poziciju (udaljeno/lokalno), dinamičko dodavanje i uklanjanje resursa kako dolaze i odlaze (izbacuju) će takođe biti potreban. Ono što će biti potrebno je da se integriše ogroman broj ugrađenih uređaja

svuda, veze visokog kapaciteta i raznolik skup tipova pristupa, kroz računarski kontinuum, u jednu mrežu koja ispunjava visoka očekivanja od budućnosti i što je važno za poboljšanje kvaliteta života.

Još jedan suštinski alat biće AI/ML mehanizmi za optimizaciju fizičkih i viših slojeva, koristeći i onlajn i oflajn strategije. Ovo se može postići prilagođavanjem primenjenom bežičnom okruženju, ublažavanjem oštećenja hardvera i postizanjem niže složenosti računara. Učenje na mreži za brzu, robusnu i prediktivnu rekonfiguraciju primopredajnika koja je svesna okruženja može biti jedno od otkrića. Dizajn primopredajnika vođen podacima na nov način „od kraja do kraja“, za razliku od konvencionalnog „blok-po-blok“ dizajna, može biti efikasniji. AI/ML se može koristiti za optimizaciju različitih funkcionalnosti radio interfejsa, na primer, prenos sa više antena, podešavanje sistema bez ćelija, predviđanje kanala, sinhronizacija, demodulacija, dekodiranje, poravnanje/upravljanje/oporavak snopa i celokupno upravljanje radio resursima [3], [21], [25].

Pored toga, radio pristupne mreže (RAN) prolaze kroz arhitektonsku transformaciju, razdvajanje i virtuelizaciju RAN funkcija kako bi podržale heterogenost usluga, koordinaciju tehnologija višestrukog povezivanja i primenu usluga na zahtev sa ubrzanom i distribuiranom procesorskom snagom. Dezagregirana RAN arhitektura zasnovana na mikro-uslugama, u kombinaciji sa AI/ML, kao i otvorenim i standardizovanim interfejsima, omogućava fleksibilno biranje, primenu i optimizaciju RAN funkcija i usluga za specifičan slučaj upotrebe. 3GPP i O-RAN alijansa rade na „horizontalnim“ tačkama razdvajanja više dobavljača, tj. interfejsima između različitih RAN slojeva i jedinica, na primer, prednji transport, distribuirane i centralizovane jedinice za korisnika i kontrolnu ravan. O-RAN uvodi otvoreni kontroler skoro u realnom vremenu, tj. RAN Inteligentni kontroler (RIC) u svrhu programiranja RAN i optimizacije usluge. Sa otvorenom arhitekturom, RIC ugrađuje inteligentne mogućnosti zasnovane na AI/ML-u i omogućava ugradnju RAN kontrolnih aplikacija za optimizaciju finih performansi u skoro realnom vremenu i podešavanje politike.

Konačno, koncepti 3GPP i otvorenog RAN omogućavaju RAN opremi i softveru različitih proizvođača da komuniciraju i interoperišu (npr. putem apstrakcije softvera od hardvera) i dalje razdvajanje na distribuiranu jedinicu i centralizovanu jedinicu u 5G mrežama. Ovo, međutim, može povećati složenost integracije, kao i ugroziti sveukupne odgovornosti za performanse mreže. Dekompozicija više dobavljača i lanac snabdevanja mogu povećati površinu pretnje za zlonamerne napade, kao i operativnu složenost mreže. Pored toga, široko usvajanje Open RAN koncepta u 6G može zahtevati rešavanje problema u vezi sa potrošnjom energije koji su izazvani upotrebom procesora opšte namene za pokretanje virtuelizovanih RAN funkcija. Sva ova i druga pitanja koja se odnose na razdvajanje i širenje broja standardizovanih i otvorenih interfejsa treba analizirati i ublažiti, pre nego što 6G može nedvosmisleno da usvoji Open RAN koncepte [21].

Konačno, eksploatacija svojstava iz kvantne mehanike obećava performanse bez presedana u kvantnom sensingu, komunikaciji, bezbednosti i računarstvu. Takve mogućnosti će ostati nedovoljno iskorišćene u odsustvu razvoja kvantnih mreža i njihove integracije sa klasičnim. 6G mreže će se verovatno suočiti integracijom kako bi se oslobodile kvantne mogućnosti

detekcije/komunikacije/računarstva s jedne strane, kao i da bi se iskoristile kvantne mogućnosti za efikasno korišćenje resursa.

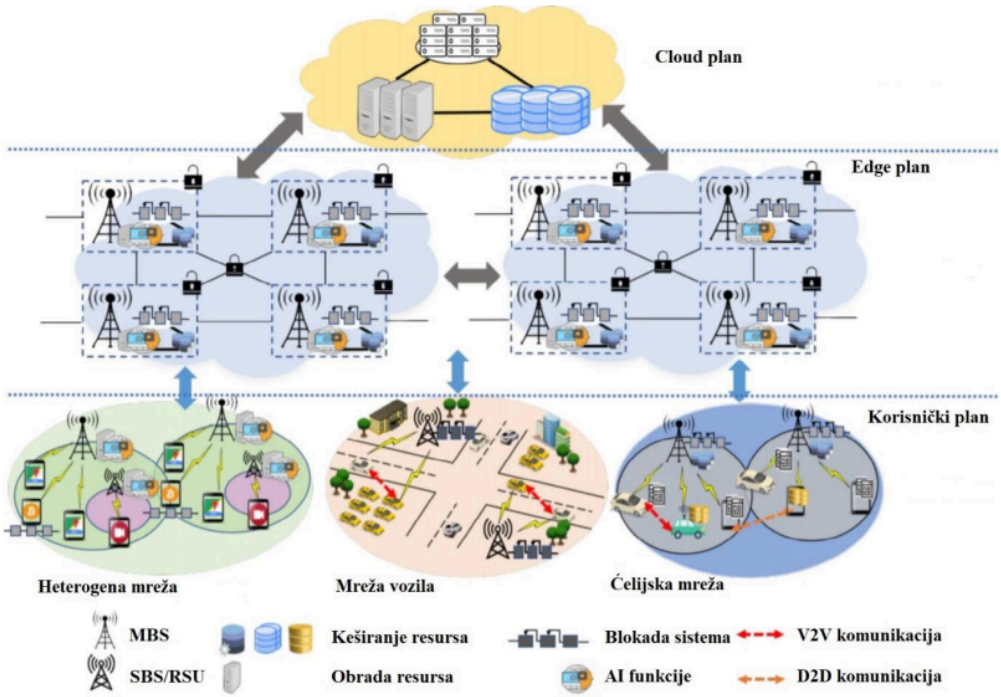
Potpuno AI će biti integrisan u 6G komunikacione sisteme. Sva mrežna instrumentacija, upravljanje, obrada signala fizičkog sloja, upravljanje resursima, komunikacija zasnovana na uslugama i tako dalje biće ugrađeni korišćenjem AI. To će podstaći revoluciju industrije 4.0, što je digitalna transformacija industrijske proizvodnje. Slika 4 prikazuje scenario komunikacione arhitekture ka predviđanju 6G komunikacionih sistema. 6G aplikacije se mogu okarakterisati pod uMUB, uHLSLLC, mMTC i uHDD uslugama.

Super-pametno društvo: superiorne karakteristike 6G će ubrzati izgradnju pametnih društava koja će dovesti do poboljšanja kvaliteta života, praćenja životne sredine i automatizacije koristeći M2M komunikaciju i prikupljanje energije zasnovanu na veštačkoj inteligenciji. Ova aplikacija se može okarakterisati pod svim uMUB, uHLSLLC, mMTC i uHDD uslugama. 6G bežična povezanost učiniće naše društvo super-pametnim korišćenjem pametnih mobilnih uređaja, autonomnih vozila i tako dalje. Osim toga, mnogi gradovi u svetu će primeniti leteće taksije zasnovane na 6G bežičnoj tehnologiji. Pametne kuće postaju stvarnost jer se bilo kojim uređajem na udaljenoj lokaciji može kontrolisati pomoću komande date sa pametnog uređaja [3], [25].

Proširena stvarnost: Usluge proširene stvarnosti (u daljem tekstu XR), uključujući proširenu stvarnost (AR), mešovitu stvarnost (MR) i VR su osnovne karakteristike 6G komunikacionih sistema. Sve ove funkcije koriste 3D objekte i veštačku inteligenciju kao kritične pokretačke elemente. Osim što obezbeđuje perceptivne zahteve za računarstvo, kogniciju, skladištenje, ljudska čula i fiziologiju, 6G će pružiti zaista impresivno AR/MR/VR iskustvo zajedničkom integracijom dizajna i visokokvalitetnom 6G bežičnom konekcijom.

Napredne karakteristike nosivih uređaja kao što su XR uređaji, slike visoke definicije i holografi ubrzavaju mogućnost za obavljanje komunikacije između ljudi i stvari. Inovativne usluge zabave i preduzeća kao što su igranje igara, gledanje i sport se pružaju bez ograničenja vremena i mesta. VR je kompjuterski simulirano 3D iskustvo u kojem računarske tehnologije koriste slušalice stvarnosti da bi stvorile realistične senzacije i replicirale stvarno okruženje ili stvorile imaginarni svet. Stvarno VR okruženje uključuje svih pet čula. AR je prikaz uživo stvarnog fizičkog sveta čiji su elementi dopunjeni raznim kompjuterski generisanim senzorskim ulazima, kao što su audio, video, vizuelni i podaci globalnog sistema pozicioniranja (GPS). Koristi postojeću stvarnost i dodaje je koristeći neku vrstu uređaja. MR spaja stvarni i virtuelni svet da bi stvorio nove atmosfere i vizuelizacije za interakciju u realnom vremenu. Ponekad se naziva i hibridna stvarnost [21].

Jedna kritična karakteristika MR-a je da veštački i stvarni sadržaji mogu da reaguju jedan na drugog u realnom vremenu. XR se odnosi na sva kombinovana realna i virtuelna okruženja i interakcije ljudi-mašina koje generiše kompjuterska tehnologija i nosivi uređaji. Uključuje sve svoje opisne oblike, kao što su AR, VR i MR. Objedinjujući AR, VR i MR pod jednim terminom.



Slika 2.19.1. Bezbedna i inteligentna arhitektura 6G.

Visoka brzina prenosa podataka, mala latencija i veoma pouzdana bežična konekcija obezbeđena u 6G sistemu su veoma važni za originalno XR (tj. AR, VR i MR) iskustvo. 6G usluga, uHLSLLC, omogućiće uspešno primenu XR aplikacija u budućnosti.

Povezana robotika i autonomni sistemi: Trenutno, nekoliko istraživača automobilske tehnologije istražuje automatizovana i povezana vozila. Evolucija datacentričnih sistema automatizacije trenutno prevazilazi veštine 5G. U nekim domenima aplikacija, zahteva čak i više od 10 Gbps brzina prenosa, kao što su XR uređaji. 6G sistemi će pomoći u primeni povezani roboti i autonomni sistemi. UAV sistem za isporuku dronom je primer takvog sistema. Automatizovano vozilo zasnovano na 6G bežičnoj komunikaciji može dramatično da promeni naš svakodnevni životni stil. 6G sistem promoviše stvarnu primenu samovozećih automobila (autonomnih automobila ili automobila bez vozača). Samovozeće vozilo percipira svoju okolinu kombinovanjem različitih senzora, kao što su detekcija svetlosti i dometa (LiDAR), radar, GPS, sonar, odometrija i inercijalne merne jedinice. Usluge mMUB i uHLSLLC u 6G sistemu će potvrditi pouzdanu povezanost vozila-sve (V2X) i vozila-server. UAV je vrsta bespilotne letelice. 6G mreže će podržati zemaljski kontroler i sistemske komunikacije između UAV-a i zemlje. Bespilotne letelice pomažu u mnogim oblastima kao što su vojska, trgovina, nauka, poljoprivreda, rekreacija, zakon i red, isporuka proizvoda, nadzor, fotografije iz vazduha, upravljanje katastrofama i trke dronova. Štaviše, UAV će se koristiti za podršku bežičnog emitovanja i prenosa visoke brzine kada je ćelijska bazna stanica (BS) odsutna ili ne radi [57], [60].

Bežične interakcije mozak-računar: Interfejs mozak-računar (BCI) je pristup za kontrolu uređaja koji se svakodnevno koriste u pametnim društvima, posebno kućnih aparata i medicinskih aparata. To je direktna komunikacija između mozga i spoljašnjih uređaja. BCI preuzima moždane signale koji se prenose na digitalni uređaj i analizira i tumači signale u dalje komande ili radnje. BCI usluge zahtevaju veće metrike performansi u poređenju sa onim što 5G pruža. Bežični BCI zahteva zagarantovanu visoku brzinu prenosa podataka, ultra-nisku latenciju i ultra-visoku pouzdanost. Na primer, i downlink (XR sledeće generacije) i uplink komunikacija između mozga i stvari zahtevaju veoma visok protok (>10 Gbps) i ultra-pouzdanu konekciju. Karakteristike uHLSLLC i uMTC u 6G bežičnoj komunikaciji će podržati stvarnu primenu BCI sistema za pametan život.

Haptička komunikacija: Haptička komunikacija je grana neverbalne komunikacije koja koristi čulo dodira. Predložena 6G bežična komunikacija će podržati haptičku komunikaciju; udaljeni korisnici će moći da uživaju u haptičkim iskustvima kroz interaktivne sisteme u realnom vremenu. Ova vrsta komunikacije se široko koristi u nekoliko oblasti kao što su AI i robotski senzori, ljudi sa fizičkim izazovima da uče putem dodira, medicinske haptičke metode u hirurgiji i igranje igara. Implementacija haptičkih sistema i aplikacija može biti olakšana uHLSLLC, mMTC i uHDD karakteristikama 6G komunikacionih mreža [3].

Pametna zdravstvena zaštita i biomedicinska komunikacija: Medicinski zdravstveni sistemi će takođe imati koristi od 6G bežičnih mreža jer će inovacije, kao što su AR/VR, holografsko teleprisustvo, mobilno računarstvo i AI, pomoći u izgradnji pametnih sistema zdravstvene zaštite. 6G mreža će omogućiti pouzdan sistem daljinskog nadzora zdravstvenih sistema. Čak i operacija na daljinu biće omogućena korišćenjem 6G komunikacije.

Visoka brzina prenosa podataka, mala latencija, ultra-pouzdana (bez grešaka) 6G mreža će pomoći u brzom i pouzdanom prenosu velikih količina medicinskih podataka, poboljšavajući pristup nezi i kvalitetu nege. Sa druge strane, THz, jedna od kritičnih tehnologija vožnje 6G, ima sve veći potencijal upotrebe u zdravstvenim uslugama, kao što su teraherc pulsno snimanje u dermatologiji, oralnoj zdravstvenoj zaštiti, farmaceutskoj industriji i medicinskom snimanju. Takođe, biomedicinska komunikacija je suštinska perspektiva 6G bežičnog komunikacionog sistema. Senzori u telu sa obezbeđivanjem komunikacionih tehnologija bez baterije su pretežno poželjni za pouzdan i dugotrajan nadzor. Telesni senzori mogu da priušte pouzdano i kontinuirano praćenje ljudskih fizioloških signala za primenu u kliničkoj dijagnostici, atletici i interfejsima čovek-mašina.

Automatizacija i proizvodnja: 6G će obezbediti potpunu automatizaciju zasnovanu na veštačkoj inteligenciji. Termin „automatizacija“ se odnosi na automatsku kontrolu procesa, uređaja i sistema. Revolucija Industrije 4.0 počela je sa 5G, što je proizvodni proces zasnovan na sajber-fizičkom sistemu koji koristi automatizaciju i razmenu podataka. 6G će u potpunosti okarakterisati sistem automatizacije sa svojim remetilačkim skupom tehnologija. Sistemi za automatizaciju 6G će obezbediti visoko pouzdane, skalabilne i bezbedne komunikacije koristeći obezbeđivanje velike brzine prenosa podataka i niske latencije, tj. uHLSLLC, mMTC i uHDD

usluge. 6G sistem će takođe obezbediti integritet mreže jer obezbeđuje prenos podataka bez grešaka bez gubitka podataka između prenosa i prijema [3].

Prenos informacija sa pet čula: Da bi iskusili svet oko sebe, ljudi koriste svojih pet čula sluha, vida, ukusa, mirisa i dodira. Komunikacioni sistemi 6G će daljinski prenositi podatke dobijene iz pet čula. Ova tehnologija koristi neurološki proces kroz senzornu integraciju. On detektuje senzacije iz ljudskog tela i okoline i efikasno koristi telo u okruženju i lokalnim okolnostima. BCI tehnologija efikasno pojačava ovu aplikaciju.

Internet svega: IoE je besprekorna integracija i autonomna koordinacija između velikog broja računarskih elemenata i senzora, objekata ili uređaja, ljudi, procesa i podataka koji koriste internet infrastrukturu. 5G ima revolucionarne ciljeve za IoE tako što transformiše tradicionalni izgled mobilne komunikacije. Međutim, 5G se smatra početkom IoE-a i rešava mnoge izazove od standardizacije do komercijalizacije. 6G sistem će obezbediti punu IoE podršku. To je u osnovi neka vrsta IoT-a, krovnog termina koji integriše četiri svojstva, kao što su podaci, ljudi, procesi i fizički uređaji, u jednom okviru. Internet stvari se generalno odnose na fizičke uređaje ili objekte i međusobnu komunikaciju, ali IoE uvodi mrežnu inteligenciju da poveže sve ljude, podatke, procese i fizičke objekte u jedan sistem. IoE se koristi za pametna društva, kao što su pametni automobili, pametno zdravlje i pametne industrije [60].

Upotreba energetski efikasnih senzorskih čvorova smatra se jednim od kritičnih ograničenja koja podržavaju masovno IoE povezivanje u 6G. Ekstenzivne mreže male snage (LPVAN) imaju taj potencijal da podrže umrežavanje široke pokrivenosti (do 20 km) sa dugim trajanjem baterije (>10 godina) i niskim troškovima primene. Dakle, LPVAN učestvuje komercijalno u većini slučajeva korišćenja IoE. Ova aplikacija može biti podržana karakteristikama uMUB, uHLSLLC i uHDD 6G komunikacije.

2.20. Fundamentalne tehnologije omogućavanja 6G

Na osnovu prethodne evolucije mobilnih mreža, 6G će u početku biti zasnovan na 5G arhitekturi, naslеđujući sve prednosti koje je 5G ostvario. Pored toga, biće uvedene nove tehnologije, dok će neke postojeće 5G tehnologije biti unapređene. Dakle, 6G sistem će objediniti niz različitih tehnologija. U nastavku su prikazane neke od ključnih tehnologija koje se očekuju u 6G mrežama.

Veštačka inteligencija: Inteligencija je osnovna karakteristika 6G autonomnih mreža. Dakle, najkritičnija i novouvedena tehnologija za 6G komunikacione sisteme je AI. Nije bilo učešća AI za 4G komunikacione sisteme. Predstojeći 5G komunikacioni sistemi podržavaće delimičnu ili veoma ograničenu veštačku inteligenciju. Međutim, 6G će biti u potpunosti podržan od AI za automatizaciju. 6G sa AI-om će obezbediti puni potencijal radio signala i omogućiti transformaciju sa kognitivnog radija na inteligentni radio. Napredak u mašinskom učenju stvara inteligentnije mreže za komunikaciju u realnom vremenu u 6G. Uvođenje AI u komunikaciju će pojednostaviti i poboljšati transport podataka u realnom vremenu [60], [61].

Tabela 2.20.1. mm Talasi, THz i optički podopsezi za moguće bežične komunikacije u 6G

	mm Talasi 1. deo		30-275 GHz	10-1.1 mm	mm Talasi	
THz	mm Talasi 2. deo		275-300 GHz	1.1-1 mm		
	IR Talasi 1. deo		0.3-3 THz	1-0.1 mm	Infrared	Optički
	IR Talasi 2. deo		3-20 THz	0.1-0.015 mm		
	Termalni IR	Dugotalasne IR	20-37.5 THz	0.015-0.008 mm		
		IR srednje talasne dužine	37-100 THz	0.008-0.003 mm		
	Kratkotalasne IR		100-214.3 THz	3000000-1400 nm		
	Bliske IR		214.3-394.7 THz	1400-760 nm		
	Crvena		394.7 - 491.8 THz	760 - 610 nm	Vidljivi	
	Narandzasta		491.8 - 507.6 THz	610 - 591 nm		
	Žuta		507.6 - 526.3 THz	591 - 570 nm		
	Zelena		526.3 - 600 THz	570 - 500 nm		
	Plava		600 - 666.7 THz	500 - 450 nm	Ultravioletni	
	Ljubičasta		666.7 - 833.3 THz	450 - 360 nm		
	UVA		750 - 952.4 THz	400 - 315 nm		
	UVB		952.4 - 1071 THz	315 - 280 nm		
	UVC		1.071 - 3 PHz	280 - 100 nm		
	NUV		0.750 - 1 PHz	400 - 300 nm		
	Middle UV		1 - 1.5 PHz	300 - 200 nm		
	Far UV		1.5 - 2.459 PHz	200 - 122 nm		
	Hydrogen Lyman-alpha		2.459 - 2.479 PHz	122 - 121 nm		
	Extreme UV		2.479 - 30 PHz	121 - 10 nm		
	Vacuum UV		1.5 - 30 PHz	200 - 10 nm		

Koristeći brojne analitike, AI može odrediti način na koji se obavlja složeni ciljni posao. AI povećava efikasnost i smanjuje kašnjenje u procesu komunikacije koraka. AI se može koristiti za brzo obavljanje zadataka koji oduzimaju vreme, kao što su primopredaja i izbor mreže. AI će takođe igrati vitalnu ulogu u M2M, komunikacijama između mašina i ljudi i ljudi-mašina. Takođe podstiče komunikaciju u BCI. Komunikacioni sistemi zasnovani na veštačkoj inteligenciji biće podržani metamaterijalima, inteligentnim strukturama, inteligentnim mrežama, inteligentnim uređajima, inteligentnim kognitivnim radiom, samoodrživim bežičnim mrežama i mašinskim učenjem. Dakle, AI tehnologija će pomoći da se postignu ciljevi uMUB, uHSLC, mMTC i uHDD usluga u 6G komunikaciji. Nedavni napredak omogućava primenu mašinskog učenja za obradu RF signala, kao i mapiranje spektra. Kombinovanje fotonskih tehnologija sa mašinskim učenjem će podstaći evoluciju AI u 6G kako bi se izgradio kognitivni radio sistem zasnovan na fotonici. Fizički sloj usvaja koder-dekoder zasnovan na AI, duboko učenje za procenu stanja kanala i automatsku klasifikaciju modulacije. Za sloj veze podataka i transportni sloj, alokacija resursa zasnovana na dubokom učenju i inteligentno predviđanje i kontrola saobraćaja su opsežno proučavani kako bi se ispunili zahtevi 6G. Kašnjenje će biti značajno smanjeno primenom mašinskog učenja i velikih podataka kako bi se odredio najbolji način za prenos informacija između krajnjih korisnika pružanjem prediktivne analize [60], [61].

Teraherc komunikacije: Spektralna efikasnost se može povećati povećanjem propusnog opsega. To se može uraditi proširenjem propusnog opsega i primenom naprednih tehnologija masivnih višestrukih ulaza i više izlaza (MIMO). 5G uvodi milimetarske talase frekvencije za veće brzine prenosa podataka i omogućava nove aplikacije. Međutim, 6G ima za cilj da pomeri granice frekvencijskog opsega na THz kako bi zadovoljio još veću potražnju. RF opseg je skoro iscrpljen, a sada je nedovoljan da zadovolji visoke zahteve 6G. THz opseg će igrati važnu ulogu u 6G komunikaciji. THz opseg treba da bude sledeća granica komunikacija visoke brzine prenosa podataka.

THz talasi, takođe poznati kao submilimetarsko zračenje, obično se odnose na frekvencijski opseg između 0,1 THz i 10 THz sa odgovarajućim talasnim dužinama u opsegu 0,03 mm–3 mm. Prema preporukama ITU-R (ITU radiokomunikacijskog sektora), opsega 275 GHz–3 THz je glavni deo opsega THz za ćelijske komunikacije. Kapacitet 6G ćelijskih komunikacija će se povećati dodavanjem THz opsega (275 GHz–3THz) mm Talasa opsegu (30–300 GHz). Opseg u opsegu od 275 GHz–3 THz još uvek nije dodeljen za bilo koju svrhu širom sveta; stoga, ovaj opseg ima potencijal da postigne željene visoke brzine prenosa podataka. Kada se ovaj THz opseg doda postojećem mm Talasnom opsegu, ukupan kapacitet opsega se povećava najmanje 11,11 puta. Od definisanih THz opsega, 275 GHz–3THz, i 275 GHz–300 GHz leže na mm Talasu, a 300 GHz–3 THz leže u daleko infracrvenom (IR) frekventnom opsegu. Iako je opseg od 300 GHz–3 THz deo optičkog opsega, on je na granici optičkog opsega i odmah iza RF opsega. Dakle, ovaj opseg od 300 GHz–3 THz pokazuje prilično slične karakteristike sa RF. THz povećava potencijale i izazove visokofrekventnih komunikacija. Tabela 4 navodi THz i optičke podopsege za moguće bežične 6G komunikacije. Kritična svojstva THz interfejsa uključuju [60], [61]:

1) široko dostupan propusni opseg za podršku veoma visokih brzina prenosa podataka,

2) veliki gubitak putanje koji proizilazi iz visoke frekvencije (visoko usmerene antene će najverovatnije biti neophodne).

Uske širine snopa koje stvaraju visoko usmerene antene smanjuju smetnje. THz komunikacione tehnologije će ubrzati pružanje uMUB, uHSLC i uHDD usluga u 6G komunikaciji. THz komunikacija će poboljšati 6G potencijale podržavajući bežičnu spoznaju, sensing, snimanje, komunikaciju i pozicioniranje. Zbog kraće talasne dužine, frekvencijski opseg THz u 6G je koristan za ugradnju velikog broja antena koje nude stotine zraka u poređenju sa opsegom mm Talasa. Spektralna efikasnost se može poboljšati korišćenjem multipleksiranja orbitalnog ugaonog momenta (OAM). Ovo se može postići superponiranjem više elektromagnetnih talasa koji imaju različite OAM modove. Moguće je smanjiti interferenciju na kokanalnom prenosu i ozbiljan gubitak prostiranja za opsege mm Talasa i THz formiranjem super-uskih zraka. Da bi se prevazišlo veoma veliko atmosfersko slabljenje u komunikaciji u opsegu THz, koristiće se visoko usmerene antene sa olovkom. Štaviše, kvadratna frekvencija antene sa fiksnom veličinom otvora poboljšava pojačanje i usmerenost, što je takođe prednost za THz komunikaciju [60].

Optička bežična tehnologija: OVC tehnologije su predviđene za 6G komunikacije kao dodatak komunikacijama zasnovanim na RF za sve moguće mreže uređaja za pristup; ove mreže takođe pristupaju mrežnom povezivanju od mreže do backhaul/fronthaul mreže. OVC tehnologije

se koriste od 4G komunikacionih sistema. Međutim, predviđeno je za širu upotrebu kako bi se zadovoljili zahtevi 6G komunikacionih sistema. OVC tehnologije, kao što su tačnost svetlosti, komunikacija sa vidljivim svetlom (VLC), komunikacija optičkim kamerama i FSO komunikacija zasnovana na optičkom opsegu, već su dobro poznate tehnologije. Ove komunikacione tehnologije će se intenzivno koristiti u nekoliko aplikacija kao što su V2X komunikacija, pozicioniranje mobilnog robota u zatvorenom prostoru, VR i podvodni OVC. Istraživači su radili na poboljšanju performansi i prevazilaženju izazova ovih tehnologija.

Komunikacije zasnovane na bežičnim optičkim tehnologijama mogu da obezbede veoma visoke brzine prenosa podataka, niske latencije i bezbedne komunikacije. LiDAR, koji je takođe zasnovan na optičkom opsegu, je obećavajuća tehnologija za 3D mapiranje veoma visoke rezolucije u 6G komunikacijama. OVC će samouvereno poboljšati podršku uMUB, uHSLC, mMTC i uHDD usluga u 6G komunikacionim sistemima. Napredak u tehnologiji svetlećih dioda (LED) i tehnikama multipleksiranja su dva kritična pokretača za OVC u 6G. Očekuje se da će i microLED tehnologije i tehnike prostornog multipleksiranja biti zrele i isplative 2026. Bela svetlost zasnovana na različitim talasnim dužinama će biti korisna za ubrzanje performansi protoka putem multipleksiranja sa podelom talasnih dužina, što će dovesti do potencijalno 100+ Gbps za ultra-visoke VLC pristupne tačke sa brzinom prenosa podataka. Dodavanje masivne paralelizacije mikroLED nizova će poboljšati dalju brzinu prenosa podataka do ciljanih Tbps 6G komunikacije [60], [61].

FSO fronthaul/backhaul mreža: Nije uvek moguće imati povezanost optičkim vlaknima kao backhaul mrežu zbog udaljenih geografskih lokacija i složenosti. Štaviše, instaliranje veza sa optičkim vlaknima za mreže malih ćelija možda neće biti isplativo rešenje. FSO fronthaul/backhaul mreža je nadolazeća za 5GB komunikacione sisteme. Karakteristike predajnika i prijemnika FSO sistema su slične onima u mrežama sa optičkim vlaknima. Stoga je prenos podataka u sistemu FSO uporediv sa sistemom optičkih vlakana. Stoga, zajedno sa mrežama optičkih vlakana, FSO je odlična tehnologija za pružanje fronthaul/backhaul povezivanja u 6G. Koristeći FSO, moguće je imati komunikaciju veoma velikog dometa čak i na udaljenosti većoj od 10.000 km. FSO podržava fronthaul/backhaul vezu velikog kapaciteta za udaljena i ne-udaljena područja, kao što su more, svemir, podvodna, izolovana ostrva; FSO takođe podržava mobilnu BS konekciju. FSO fronthaul/backhaul je uobičajen problem u 5G i 6G mrežama. Međutim, FSO je kritičniji u 6G jer zahteva veći kapacitet fronthaul/backhaul konekcije i biće mu potreban veći broj daljinskog povezivanja u poređenju sa 5G. FSO komunikacija može da podrži obe funkcije i postala je suštinski problem za 6G komunikacioni sistem za unapređenje uMUB i uHSLC usluga. LD predajnik proizvodi uske snopove fokusirane svetlosti. Ovi snopovi se koriste za uspostavljanje komunikacionih veza od tačke do tačke visoke brzine prenosa podataka između predajnika i prijemnika. FSO sistemi koriste lasersku tehnologiju za prenos signala. Komunikacija na daljinu je moguća zbog optičkog oblikovanja zraka u FSO sistemima. FSO/RF hibridni sistem će biti jedna od kritičnih karakteristika FSO baziranog fronthaul/backhaul povezivanja u 6G da bi se prevazišla ograničenja atmosferskih efekata [3].

Masivni MIMO i inteligentne reflektirajuće površine: Masivna MIMO tehnologija će biti ključna u 6G sistemu za podršku uHSLC, mMTC i uHDD uslugama. Jedan od osnovnih načina za poboljšanje spektralne efikasnosti je primena MIMO tehnike. Kada se MIMO tehnika razvije, razvija se i spektralna efikasnost. Stoga će masivni MIMO biti integralni i za 5G i za 6G sisteme zbog potrebe za boljom spektralnom i energetskom efikasnošću, većim brzinama podataka i višim frekvencijama. U poređenju sa 5G, očekujemo prelazak sa tradicionalnog masivnog MIMO-a na IRS u 6G bežičnim sistemima kako bismo ponudili velike površine za bežične komunikacije i heterogene uređaje. IRS je najnovija hardverska tehnologija koja ima ogroman potencijal za energetski efikasnu zelenu komunikaciju. Takođe je poznat kao meta-površina, sastoji se od mnogih reflektujućih diodnih jedinica koje mogu da reflektuju bilo koje upadne elektromagnetne signale sa podesivim faznim pomerajem. Inteligentne površine koje se mogu rekonfigurisati su predviđene kao masivni MIMO 2.0 u 6G. Ovi materijali mogu da integrišu modulaciju indeksa radi povećanja spektralne efikasnosti u 6G mrežama. Gradijentno spuštanje i frakciono programiranje značajno optimizuju inteligentne površinske fazne pomake i snagu prenosa, respektivno. Sa tim podesivim reflektovanim fazno pomerenim signalom i prenošenim signalom, možemo se poboljšati i energetska efikasnost sistema. Ova tehnologija će se smatrati odličnim rešenjem za maksimizovanje brzine prenosa podataka i minimizovanje snage prenosa u nadolazećim 6G mrežama [34 - 36].

Blockchain: Blockchain je suštinska tehnologija za upravljanje masivnim podacima u budućim komunikacionim sistemima. Blockchains su samo jedan oblik tehnologije distribuirane knjige. Distribuirana knjiga je baza podataka koja je distribuirana preko brojnih čvorova ili računarskih uređaja. Svaki čvor replicira i čuva identičnu kopiju knjige. Peer-to-peer mreže upravljaju lancima blokova. Može postojati bez kontrole od strane centralizovanog organa ili servera. Podaci na blokčejnu se skupljaju i strukturiraju u blokove. Blokovi su povezani i zaštićeni kriptografijom. Blokčejn je u suštini savršena dopuna masivnom IoT-u sa poboljšanom bezbednošću, privatnošću, interoperabilnosti, pouzdanošću i skalabilnošću. Stoga će tehnologija blockchain-a obezbediti nekoliko mogućnosti, kao što su interoperabilnost među uređajima, sledljivost masivnih podataka, autonomne interakcije različitih IoT sistema i pouzdanost za masovnu povezanost 6G komunikacionih sistema kako bi se postigao cilj uHSLC usluge. Blockchain gradi poverenje između umreženim aplikacijama, poništavajući potrebu za pouzdanim posrednicima. Integralne karakteristike blockchaina, kao što su decentralizovana otpornost na neovlašćeno korišćenje i tajnost, stvaraju priliku da ga učine idealnim za brojne aplikacije u 6G komunikaciji. On stvara siguran i proverljiv pristup za upravljanje spektrom uspostavljanjem transparentnosti, verifikovanih transakcija i sprečavanja neovlašćenog pristupa. Blockchain kombinuje distribuiranu mrežnu strukturu, mehanizam konsenzusa i naprednu kriptografiju kako bi predstavljao obećavajuće karakteristike koje nisu dostupne u postojećim strukturama. Distribuirana priroda eliminiše problem jedne tačke kvara i povećava bezbednost. Glavni izazov blockchain umrežavanja u 5G je propusna moć (10~1000 transakcija u sekundi). Još jedan izazov je potražnja za lokalnom i međunarodnom standardizacijom i regulisanjem masovnog usvajanja blokčejna u 5G. Ipak, 5G razmatra pitanje glatke interoperabilnosti između različitih blokčejn

platformi. Ova nekoliko ograničenja se mogu ublažiti u 6G korišćenjem konsenzusnih algoritama, primenom nove blokčejn arhitekture i tehnika deljenja, i povećanjem veličine bloka mreže [3].

3D umrežavanje: 6G sistem će integrisati zemaljsku i vazdušnu mrežu kako bi podržao komunikaciju za korisnike u vertikalnom proširenju. 3D BS se obezbeđuju preko satelita u niskoj orbiti i bespilotnih letelica. Dodavanje novih dimenzija u smislu nadmorske visine i srodnih stepena slobode čini 3D povezivanje znatno drugačijim od konvencionalnih 2D mreža. 6G heterogene mreže će obezbediti 3D pokrivenost. Decentralizovane 6G mreže sa integracijom zemaljskih mreža, UAV mreža i satelitskih sistema zaista ostvaruju globalnu pokrivenost i strog besprekoran pristup, čak i za okeanske i planinske oblasti.

Kvantne komunikacije: Nenadgledano učenje pojačanja u mrežama obećava u kontekstu 6G mreža. Pristupi učenju pod nadzorom neće biti izvodljivi za označavanje velikih količina podataka generisanih u 6G. Za učenje bez nadzora nije potrebno etiketiranje. Dakle, ova tehnika se može koristiti za autonomnu izgradnju reprezentacija složenih mreža. Kombinovanjem učenja uz pomoć i učenja bez nadzora, moguće je upravljati mrežom na istinski autonoman način. Napredne kvantne računarske i kvantne komunikacione tehnologije biće primenjene kako bi se obezbedila rigorozna bezbednost od različitih sajber-napada u 6G. Nova paradigma kvantnog računarstva, kvantnog mašinskog učenja i njihove sinergije sa komunikacionim mrežama smatra se osnovnim pokretačem 6G. Eskalacija kvantnog računarstva i inženjeringa je potrebna za rešavanje složenih zadataka. Kvantne komunikacije nude snažnu sigurnost primenom kvantnog ključa zasnovanog na kvantnoj teoremi bez kloniranja i principu neizvesnosti. Informacija je kodirana u kvantnom stanju pomoću fotona ili kvantnih čestica i ne može im se pristupiti ili klonirati a da se ne menjaju zbog kvantnih principa. Štaviše, kvantne komunikacije poboljšavaju propusnost zbog prirode superpozicije kubita [34 - 36].

Bespilotne letelice: UAV ili dronovi su suštinski element u 6G bežičnim komunikacijama. U mnogim slučajevima, bežično povezivanje velike brzine prenosa podataka je obezbeđeno korišćenjem UAV tehnologije. BS entiteti su instalirani u bespilotnim letelicama da obezbede mobilnu povezanost. UAV ima određene karakteristike koje se ne mogu naći u fiksnim BS infrastrukturama, kao što su jednostavno postavljanje, jake veze u liniji vidljivosti i stepeni slobode sa kontrolisanom mobilnošću. U vanrednim situacijama, kao što su prirodne katastrofe, implementacija zemaljske komunikacione infrastrukture nije ekonomski izvodljiva, a ponekad nije moguće pružiti bilo kakvu uslugu u nestabilnim sredinama. Bespilotne letelice mogu lako da se nose sa ovim situacijama. UAV će biti nova paradigma u oblasti bežične komunikacije. Ova tehnologija može da olakša osnovne zahteve bežičnih mreža koje su uMUB, uHSLC, mMTC i uHDD. Bespilotne letelice se takođe mogu koristiti u nekoliko namena, kao što su jačanje mrežne povezanosti, otkrivanje požara, hitne službe u slučaju katastrofa, bezbednost i nadzor, praćenje zagađenja, praćenje parkiranja, praćenje nesreća i još mnogo toga. Zbog toga je UAV tehnologija prepoznata kao jedna od osnovnih tehnologija za 6G komunikaciju. Razmatrana je o povratna komunikacija omogućena preko UAV koja može pomoći u nekoliko komunikacionih zadataka (npr. snabdevanje ambijentalnom energijom i stvaranje povoljnih uslova kanala za udaljene senzore). Kombinacija nekoherentnih šema detekcije i UAV aplikacija može stvoriti vazdušne

interfejse pogodne za 6G bežične mreže. Štaviše, robusna alokacija resursa zasnovana na dubokom učenju može biti odličan izbor za realizaciju UAV za 6G inteligenciju [40].

Komunikacije bez ćelija: Čvrsta integracija više frekvencija i različitih komunikacionih tehnologija biće ključna u 6G sistemima. Kao rezultat toga, korisnik će se neprimetno kretati sa jedne mreže na drugu mrežu bez potrebe za bilo kakvim ručnim konfigurisanjem uređaja. U 6G, koncept konvencionalne ćelijske i ortogonalne komunikacije biće pomeren na komunikaciju bez ćelija i neortogonalnu komunikaciju. Najbolja mreža se automatski bira među dostupnim komunikacionim tehnologijama. Ovo će probiti granice koncepta ćelija u bežičnim komunikacijama. Trenutno, kretanje korisnika iz jedne ćelije u drugu uzrokuje previše primopredaja u gustim mrežama. Takođe, to uzrokuje neuspešne primopredaje, kašnjenja pri predaji, gubitke podataka i efekat ping-ponga. 6G komunikacije bez ćelija će prevazići sve ovo i obezbediti bolji QoS. Komunikacija bez ćelija biće postignuta višestrukim povezivanjem i višeslojnim hibridnim tehnikama i različitim i heterogenim radio uređajima u samim uređajima.

Integracija bežičnih informacija i prenosa energije: VIET u komunikaciji će biti jedna od najinovativnijih tehnologija u 6G. VIET koristi ista polja i talase kao i bežični komunikacioni sistemi. Senzori i pametni telefoni se pune korišćenjem bežičnog prenosa energije tokom komunikacije. VIET je obećavajuća tehnologija za produženje životnog veka bežičnih sistema za punjenje baterija. Dakle, uređaji bez baterija će biti podržani u 6G konekcijama. Štaviše, odeća koja omogućava rad u blizini polja stvara mogućnost za kontinuirani fiziološki nadzor sa senzorima bez baterija u medicinskom sektoru.

Integracija sensinga i komunikacije: Ključni pokretač za autonomne bežične mreže je sposobnost da se kontinuirano osete dinamički promenljiva stanja okruženja i razmenjuju informacije između različitih čvorova. U 6G, sensing će biti čvrsto integrisan sa komunikacijom za podršku autonomnim sistemima. Ogroman broj senzorskih objekata, komplikovani komunikacioni resursi, računarski resursi na više nivoa i keš resursi na više nivoa su pravi izazovni faktori za postizanje ove integracije.

Integracija pristupno-backhaul mreža: Gustina pristupnih mreža u 6G će biti ogromna. Svaka pristupna mreža se odnosi na backhaul konekciju, kao što su optička vlakna i FSO mreže. Pristupne i backhaul mreže su čvrsto integrisane za rukovanje većinom pristupnih mreža.

Dinamičko rezanje mreže: Dinamičko rezanje mreže omogućava mrežnom operateru da dozvoli namenskim virtuelnim mrežama da podrže optimizovanu isporuku bilo koje usluge prema širokom spektru korisnika, vozila, mašina i industrija. To je jedan od bitnih elemenata za upravljanje kada su mnogi korisnici povezani na veliki broj heterogenih mreža u komunikacionim sistemima od 5 GB. Softverski definisano umrežavanje i virtuelizacija mrežnih funkcija su osnovne tehnike koje omogućavaju implementaciju dinamičkog presecanja mreže. Ovo utiče na paradigmu računarstva u oblaku u upravljanju mrežom, tako da mreža ima centralizovani kontroler koji dinamički upravlja i upravlja protokom saobraćaja i orkestrira alokaciju mrežnih resursa za optimizaciju performansi [3], [40].

Holografsko formiranje snopa: Oblikovanje snopa je postupak obrade signala kojim se niz antena može upravljati za prenos radio signala u određenom pravcu. To je podskup pametnih

antena ili naprednih antenskih sistema. Tehnika formiranja snopa ima nekoliko prednosti, kao što su visok odnos signal-šum, sprečavanje i odbijanje smetnji i visoka efikasnost mreže. Holografsko formiranje snopa (HBF) je nova metoda za formiranje snopa koja se znatno razlikuje od MIMO sistema jer koristi softverski definisane antene. HBF je povoljan pristup u 6G za efikasan i fleksibilan prenos i prijem signala u komunikacionim uređajima sa više antena. U oblasti bezbednosti fizičkog sloja, bežični prenos energije, povećana pokrivenost mreže i pozicioniranje HBF-a mogu imati značajne uloge.

Analitika velikih podataka: Analitika velikih podataka je složen proces za analizu različitih velikih skupova podataka ili velikih podataka. Ovaj proces otkriva informacije, kao što su skriveni obrasci, nepoznate korelacije i sklonosti kupaca, kako bi se osiguralo sveobuhvatno upravljanje podacima. Veliki podaci se prikupljaju iz širokog spektra izvora, kao što su video snimci, društvene mreže, slike i senzori. Ova tehnologija se široko koristi za rukovanje velikom količinom podataka u 6G sistemima. Očekuje se da će se izgledi za korišćenje ogromne količine podataka, analitike velikih podataka i alata za duboko učenje unaprediti 6G mreže putem automatizacije i samooptimizacije. Jedan primer primene analitike velikih podataka je smanjenje E2E kašnjenja. Kombinacija mašinskog učenja i velikih podataka će odrediti najbolji put za korisničke podatke kroz prediktivnu analitiku kako bi se smanjilo E2E kašnjenje u 6G sistemima.

Komunikacija sa povratnim rasejanjem: Bežična komunikacija sa povratnim rasejanjem ambijenta omogućava interakciju između dva uređaja bez baterije korišćenjem postojećih RF signala kao što su ambijentalna televizija i ćelijski prenosi. Razumna brzina prenosa podataka može se postići u kratkom opsegu komunikacije. Mali signali za praćenje mogu se preneti pomoću senzora koji neće trošiti energiju. Čvorovi bez baterija u komunikacionim sistemima za povratno raspršivanje čine ga potencijalnim kandidatom za masovno povezivanje u budućim 6G mrežama. Međutim, postoji kritičan zahtev za dobijanje tačne faze i stanja kanala na mrežnim čvorovima u takvim sistemima. Nekoherentna komunikacija se može smatrati obećavajućim sredstvom za ispunjavanje ovih zahteva. Štaviše, nekoherentna komunikacija povratnog rasejanja može da obezbedi optimizovano korišćenje resursa i poboljšanje usluga u mrežnim uređajima [40].

Proaktivno keširanje: Masovno postavljanje mreža malih ćelija za 6G jedan je od kritičnih razloga za značajno poboljšanje kapaciteta mreže, pokrivenosti i upravljanja mobilnošću. Ovo će prouzrokovati ogromno preopterećenje saobraćaja na *downlink*-u na BS-a. Proaktivno keširanje postalo je bitno rešenje za smanjenje kašnjenja pristupa i rasterećenja saobraćaja, poboljšavajući kvalitet korisničkog iskustva. Međutim, opsežna istraživanja o zajedničkoj optimizaciji proaktivnog keširanja sadržaja, upravljanja smetnjama, inteligentne šeme kodiranja i tehnika planiranja su od suštinskog značaja za 6G komunikaciju.

Računarstvo na ivičnim uređajima za mobilne uređaje: Zbog distribuiranih masivnih aplikacija u oblaku, mobilno-poboljšano ivično računarstvo (MEEC) postaje ključni deo 6G tehnologija. Implementacija MEEC-a zasnovanog na veštačkoj inteligenciji dovešće računanje na analitiku velikih podataka i kontrolu sistema do ivice. *Edge* inteligencija je paradigma u nastajanju koja ispunjava stimulativne zahteve predstojećih sveprisutnih scenarija usluga heterogenog računanja, komunikacije i visokodimenzionalnih inteligentnih konfiguracija.

Različiti tipovi 6G usluga mogu da karakterišu gore predstavljene nove tehnologije. Tabela 5 prikazuje 6G tehnologije opisane pod uMUB, uHSLC, mMTC i uHDD uslugama. Svaka tehnika može da unapredi jednu ili više usluga.

2.21. Analiza 6G arhitekture

Peta generacija mobilnih bežičnih komunikacija (5G) počela je da primenjuje principe servisno orijentisane arhitekture (SOA), udaljavajući se od tradicionalnog modela jedan klijent – jedan server. Slično tome, mnogi internet servisi su evoluirali sa monolitnih rešenja ka mikroservisima, omogućavajući saradnju kako na nivou aplikacija, tako i na nivou mrežnih usluga, dok je pružanje usluga prešlo sa namenski opremljenih servera na virtuelizovane cloud infrastrukture. Ipak, ovaj pristup bio je ograničen na kontrolnu ravan i osnovnu mrežu (CN), uz upravljanje putem arhitekture zasnovane na servisima (SBMA), bez potpune implementacije krajnje do krajnje servisno-orijentisane arhitekture (SBA), pri čemu je i dalje korišćen namenski hardver na logički odvojenim čvorovima radio pristupne mreže (RAN). Sa 6G, očekuje se da će SBA biti proširena kroz celu mrežu i sve njene ravni, uključujući CN, RAN i terminale, što će omogućiti značajno veću primenu i operativnu fleksibilnost, podržavajući koncept „mreže mreža“ i sisteme za lakšu integraciju podsistema i skalabilnost.

6G arhitektura bi trebalo da bude fleksibilna i efikasna kako bi omogućila laku integraciju svega, tj. mrežu mreža, uključujući čvorove koji koriste frekvencije iznad 100 GHz, zajedničku komunikaciju i sensing, NTN i zemaljsku komunikaciju, kao i da obuhvata nove alate za omogućavanje AI-a kao lokalne i distribuirane računarske sposobnosti.

Integracija NTN komponenti (npr. LEO, MEO, GEO i ukupna vazdušna/svemirska sredstva međusobno povezana) nudi proširenu i dodatnu pokrivenost za povezivanje, kao i distribuirane usluge skladištenja i računarstva. Da bi se realizovala nova pametna usluga i platforma za povezivanje u svim vertikalama i povezanim lancima vrednosti, arhitektura mora biti u stanju da integriše kritične mreže sa pouzdanošću, dostupnošću i otpornošću izvan 5G URLLC-a, koji treba da uzme u obzir fleksibilno obezbeđivanje infrastrukture za garancije usluga od kraja do kraja [3].

2.22. Glavni principi budućeg sistema mobilnih komunikacija

Glavni principi budućeg sistema mobilne komunikacije trebalo bi da budu sposobnost da se nosi sa višim stepenom fleksibilnosti i funkcionalnosti. Ovo će omogućiti 6G da podrži nove slučajeve upotrebe sa namenskim/posebnim mrežama/vertikalama, dok nudi i javne i privatne pametne mreže i usluge u mešovitim okruženjima podržanim naprednim i prilagodljivim funkcionalnostima. Namenski komunikacioni koncepti se razvijaju za širok spektar oblasti

primene (npr. poslovne vertikale ili usluge) kao što su logistika, proizvodnja, poljoprivreda, energetske mreže i digitalne škole. Arhitektonska rešenja za povećanu fleksibilnost i funkcionalnost ne bi trebalo da povećavaju ukupnu složenost različitih slojeva mreže i sistemskih funkcija. Dalje, potrebno je smanjiti vidljivu složenost za korisnika/programera/aplikaciju tako da krajnji korisnik, programer i aplikacija mogu da koriste jednostavne primitive sa jasnim karakteristikama i uslovima greške, bez ograničavanja fleksibilnosti i funkcija. Ovo će zahtevati softverizaciju, potpunu arhitekturu zasnovanu na oblaku i dalje razvijenu SBA, kao i razvrstavanje softvera i hardvera.

Mogućnosti koje su ranije bile dostupne samo van mreže putem cloud rešenja sada će biti integrisane u 6G sistem, kao što je mogućnost obrade i skladištenja podataka (računanje i prosleđivanje), kao i omogućavanje upotrebe AI svuda u mreži, gde može biti od koristi. To jest, 6G mora da podržava okvir za efikasno prikupljanje potrebnih informacija za učenje, odnosno agregaciju podataka. Princip „AI svuda“ će se koristiti za poboljšanje performansi mreže (UE predviđanja, balansiranje opterećenja, itd.), ali i za pružanje AI-kao-usluge (AIaaS) u federalnoj mreži, tako da korisnik može da dobije AI mogućnosti kupovinom usluge veštačke inteligencije i dostavljanjem relevantnih podataka ovoj drugoj. Još jedan važan princip je pouzdanost. Pošto MBB postaje sve kritičniji za društvo i da bi mogao da podrži nove vertikale, arhitektura 6G mora da podržava pouzdanost, dostupnost i otpornost izvan 5G, kako u pogledu usluga tako i u pogledu pružanja infrastrukture. Vezano za pouzdanost je digitalna inkluzija i globalna pokrivenost uslugama. Arhitektura 6G će omogućiti pokrivenost udaljenih mesta, na primer, u ruralnim oblastima, transport preko okeana ili ogromnih kopnenih masa, omogućavajući nove usluge i biznise koji će promovisati ekonomski rast zasnovan na konvergenciji različitih ranije segmentiranih komunikacionih sredstava, na primer, lokalno umrežavanje, mesh mreže, PAN, NTN i mobilni sistemi u jednu apstrakciju komunikacionog sistema dostupna i upotrebljiva sa oba krajnja uređaja kao i sa uključenih Cloud platformi [3], [40].

Potrebno je rešiti nekoliko tehničkih problema da bi se uspešno primenili 6G komunikacioni sistemi. U nastavku se ukratko govori o nekoliko mogućih zabrinutosti.

Visoka propagacija i atmosferska apsorpcija THz: Visoke THz frekvencije obezbeđuju visoke brzine prenosa podataka. Međutim, THz opsezi moraju da prevaziđu značajan izazov za prenos podataka na relativno velikim udaljenostima zbog velikog gubitka širenja i karakteristika atmosferske apsorpcije. Potreban je novi dizajn za arhitekturu primopredajnika za THz komunikacione sisteme. Primopredajnik mora biti u stanju da radi na visokim frekvencijama, takođe je potrebno obezbediti punu upotrebu veoma široko dostupnih propusnih opsega. Minimalno pojačanje i efektivna površina antena sa različitim THz opsegom je još jedan izazov THz komunikacije. Zabrinutost za zdravlje i bezbednost u vezi sa komunikacijama u THz opsegu takođe treba rešiti.

Složenost u upravljanju resursima za 3D umrežavanje: 3D umrežavanje se proširilo u vertikalnom pravcu. Dakle, dodata je nova dimenzija. Štaviše, višestruki protivnici mogu presresti legitimne informacije, što može značajno pogoršati ukupne performanse sistema. Zbog toga su od

suštinskog značaja nove tehnike za upravljanje resursima i optimizaciju za podršku mobilnosti, protokol rutiranja i višestruki pristup. Za planiranje je potreban novi dizajn mreže.

Heterogena hardverska ograničenja: U 6G će biti uključen veliki broj heterogenih tipova komunikacionih sistema, kao što su frekventni opsezi, komunikacione topologije, isporuka usluga i tako dalje. Štaviše, pristupne tačke i mobilni terminali će se značajno razlikovati u podešavanjima hardvera. Masivna MIMO tehnika će biti dodatno nadograđena sa 5G na 6G, a to može zahtevati složeniju arhitekturu. Takođe će zakomplikovati dizajn komunikacionog protokola i algoritma. Međutim, mašinsko učenje i AI će biti uključeni u komunikaciju.

Štaviše, dizajn hardvera za različite komunikacione sisteme je različit. Nenadgledano učenje i učenje sa pojačanjem takođe može stvoriti složenost u implementaciji hardvera. Shodno tome, biće izazov integrisati sve komunikacione sisteme u jednu platformu.

Autonomni bežični sistemi: 6G mreža će pružiti potpunu podršku sistemima automatizacije kao što su autonomno vozilo, UAV-ovi i Industrija 4.0 zasnovana na veštačkoj inteligenciji. Kako bi napravili autonomne bežične sisteme, potrebno je imati konvergenciju mnogih heterogenih podsistema, kao što su autonomno računarstvo, interoperabilni procesi, sistem sistema, mašinsko učenje, autonomni oblak, mašine sistema i heterogeni bežični sistemi. Dakle, ukupan razvoj sistema postaje složen i izazovan. Na primer, razvoj potpuno autonomnog sistema za vozilo bez vozača biće mnogo izazovniji jer istraživači 6G treba da dizajniraju potpuno automatizovana samovozeća vozila koja imaju bolje rezultate od vozila koja kontrolišu ljudi.

Modelovanje frekvencija ispod mm Talasa (THz): Karakteristike prostiranja mm Talasa i sub-mm Talasa (THz) su podložne atmosferskim uslovima; stoga se vide apsorptivni i disperzivni efekti. Klimatski uslovi se često menjaju i stoga su veoma nepredvidivi. Dakle, modelovanje kanala ovog opsega je relativno složeno, a ovaj opseg nema savršen model kanala [61].

Mogućnosti uređaja: 6G sistem će obezbediti nekoliko novih funkcija. Uređaji, kao što su pametni telefoni, treba da imaju mogućnost da se nose sa novim funkcijama. Posebno je izazovno podržati Tbps protok, AI, XR i integrisani sensing sa komunikacionim funkcijama pomoću pojedinačnih uređaja. 5G uređaji možda neće podržavati neke od 6G funkcija, a poboljšanje mogućnosti 6G uređaja može takođe povećati troškove. Očekuje se da će broj uređaja za 5G biti milijarde. Kada se komunikaciona infrastruktura pomeri sa 5G na 6G, kompatibilnost tih 5G uređaja sa 6G je kritično pitanje. Ova kompatibilnost krajnjim korisnicima olakšava upotrebu i štedi mnogo novca. Zbog toga 6G treba da da prioritet integrisanim komunikacionim računarskim uređajima, poboljšanju performansi računara i tako dalje na osnovu tehnološke kompatibilnosti sa 5G.

Backhaul povezivost velikog kapaciteta: pristupne mreže u 6G će imati veoma veliku gustinu. Štaviše, ove pristupne mreže su raznovrsne i rasprostranjene na geografskoj lokaciji. Svaka od ovih pristupnih mreža će podržavati povezivanje sa veoma velikom brzinom podataka za različite tipove korisnika. Backhaul mreže u 6G moraju da obrađuju ogromne količine podataka za povezivanje između pristupnih mreža i osnovne mreže da bi podržale usluge visoke brzine prenosa podataka na nivou korisnika; u suprotnom će se stvoriti usko grlo. Optička vlakna i FSO

mreže su moguća rešenja za backhaul povezivanje velikog kapaciteta; stoga, svako poboljšanje kapaciteta ovih mreža predstavlja izazov za eksponencijalno rastuće zahteve za podacima 6G.

Upravljanje spektrom i smetnjama: Zbog oskudice resursa spektra i problema sa smetnjama, neophodno je efikasno upravljati spektrom 6G, uključujući strategije deljenja spektra i inovativne tehnike upravljanja spektrom. Efikasno upravljanje spektrom je neophodno za postizanje maksimalnog korišćenja resursa uz maksimizaciju QoS-a. Kod 6G, istraživači treba da se pozabave pitanjima kao što su kako deliti spektar i kako upravljati mehanizmima spektra u heterogenim mrežama koje sinhronizuju prenos na istoj frekvenciji. Istraživači takođe treba da istraže kako se smetnje mogu poništiti korišćenjem standardnih metoda poništavanja smetnji, kao što su paralelno poništavanje smetnji i uzastopno poništavanje smetnji.

Upravljanje snopom u THz komunikacijama: Oblikovanje snopa kroz velike MIMO sisteme je obećavajuća tehnologija za podršku komunikacijama visoke brzine podataka. Međutim, upravljanje snopom u pod-mm talasu, odnosno u THz opsegu je izazovno zbog karakteristika propagacije pod-mm talasa. Stoga će efikasno upravljanje snopom protiv nepovoljnih karakteristika propagacije biti izazov za masivne MIMO sisteme. Štaviše, za besprekornu primopredaju, takođe je važno efikasno izabrati optimalni snop u sistemima za vozila velike brzine [61].

Bezbednost fizičkog sloja: 6G mreže su usmerene na čoveka jer su komunikacije usmerene na čoveka najvažnija među mnogim 6G aplikacijama. Shodno tome, bezbednost, tajnost i privatnost treba da budu ključne karakteristike 6G mreža. 5G sistemi i dalje imaju nekoliko bezbednosnih izazova u smislu decentralizacije, transparentnosti, interoperabilnosti podataka i ranjivosti mrežne privatnosti. Kod 6G, trenutne metode regulacije i procesa privatnosti i bezbednosti nisu dovoljni da održe fizičku bezbednost mreže. Tradicionalni algoritmi za šifrovanje zasnovani na Rivest–Shamir–Adleman (RSA) kriptosistemima sa javnim ključem obezbeđuju sigurnost i tajnost prenosa u 5G mrežama. Međutim, RSA kriptosistemi su postali nesigurni pod pritiskom Big Data i AI tehnologija.

Kao posledica toga, treba razviti novu tehniku privatnosti fizičkog sloja za buduću 6G komunikaciju zasnovanu na velikim podacima i veštačkoj inteligenciji. Bezbednosni dizajn fizičkog sloja i bezbedne interakcije sa gornjim slojevima su obavezni u 6G. Tehnologije fizičke bezbednosti i distribucija kvantne ključeve preko VLC-a su vitalna rešenja za obezbeđivanje bezbednosti u 6G. Očekuje se da će kvantno računarstvo velikih razmera biti povećano zbog masovnog razvoja infrastrukture ivica i oblaka, asimetrična kriptografija može povećati njen istraživački interes u ovoj oblasti. Korišćenje mašinskog učenja u automatizovanoj bezbednosti u oblasti virtuelizacije i softvera mreže će pomoći da se napadi otkriju i spreče na optimalan način.
Planiranje ekonomske perspektive: Ekonomska perspektiva je takođe važna za primenu 6G komunikacije. Nova implementacija 6G će uzrokovati znatne troškove mrežne infrastrukture. Međutim, transformacija 5G sistema u 6G sistem i pravilno planiranje mogu smanjiti troškove. Dakle, potencijal za deljenje infrastrukture, podataka i spektra mora biti na odgovarajući način istražen kako bi 6G mreža bila isplativa. Interakcija između očekivanih tehnologija koje omogućavaju 6G, aplikacija, regulacije spektra i poslovnih modela, kao i glatka transformacija sa

5G na 6G, veoma je ključna za razvoj isplativih 6G sistema. Predložena rešenja za smanjenje troškova implementacije i razvoj dugoročno održivih poslovnih modela za deljenje mrežne infrastrukture, deljenje javne infrastrukture, deljenje radio spektra i deljenje podataka mogu biti veoma korisni za očekivane 6G komunikacione sisteme. Njihov predloženi metod može da obezbedi ukupno smanjenje od 40–60% troškova primene u poređenju sa predviđenim troškovima. Stoga, moguće rešenje za smanjenje troškova implementacije može se označiti kao deljenje infrastrukture, neutralni hosting i licenciranje spektra zasnovano na lokaciji [3], [60].

U infrastrukturnoj dimenziji, želja da se obezbede raznovrsnije usluge i povećana svest o održivosti („zelena IKT“), zajedno, zahtevaju radikalno povećanje stepena slobode i fleksibilnosti (skupe) nacionalne infrastrukture. Ponovna upotreba i univerzalnost biće ključni za buduću infrastrukturu. Stoga očekujemo da će se infrastruktura razvijati u dva pravca:

1) Diverzifikacija tipova razmatranih resursa u infrastrukturi ka mrežnim, skladišnim i računarskim resursima različitih realizacija, u rasponu od klasičnih fizičkih čvorova i namenskih HV akceleratora do virtuelnih instanci (npr. rezervisanih i korišćenih kao usluga).

2) Proširenje opsega virtuelizacije i njenih mogućnosti: očekuje se da se virtuelizacija infrastrukture i programiranje proširi na sve raspoložive resurse, odnosno, koristeći trenutnu taksonomiju, trebalo bi da se širi iz CN u RAN, uključujući bazne stanice, čvorove i terminale. Osim toga, buduća virtuelizacija bi trebalo da sadrži mogućnosti fuzije, odnosno trebalo bi da postane sposobna da konačno izađe iz granica virtuelizacije po čvoru do besprekorne virtuelizacije sa više čvorova ili podsistema.

Ova dva pravca će imati potencijal da transformišu postojeće fiksne IKT infrastrukture u dinamičke kompozicije različitih vrsta resursa. Budući resursi će biti heterogeniji (i računarski i mrežni), trebalo bi ih shvatiti kao potencijalno prolazne (virtuelne/fizičke, stabilne/nestabilne, stacionarne/mobilne, itd.) i raštrkane preko granica fizičkog domena (udaljeno/lokalno) i srodne dimenzije primene (npr. prolazna priroda NTN/Aerial sistema). Opseg sastava resursa koji formira upotrebljivu infrastrukturu će proširiti dalje downlinkove ka terminalima, čime će omogućiti besprekorno ugrađivanje IKT sistema u njihova fizička okruženja (kroz kontrolisano izlaganje I/O, senzora i aktuatora, na primer, u terminalima). Vertikalno, da bi se podržala ukupna skalabilnost sistema, ključno je apstrahovati čitave podsisteme potencijalno visoke složenosti kroz relativno jednostavne apstrakcije čvorova i usluga kako bi se omogućilo besprekorno deljenje resursa i koordinacija između heterogenih sistema kao što su, na primer, zemaljski i NTN, transport i računarske domene, centre podataka i RAN, korisničke terminale i operaterske mreže, uz garantovanje njihovog nezavisnog razvoja i evolucije.

U budućnosti, infrastruktura koju koriste mobilni telekomunikacioni sistemi biće sama po sebi fleksibilna usluga na zahtev. Ova situacija zahteva prodornu, izuzetno sposobnu kontrolu resursa, u poređenju sa npr. posao koji obavlja IETF ANIMA VG, sposoban da poveže (zalepi) i dosegne sve ove tipove resursa, bez obzira na njihovu prirodu, geografsku i topološku poziciju, da robusno isporuči podatke ili komande unutar njihovih semantičkih ograničenja između ovih drugih i da dinamički predstavi ove resurse kao jednostavne i stabilne apstrakcije. Koristeći ovaj početni lepak (prikazan kao „Jedinstvena upravljivost“), takve nove infrastrukture postaće platforme pune

usluge, izvorno nudeći mogućnosti izvan pukog transporta sa kraja na kraj. Takve mogućnosti će se kretati od višestranačkog transporta koji je svestan QoS-a za efikasno pozivanje usluga do Cloud-a za skladištenje i računarske primitive, takođe poznate kao infrastruktura ili platforma kao usluga (IaaS ili PaaS); oni će pokriti usluge programiranja resursa i obezbediti npr. AIaaS. Takav nivo fleksibilnosti treba da bude obezbeđen po veoma niskoj ceni u poređenju sa savremenim alternativama. Ovo će zahtevati da se istraže nove tehnologije za paradigme upravljanja transportom i infrastrukturom, što će zahtevati napredak u [37], [72], [73]:

1) nova šema ravni kontrole resursa sa mehanizmima signalizacije, transporta, rutiranja i distribucije informacija kako bi se izborila sa jakom heterogenošću u gustini mreže, specifičnostima i dinamici čvorova;

2) integraciju odgovarajućih šema distribuiranih sigurnih proračuna kako bi se ograničile pretpostavke o poverenju u odgovarajući izvršni sistem,

3) autonomno i distribuirano rešavanje konflikata, sprovođenje ispravnosti i šeme distribuiranog raspoređivanja resursa za povećanje efikasnosti resursa bez ugrožavanja složenosti i skalabilnosti;

4) distribuirana veštačka inteligencija, da bi se izbegle pojedinačne tačke kvara, da bi se učenje približilo izvorima događaja i da bi se mogla iskoristiti dostupna, ali raštrkana računarska snaga. Koristeći rezultujuće mehanizme i rešenja, Unified Controllabiliti će stvoriti utisak elastične end-to-end infrastrukture sa stabilnim interfejsima sličnim API-ju za transport, računarstvo, AI instrumentacije i programiranje različitih apstrakcija, kvaliteta i nivoi automatizacije do servisnog sloja (i u razvojnim i u runtime okruženjima).

Buduća arhitektura mobilnog sistema sama po sebi će biti pod uticajem zahteva za novim uslugama i očekivanih novih mogućnosti i potiskivanja programabilnog elastičnog sistema koji se nalazi ispod nje.

Očekuje se pojava novih tipova funkcija unutar korisničke ravni (naročito, korisničke računske funkcije, API-ji koji se odnose na AI za pružaoce usluga i krajnje korisnike, API-ji za pozicioniranje, otkrivanje i orijentaciju), u kontrolnoj ravni (npr. kontrola računskih zadataka i alokacija, podataka ubačenih u AI modele) i u ravni upravljanja (mrežne operacije zasnovane na AI za operatere, programiranje zasnovano na namerama sa dobro definisanim povratnim vrednostima, napredovanje do novih interfejsa za lako proširenje pokretanja sistema kroz funkcije u vlasništvu korisnika, barem na nivou korisničke ravni). Budući mobilni sistem, uključujući sve ravni, radiće kao skup mikroservisa koji se razvija na vrhu sloja Unified Controllabiliti.

Fleksibilnost modernih infrastruktura će morati da se očuva i podrži u arhitekturi mobilnog sistema, koja je sada dodeljena kao lanac usluga, na primer, kao što je opisano od strane IETF SFC VG. Eksplicitno pominjanje čvorova (sa identitetima ili adresama) možda neće biti potrebno. Referentne tačke treba da predvide dinamičko otkrivanje mogućnosti i dobro definisane, ali proširive strukture podataka. Fiksne interfejse treba generalno zameniti logikom pozivanja usluge, bez propisivanja bilo kakvih krajnjih tačaka i bez previše jakih pretpostavki u vezi sa svojstvima izvršenja. Indirektne sposobnosti i paralelizam/konkurentnost treba uzeti u obzir svuda, bez ugrožavanja bezbednosti. Stoga, umesto oslanjanja na, na primer, eksplicitni ID, mere adresiranja

ili fizičkog razdvajanja za pozivanje, kontrolu pristupa zasnovanu na podacima i logiku transakcija, trebalo bi razmotriti dokaz o obilasku i posedovanju [3], [60], [70].

Uopšteno govoreći, stvarni mobilni sistem će sve više izgledati kao kompjuterski program koji se izvršava unutar programabilne infrastrukture. Koristeći programske jezike visokog nivoa, kompajlere i interpretatore, očekuje se da će izrazi zasnovani na namerama potreba i ograničenja usluga biti prevedeni u alokacije zasnovane na mikroservisima i podacima. Ovo poslednje će raditi (paralelno sa drugim alokacijama) u okviru vremena rada distribuiranog telekomunikacionog sistema obezbeđenog i podržanog od strane prethodno opisanog prožimajućeg sloja kontrole resursa.

Dok se funkcionalna svojstva generalno obezbeđuju unutar dodeljene mobilne usluge, između fleksibilne generičke IKT infrastrukture i usluga mobilnog sistema će pokrenuti pitanja u pogledu sprovođenja zahtevanih ekstrafunkcionalnih svojstava.

Kad god su dostupne namenske infrastrukturne odredbe, trebalo bi ih koristiti da bi se povećala efikasnost (npr. efikasnost energije ili računara korišćenjem namenskih HV akceleratora, visoka pouzdanost kroz alokaciju samo na pouzdane komponente ili bezbednost korišćenjem pouzdanih, proverenih komponenti). Međutim, da bi se održala univerzalnost infrastrukture, takve odredbe nikada ne bi trebalo da budu namenjene servisu i, generalno, izložene preko istog API-ja infrastrukture. Potrebna svojstva mobilnih usluga ne bi trebalo direktno da se prevedu na infrastrukturne zahteve, pošto su prevelika očekivanja prema infrastrukturi poznati faktor troškova i prepreka za primenu. Konkretno, predviđena podrška za kritične usluge ne bi trebalo da rezultira time da cela IKT infrastruktura postane kritična. Što je najvažnije, ovo se odnosi na pouzdanost, sigurnost, otpornost i svojstva privatnosti [60].

Da bi postale izvršne na različitim osnovnim sistemima bez ugrožavanja sopstvenih dodatnih funkcionalnih svojstava, dodeljene usluge bi trebalo da budu u stanju da sprovedu sve ovo poslednje dinamičkom procenom sposobnosti korišćenih infrastrukturnih delova i nadoknađivanjem nedostajućih odredbi sopstvenim, virtuelnim sredstvima. Takva sredstva uključuju dinamičko, kad god je potrebno, vođeno veštačkom inteligencijom, donošenje odluka i uvid u realizaciju usluga zasnovanih na oblaku i privatne sisteme za razmenu poruka od kraja do kraja. Bez obzira na to kako i gde se svojstva primenjuju, očekuje se transparentnost u realizaciji, odgovornost za radnje i eksplicitna upravljivost tokova podataka. Objašnjivi mehanizmi veštačke inteligencije su ključni zahtev.

U 6G očekuje se direktna integracija različitih resursa od umrežavanja do računanja i sensinga. Iz tog razloga, proširuje se opseg izvan RAN i CN na terminale i centre podataka i pastoji se na potpunoj svesnosti o resursima 6G sistemima od kraja do kraja. Na ovaj način, funkcionalnosti i usluge se mogu obezbediti kao mikroservis tamo gde je to potrebno, uz obezbeđivanje potpuno pouzdanih usluga [61], [70].

Početni napori na identifikaciji budućih potreba za uslugama za narednu deceniju, poput onih koje je ITU-T uradio sa Fokus grupom za mrežu 2030, podstakli su definisanje evolutivnih koraka iz 5G mreža koje se danas primenjuju. Komplementarno tome, počinju da se razvijaju rešenja izvan 5G uokvirena istraživačkim i inovacionim aktivnostima na različitim geografskim

područjima. Očekuje se da će ova rana iskustva, zajedno sa drugim industrijskim inicijativama koje su nedavno pokrenute, pružiti vredne doprinose telima za standardizaciju koja podstiču razvoj naprednih 6G rešenja. Zanimljivo je da je ITU-R upravo formirao grupu za viziju o IMT-u prema 2030. i dalje (6G) sa ciljem da završi svoj zadatak do kraja 2023. godine [3].

Sa stanovišta razvoja 3GPP standarda, još uvek postoje karakteristike i mogućnosti postojećih 5G rešenja koja zahtevaju punu specifikaciju, a za koje se očekuje da će biti završeni u predstojećem 3GPP izdanju 18, ciljano na kraj 2023. Sledeća izdanja, do sredine decenije, očekuje se da će 2025. biti fokusirani na evoluciju 5G, paralelno sa analizom 6G, i konačno na odgovarajuću specifikaciju 6G.

2.23. Regulacija

Konačna implementacija 6G zahteva potpunu interoperabilnost između svih entiteta na svim nivoima mreže. Integracija mreže i usluga, uz uključivanje više aktera u ponudu 5G i 6G usluga, zahteva proširenje postojećih regulativa odgovornosti, koje trenutno važe samo za mobilne mrežne operatore (MNO). S obzirom na eksponencijalno povećanje kompleksnosti 6G mreža, pojaviće se novi izazovi u oblastima bezbednosti, verifikacije identiteta, zakonitog prisluškivanja, digitalne forenzike i slično. Promenljivost logičkih entiteta i nestabilnost podataka u mreži i uslugama predstavlja značajne prepreke za proveru i reviziju komunikacija u slučajevima kriminalnih ili nezakonitih aktivnosti. Takav ekosistem zahtevaće zajednički proces sertifikacije koji uzima u obzir sve veći broj dobavljača širom Evrope, kao i pojednostavljen proces koji omogućava vertikalama da nude svoje usluge bilo gde i u svakoj situaciji. Sudski postupci unutar lanca vrednosti moraće da obuhvate tehničke aspekte pored standardnih pravnih pitanja, poput plaćanja poreza. Pored toga, sofisticirana automatizacija zasnovana na AI/ML za pružanje 6G usluga zahtevaće dodatne regulative zasnovane na etičkim principima [68], [69].

Primena 6G usluga korišćenjem novih 6G mogućnosti može zahtevati dodatno pojašnjenje o tome šta se tiče primenljivosti pravila o neutralnosti mreže i regulative o zaštiti podataka (ePD i GDPR). Granice vlasništva i privatnosti podataka između svih elemenata kompleksnih sistema koji isporučuju 6G usluge moraju biti jasno definisane kako bi se zaštitili građani. Očekuje se da će se pojaviti konkurencija 6G usluga za fizičke resurse o kojima će se morati arbitrirati odgovarajućim uputstvima o regulaciji neutralnosti mreže. Ovo će doneti nove poslovne modele i SLA [3].

Sigurnost će morati da se prilagodi mnogo dinamičnijim mrežnim modelima. Bezbednosti uz pomoć veštačke inteligencije/ML biće potreban dalji razvoj kako bi se odgovorilo na nove bezbednosne niti uvedene dinamikom 6G usluga i mreža. Ovo će zahtevati nove profesionalne veštine i biće potrebno više profesionalaca obučenih za ove tehnologije u privatnim i javnim preduzećima.

3. Propagacija u industrijskim sredinama

Značajan napredak je postignut u razumevanju propagacije talasa u industrijskim okruženjima na frekvencijama ispod 6 GHz i mm talasima. Tipično industrijsko okruženje se razlikuje od stambenih ili drugih zatvorenih prostora, jer su prisutni visoki nivoi mehaničke i električne buke, kao i smetnje izazvane visokim radnim temperaturama, teškom mašinerijom i sistemima paljenja. Industrijske hale su obično veće od običnih poslovnih objekata i podeljene su na više radnih zona, između kojih se nalaze ravni prolazi za transport materijala ili kretanje zaposlenih. Moderna proizvodna postrojenja često imaju perimetarske zidove od armiranog betona ili čelika, a plafoni su često podržani metalnim rešetkama. Podovi su većinom betonski i prilagođeni za vozila i teške mašine. Tip objekta, njegova veličina, gustina opreme i raspored unutar prostora značajno variraju i igraju ključnu ulogu u karakterizaciji kanala. Prisustvo nasumičnog ili periodičnog kretanja radnika, automatizovanih vođenih vozila (AGV), nadzemnih dizalica, viseće opreme i drugih objekata stvara vremenski promenljive uslove kanala.

Sprovedena su brojna merenja i modeli širenja u različitim industrijskim okruženjima. Autori u [81] karakterišu velike parametre industrijskog kanala na 2,37 i 5,4 GHz u fabrici Siemens u Neumbergu, Nemačka. I u uslovima LOS I u NLOS, razdaljina bledenja senke bila je približno 15 m i 30 m – mnogo veća od odgovarajućih vrednosti od 6 m i 10 m u standardizovanom 3GPP modelu. Rasponi AOD i AOA po azimutu i elevaciji nisu pokazali veliku razliku u odnosu na 3GPP model. Studija u predlaže dvosmerni model sa parametrima koji su prilagođeni na 5 GHz iz merenih podataka. Detaljno poređenje između karakteristika propagacije na 3,7 GHz i 28 GHz je predstavljeno preko propusnog opsega od 2 GHz, gde su prikazani LOS i NLOS eksponenti gubitka putanje različiti od onih koji se vide zbog razlika u okruženju. Ne vidi se značajna razlika u širenju kašnjenja u dva opsega od 3,7 GHz do 28 GHz. Na 28 GHz, ekstrahovane su AOA informacije i procenjeni su profili ugaone snage i RMS ugaona širina pokazujući skoro ravnomerno raspoređenu AOA distribuciju u NLOS uslovima preko 360◦. Karakterizovani parametri se slažu sa onima koje je standardizovao 3GPP. Potrebna su mnoga dalja istraživanja da bi se razumela vremenski promenljiva priroda industrijskih kanala i na frekvencijama ispod 6 GHz i na mm talasnim frekvencijama, gde nema mnogo rezultata [81].

Bespilotne letelice uključuju male dronove koji lete ispod redovnog vazdušnog prostora – platforme male visine, bespilotne letelice u redovnom vazdušnom prostoru i platforme velike visine u stratosferi. U zavisnosti od toga kako i gde rade, svojstva kanala se prirodno razlikuju [82]. U svim slučajevima treba razlikovati kanal vazduh-zemlja (AG) i kanal vazduh-vazduh (AA). Postoji veliki broj nedavnih istraživanja o radu UAV-a ispod 6 GHz na malim visinama. Tipično, AA kanal se ponaša kao kanal slobodnog prostora sa veoma ograničenim rasejanjem i bledenjem [82]. Uz pravilno poravnanje, dobro je podržana upotreba viših frekvencija, pa čak i optike slobodnog prostora.

Za AG kanal, obično postoji više rasejanja uopšte, posebno na nižim frekvencijama. Često je refleksija na dielektričnom poluprostoru jaka, što dovodi do dvoputnog fluktuirajućeg ponašanja kanala. Za zemaljske stanice koje se nalaze blizu nivoa zemlje, bledenje senke se javlja kao glavno ograničenje, posebno na mm Talasima i iznad frekvencija. Fading malih razmera u AG kanalima obično prati Rajsovu distribuciju sa K-faktorima većim od 12 dB. AG kanal može da pokaže

značajne stope promene, sa Doplerovim pomacima višeg reda. Pored gubitka putanje, okvir UAV-a može uneti značajno senčenje, kada telo aviona može ometati LOS putanju.

3GPP ima studiju LTE podrške za bespilotne letelice. Ovde je obezbeđen model kanala za simulacije na nivou sistema za tri okruženja: ruralna makroćelija, urbana makroćelija i urbana mikroćelija, respektivno. Za mmVave UAV kanale, literatura je oskudnija, posebno u pogledu empirijskih studija. Analizirana je komunikacija zasnovana na 60 GHz UAV sa pristupom praćenja zraka gde se detaljan opis okruženja postiže fotogrametrijskim pristupom. Uz tačan i detaljan opis okruženja i odgovarajuću kalibraciju, metode praćenja zraka su u stanju da pruže tačna predviđanja očekivanog ponašanja kanala u ovom slučaju upotrebe. Bespilotne letjelice se takođe istražuju kako bi obezbedile mobilnu pokrivenost u udaljenim oblastima preko platformi na velikim visinama [82].

Ponašanje V2V i V2I kanala ispod 6 GHz je dobro istraženo i shvaćeno. Šest važnih karakteristika propagacije su [83]:

1) Kanal se ne može posmatrati kao stacionaran u širem smislu sa nekorelisanim rasejanjem; statistika i u smislu vremenske korelacije i korelacije frekvencije se menja tokom vremena.

2) Visoka doplerova širenja mogu nastati zbog velikih relativnih pomeranja od predajnika do prijemnika. U određenim slučajevima dolazi do 4k većeg širenja Doplera u poređenju sa konvencionalnim ćelijskim scenarijem sa stacionarnim BS.

3) U scenariju autoputa, kanal je često oskudan sa nekoliko dominantnih MPC. V2V kanali u urbanim scenarijima imaju tendenciju da budu mnogo bogatiji u svojoj višeputnoj strukturi.

4) MPC (posebno u urbanim sredinama) imaju tendenciju da imaju ograničen životni vek.

5) Blokiranje LOS-a od strane drugih vozila ima tendenciju da ima značajan uticaj na gubitak putanje. Srednji gubitak od strane kamiona koji vrši ometanje je 12-13 dB.

6) Uticaj položaja antene i dijagrama antene ne treba potcenjivati. Oni utiču ne samo na gubitak putanje, već i na statistiku parametara kanala.

Kada se učestalost povećava, može se očekivati da ta svojstva ne samo ostanu, već postanu u velikoj meri uvećana. Važno je napomenuti da nedostaju rezultati merenja za kanale vozila u mm Talasima, a većina zaključaka se izvodi iz stacionarnih merenja. I za ispod i iznad 6 GHz, 3GPP TR 37.885 predstavlja standardizovani model V2V kanala za sistemske simulacije, koji je zasnovan na principu odvojene linije kašnjenja. Iznad 6 GHz, pretpostavlja se da je simulirani propusni opseg 200 MHz sa agregiranim propusnim opsegom do 1 GHz. Za 6G, jedan od glavnih slučajeva upotrebe je kooperativna percepcija, gde se sirovi podaci senzora, na primer, kamere i radara dele između vozila. Predviđene brzine prenosa podataka za takve aplikacije su do 1 Gbps, što zahteva korišćenje širih propusnih opsega dostupnih na mmVave frekvencijama. Za scenario autoputa, sa mobilnošću vozila od 100 km/h, Doplerovo širenje za frekvenciju nosioca od 28 GHz bilo je do 10 kHz. Kao gruba procena, ovo daje vreme koherentnosti u najgorem slučaju od čak 100 μs, što je izuzetno malo za konvencionalni OFDM prenos zasnovan na pilotu. Oskudnost u domenu kašnjenja Doplera važi I u izmerenom scenariju gradskog ukrštanja ulica, te da dominira jedan klaster sa specifičnim doplerovim karakteristikama kašnjenja, koji omogućava kompenzaciju kašnjenja i doplerovih pomeranja i pogodan je za OTFS tip modulacije. Kod usmerenih antena kanal se može modelovati sa dva puta na izmerenim frekvencijama od 38, 60 i 76 GHz. Blokiranje LOS-a dovodi do prekomernih gubitaka u opsegu od 5-30 dB u zavisnosti od

konkretnog scenarija i frekvencije, tj. u istom opsegu kao što je prijavljeno za V2V komunikaciju ispod 6 GHz. Blokada LOS-a takođe dovodi do naglog povećanja ugaonog širenja i širenja kašnjenja, što opet utiče na statistiku kanala [83].

Nosivi uređaji su važni u zdravstvenim sistemima, robotici, imerzivnim video aplikacijama. Do sada ne postoje standardizovani modeli za mreže površina tela, iako su objavljene mnoge studije. Postojeća merenja se mogu kategorisati kao uskopojasna za 300 kHz-1 MHz na frekvencijama ispod 1 i 2 GHz. Nasuprot tome, postoje i ultra širokopojasna merenja sa mernim opsegom od 499 MHz u C-opsegu i 6-10 GHz. Obezbeđeni su modeli za feding velikih i malih razmera, ali dati modeli su specifični za izmerene lokacije tela (tj. gde su senzori postavljeni), tipove antena, frekventne opsege, što se pokazalo teškim za generalizaciju na druge opsege i lokacije. Čini se da je ovo veliki izazov koji zahteva mnogo daljeg rada.

3.1. Obrada u realnom vremenu i dizajn RF primopredajnika

Operativni propusni opsezi nekih frekvencijskih prozora dosežu desetine GHz, što čini izgradnju radija sa jednim nosiocem kroz ceo opseg gotovo nemogućom, posebno ako se želi zadržati visoka performansa i energetska efikasnost uz očuvanje linearnosti RF front-end kola. Zbog toga, čak i kod 5G mmWave sistema, maksimalna dozvoljena širina opsega jednog nosioca je 400 MHz. Slično tome, u THz opsezima, maksimalna širina nosioca za lokalne usluge se procenjuje na oko 1 GHz. Ovo je iznenađujuće, s obzirom na to da je inicijalna primena mmWave i THz opsega bila motivisana mogućnošću iskorišćenja šireg spektra u odnosu na tradicionalne sisteme.

Trenutna komercijalna oprema za milimetarske talase koristi četiri nosioca po 100 MHz, dok 3GPP definisana maksimalna širina nosioca za mmWave iznosi 400 MHz. Korišćenje nosioca širine 1 GHz povećava nivo buke prijemnika za 10 dB, što dovodi do smanjenja SNR-a za isti iznos. Dakle, u praksi, propusni opseg jednog nosioca često se ograničava na 100 MHz, dok veći opseg postiže agregacijom više nosilaca. Na primer, za opseg od 10 GHz potrebno je objediniti 100 takvih nosilaca, što zahteva kalibraciju radio hardvera kroz sve njih — ogroman izazov na visokim frekvencijama, posebno kada fazni šum počinje da utiče na performanse. Kod tako širokog opsega, karakteristike radija na donjem kraju frekvencijskog spektra mogu znatno odstupati od gornjeg kraja.

Maksimalan broj nosilaca, a time i radni opseg, mora biti kompromis između mogućnosti integracije RF kola antene i ograničenja snage izotropnog zračenja radi bezbednosti, što predstavlja značajan izazov u dizajnu [84].

Jasno je da visoki elektromagnetni gubici u frekvencijskim opsezima THz predstavljaju ogroman istraživački i inženjerski izazov. Realno, teško je zamisliti (neke) 6G usluge izvan prozora V1, između 140-350 GHz. Ovde je gubitak slobodnog prostora na nominalnoj udaljenosti veze od 10 m znatno veći od 100 dB. Direktna posledica ovoga je ograničen domet ćelija - trend koji iz 5G sistema proizlazi iz gustine mreže.

Da bi se prevazišao ovaj problem, u literaturi za THz je dat predlog ultra masivnih MIMO sistema, koji je predviđen da zatvori budžet veze integracijom veoma velikog broja elemenata u minijaturnim otiscima kako bi se povećala udaljenost veze. Ovo je kritično za ranije pomenute

slučajeve korišćenja 6G koji zahtevaju Tbps povezivanje. Konačno, potrošnja energije zajedno sa tačnim tipom arhitekture oblikovanja zraka će postaviti praktično ograničenje na ostvarivi broj elemenata koji se razmatraju na krajevima BS i UE veze.

Da bi se ispunio cilj povezivanja do Tbps, trodimenzionalno prostorno oblikovanje zraka će biti kritično. Potpuna trodimenzionalna priroda kanala propagacije se ne koristi čak ni u 5G sistemima na mmVave frekvencijama, gde je analogno formiranje snopa uglavnom implementirano u komercijalnim proizvodima sa više antenskih panela (sa ili bez zajedničkog fronthaulinga), pri čemu svaki može da formira jedan snop prema unapred definisanom pravcu. S druge strane, napredak u RF kolima je bio ogroman da se realizuju radio primopredajnici sa potpuno digitalnim formiranjem snopa za opsege ispod 6 GHz, a nedavno i za mmVave opsege od 24,5-29,5 GHz.

Implementacija potpuno digitalnog formiranja snopa na frekvencijama THz je ogroman zadatak, sa za red veličine većom složenošću u odnosu na mmVave opsege. Ne treba uzimati zdravo za gotovo da će za „pitanje vremena“ RF elektronika sazreti i moći ćemo da realizujemo digitalno formiranje snopa čak i na THz. Što se tiče 5G sistema, kratkoročno do srednjeročno, implementacije faznog niza izvođenje analognog ili hibridnog formiranja snopa izgleda najverovatnije. Za razliku od mikrotalasnih i mmtalasnih frekvencija, za THz opsege, arhitekturu za obradu faznog niza treba redizajnirati zbog složenosti u proizvodnji antene, komponenti mešovitog signala velike brzine/velike snage, RF interkonekcija i disipacija toplote. Najčešći tip implementacije antene u mikrotrakaste patch elemente ne radi efikasno na THz frekvencijama zbog velikih gubitaka dielektrika i provodnika na nivou RF supstrata. Kao takvi, fazni nizovi proizvedeni od nano materijala, kao što je grafen, su bili razmatrani za izgradnju minijaturnih plazmonskih antena sa dinamičkim operativnim režimima kako bi se iskoristile prednosti prostornog multipleksiranja i oblikovanja talasa. Ručne antene zasnovane na metamaterijalu, hiperpovršine i RF front-end rešenja takođe se pojavljuju kao ključna tehnologija. Da bi se povećao dobitak formiranja snopa, uveden je koncept metapovršinskih sočiva, koji se ponašaju kao mreža RF podele snage, pomeranja faze i kombinovanja snage koja se primenjuje pri zračenju. U kontekstu neposredne budućnosti, proširenje 5G operacija do 71 GHz se već razmatra u 3GPP-u. Predviđamo da se ovaj trend nastavi preko 100 GHz, što će dovesti do 6G sistema. Takva struktura ima potencijal da zameni konvencionalna kola za razdvajanje RF snage, fazno pomeranje i kombinovanje snage, koja su složena i zahtevna za energijom, sa relativno jeftinim pasivnim uređajem (u obliku sočiva), što daje značajne dobitke u složenosti kola i energiji [83], [84].

Sa stanovišta obrade u realnom vremenu, glavni izazov i na mmVave i THz frekvencijama je u dinamičkoj kontroli i upravljanju RF interkonekcijama elemenata niza i pridruženih mreža za formiranje snopa. Iako je ovaj problem bio prisutan u mmVave opsezima, izazov je još veći zbog još kraćeg vremena koherentnosti kanala (za fiksno Doplerovo širenje), većeg faznog šuma i većeg broja elemenata antene. Čak i sa hibridnim formiranjem snopa, da bi se upravljalo složenošću obrade kao i troškovima, potpuno povezane arhitekture koje zahtevaju namenske pomerače faze po putanji RF signala će biti previsoke – i dizajn zasnovan na principu niza podnizova mora biti iskorišćen. Ovde je podskup antena dostupan jednom specifičnom RF lancu, dok je u osnovnom opsegu implementiran modul za digitalnu obradu za obe strukture za kontrolu tokova podataka i upravljanje smetnjama među korisnicima. ADC i DAC-ovi niske rezolucije se takođe moraju iskoristiti za upravljanje troškovima i implementacijom primopredajnika.

Da bismo procenili kada je verovatno da ćemo postići Tbps stope, pretpostavljamo savršenu CSI i idealnu arhitekturu primopredajnika i na BS i na UE strani, gde je 4096 elemenata uposleno na BS, a 16 elemenata u UE, oba u uniformnim planarnim nizovima (UPA) od 64 ×64 i 4×4 elementa, respektivno. Za oba UPA, horizontalni razmak je postavljen na 0,5λ, dok je vertikalni razmak bio 0,7λ. Antene su pokretane kroz dva odvojena opsega: 140-141 GHz i 140-240 GHz na udaljenosti veze od 15 m. Za oba propusnog opsega, pragovi buke su izračunati korišćenjem klasičnih izraza praga buke. Dobijene su kumulativne funkcije distribucije kapaciteta MIMO za jednog korisnika (CDF) pri SNR=10 dB i SNR=3 dB. Dakle, vršni kapacitet od 1 Tbps može se postići u teoriji pod pomenutim pretpostavkama. Gotovo konstantan gubitak u kapacitetu je primetan u svim vrednostima CDF-a kada se radni SNR smanji sa 10 dB na 3 dB.

Poređenje istih nivoa SNR-a sa propusnim opsegom od 1 GHz daje manje od 100× razlike u kapacitetu zbog propusnog opsega u formulaciji kapaciteta. Važno je napomenuti da termin propusnog opsega igra mnogo istaknutiju ulogu u predviđanjima kapaciteta, za razliku od poboljšanog SNR-a zbog nižeg praga šuma na 1 GHz u odnosu na 100 GHz. Imajući ovo na umu, može se lako postaviti mnoga pitanja o tome kako se tako visoki kapaciteti mogu postići pod realnim ograničenjima CSI i arhitekture primopredajnika, uprkos gore pomenutim poteškoćama u radu u realnom vremenu. Ako bismo želeli da upravljamo sistemom na zajedničkoj konstelaciji, da li je praktično izvodljivo da postignemo SNR-ove veze za promenu veze reda veličine 10 dB? Da li bi dobici modulacije i kodovanja mogli da održe tako visoke SNR tokom dugog vremenskog perioda? Veliki propusni opseg je zaista dostupan na frekvencijama THz, ali da li možemo da iskoristimo ove propusne opsege sa arhitekturama oblikovanja snopa? Sve su ovo glavna istraživačka pitanja na koja treba odgovoriti [85], [86].

U kontekstu višekorisničkih sistema, kao jednostavna aproksimacija, kapacitet po UE, R, može se smatrati: , gde su B i L propusni opseg i broj MIMO slojeva za ukupno K UE, a SE je trenutna spektralna efikasnost data sa $SE \approx \log2\ (1 + SINR)$, gde SINR označava signal-interferencija plus šum odnos datog UE. Kako bismo povećali kapacitet, moramo povećati B, L i SINR. Povećanje B je svakako moguće u THz opsezima, ali gustina snage opada sa povećanjem propusnog opsega. Za povećanje MIMO slojeva biće potrebni ultra masivni MIMO nizovi na oba kraja, ali oni se mogu u potpunosti iskoristiti samo ako kanal propagacije može da podrži razuman rang nešto što je uglavnom nepoznato iz slabo istražene THz literature.

Nizovi ultra velikih dimenzija će rezultovati ekstremnom usmerenošću u prenošenim snopovima, što će smanjiti smetnje. Ipak, povećanje propusnog opsega će takođe povećati nivo buke (kao što je ranije pomenuto). Konačno, zgušnjavanje mreže će smanjiti broj konkurentskih korisnika K, ali će to takođe povećati operativne troškove mreže i režijske troškove koordinacije BS. U budućnosti, svi ovi faktori moraju se pažljivo razmotriti u kontekstu THz istraživanja [85], [86].

3.2. Izazovi i mogućnosti RF primopredajnika

Za frekvencije ispod 6 GHz i mm Talasa, za arhitekturu BS primopredajnika se koristi spoj radio-over-fiber i aktivnih integrisanih antena. Procesi konverzije naviše i naniže se kontrolišu u realnom vremenu preko prikazanih kontrolnih modula i RF cirkulatora. Za prenos i prijem, koristi se dvostepena kaskadna pojačavačka sekvenca da bi se obezbedilo dodatno pojačanje snage. Takođe su prikazana dodatna kola za filtriranje i upravljanje koja su kritična za rad primopredajnika. Dok se takve arhitekture mogu realizovati na frekvencijama ispod 6 GHz i mmVave zahvaljujući napretku u RF krugovima, isto se ne može reći za THz opsege. Korišćenje THz opsega će nametnuti velike izazove dizajnu hardvera primopredajnika. Prvo i najvažnije, rad na tako visokim frekvencijama postavlja stroge zahteve za tehnologiju poluprovodnika. Čak i kada se koristi najsavremenija tehnologija, frekvencija rada će se približiti, ili u ekstremnim slučajevima čak i premašiti, maksimalnu frekvenciju, gde je poluprovodnik u stanju da uspešno obezbedi povećanje snage. Ostvarljiva cifra šuma prijemnika kao i efikasnost predajnika će tada biti ozbiljno degradirani u poređenju sa radom na nižim frekvencijama. Da bi se maksimizovalo povećanje frekvencije, tehnologija mora da koristi smanjene veličine karakteristika, zahtevajući nizak napon napajanja da bi se postigla pouzdanost, smanjujući dostižnu izlaznu snagu predajnika. U kombinaciji sa smanjenom cifrom šuma prijemnika, smanjenim otvorom antene i širokim propusnim opsegom signala prirodno će doći do veoma kratkih udaljenosti veze. Hiljade do desetine hiljada antenskih elemenata mogu biti potrebne za THz BS [83], [84].

Primera radi, rad na 500 GHz sa deset hiljada antenskih elemenata smanjuje veličinu potrebnog niza na samo 3 cm × 3 cm, pri čemu su elementi razmaknuti na pola talasne dužine, odnosno 0,3 mm. RF elektronika mora imati istu veličinu, kako bi se minimizovala dužina THz interkonekcija, što je veliki istraživački izazov. Svaki čip tada mora imati više primopredajnika. Na primer, čip od 3 mm × 3 mm može imati 100 primopredajnika, a 100 takvih čipova treba da se koristi u nizu od deset hiljada antenskih elemenata. Antene mogu biti implementirane na čipu ili van njega, pri čemu antene na čipu generalno imaju manju efikasnost, ali eliminišu gubitak u interfejsima čip-nosač. Pored toga, rasipanje toplote postaje veliki problem. Pošto će THz primopredajnici imati nisku efikasnost, površina za disipaciju toplote će biti veoma mala. Ako svaki primopredajnik troši 100 mV, ukupna potrošnja energije niza postaje 1 kV, što ima velike implikacije na to da sistem ne može biti kontinuirano aktivan. Ako rasipanje toplote postane previše problematično, možda će se morati razmotriti ređi nizovi, na primer, korišćenjem principa stanjivanja niza zasnovanih na kompresijskom senzoru sa razmakom elemenata više od polovine talasne dužine. Međutim, ovo bi izazvalo bočne režnjeve kojima treba upravljati, što zauzvrat može predstavljati ograničenja za deljenje spektra sa postojećim ili susednim uslugama [83], [84].

Da bi se stvorilo, na primer, 10000 primopredajnika sa visokim nivoom integracije, mora se koristiti tehnologija zasnovana na silikonu. Dok se predviđa da će tranzistori poluprovodničkog tranzistora sa efektom polja silicijum metal oksida (MOSFET) dostići svoju maksimalnu brzinu i da će se zapravo degradirati daljim skaliranjem, predviđa se da će bipolarni tranzistori silicijum germanijuma (SiGe) dostići maksimalnu frekvenciju od blizu 2 THz unutar 5 nm uređaja. U takvoj tehnologiji, pojačala i oscilatori do oko 1 THz bi se mogli realizovati sa visokim performansama i integracijom.

Sa današnjom silikonskom tehnologijom, međutim, pojačala i oscilatori od 500 GHz se ne mogu realizovati, a za rad na takvim frekvencijama neophodno je množenje frekvencije na nelinearan način. Međutim, predajnik zasnovan na multiplikatoru frekvencije ili prijemnik sa subharmoničnim mikserom neće postići atraktivne performanse. Trenutno bi bolja opcija tada mogla biti upotreba tehnologije indijum fosfida (InP) za delove najviše frekvencije, u kombinaciji sa silicijumskim komplementarnim metal-oksid-poluprovodničkim kolom osnovnog pojasa. Pojačala i mikseri na 800 GHz su demonstrirani u 25 nm InP tranzistor visoke pokretljivosti elektrona (HEMT) sa maksimalnom frekvencijom od 1,5 THz. Kada 5 nm SiGe tehnologija postane dostupna, nivo integracije će biti viši, što će rezultovati smanjenim troškovima proizvodnje. Verujemo da je ovo neophodno za implementaciju ultra masivnih MIMO nizova [83], [84].

Drugi važan izazov je generisanje koherentnih i niskošumnih signala lokalnog oscilatora (LO) za deset hiljada ili više primopredajnika. Generisanje centralnog signala od 500 GHz koji bi se distribuirao na sve primopredajnike, možda 100, na čipu izgleda nepraktično, jer bi trošilo veoma veliku snagu u baferima. Kao takvo, više distribuirano rešenje sa lokalnim faznim zaključanim petljama (PLL) je privlačnije, pošto se referenca niže frekvencije tada može distribuirati preko čipa. Fazni šum različitih PLL-ova će tada biti nekorelisan; korišćenje više PLL signala zajedno može postići niskošumne snopove. U tom cilju, postoji kompromis u izboru broja PLL-ova. Ipak, s obzirom na veliku snagu distribucije LO signala, veliki broj PLL-ova izgleda povoljno. Ovo je dodatno izraženo teškoćom dostizanja visoke energije rezonatora u jednom oscilatoru na tako visokim frekvencijama, što ga čini privlačnim povećanjem ukupne energije povećanjem broja oscilatora u sistemu. Korišćenje velikog broja PLL-ova takođe pruža mogućnosti formiranja LO zraka, pošto se faza PLL može precizno kontrolisati. Bez obzira na LO arhitekturu, drugi izazov je podešavanje frekvencije oscilatora, pošto je faktor kvaliteta promenljivih reaktansa obrnuto proporcionalan radnoj frekvenciji. Kao takvi, na frekvencijama THz, treba istražiti druge mehanizme podešavanja, kao što je korišćenje otpora za podešavanje. Svi ovi izazovi zahtevaju značajne istraživačke napore u ovom važnom pravcu i moraju biti prevaziđeni da bi se realizovali sistemi koji su predviđeni za 6G mreže [83], [84].

Kako se količina podataka za komunikaciju i obradu povećava za redove veličine, energetska efikasnost postaje kritična, posebno kod uređaja na baterije. Povećani dobitak antene od korišćenja velikih nizova na visokim mm talasima i ranim terahercnim opsezima će pomoći energetskoj efikasnosti usmeravanjem prenošene energije ka željenim UE-ovima, a samim tim i smanjenim veličinama ćelija koje su potrebne za postizanje visokih vršnih brzina. U isto vreme PA efikasnost i UE buka će degradirati sa frekvencijom, suprotstavljajući se nekim od dobitaka korišćenja više usmerenih prenosa na kraćem dometu. Sa napretkom u poluprovodničkoj tehnologiji, međutim, kao i skalirana SiGe bipolarna tehnologija, predviđa se da će cifra šuma i energetska efikasnost postati privlačni čak i na ovim frekvencijama.

Potrošnja energije velikog niza primopredajnika može i dalje biti visoka, zbog mnogih kanala za konverziju nagore i naniže, ali brzina podataka može biti izuzetno visoka i očekuje se da će energija po bitu opasti za redove veličine u poređenju sa postojećim ćelijskim sistemima. Usko grlo za energetsku efikasnost tada može postati obrada podataka, na primer, za prikazivanje holograma iz toka izuzetno velike brzine. Međutim, u poslednjih pet godina, oni su pokazali znake značajnog usporavanja na 10× poboljšanja po deceniji, a nadmašili su ih poboljšanje od 12× po

deceniji GPU-a. U narednoj deceniji, skaliranje čiste tehnologije će doneti samo 4k smanjenje energije s obzirom na mali broj nadolazećih CMOS generacija. U tom cilju, tehnološko skaliranje treba da bude dopunjeno značajnim i koordinisanim napretkom na svim nivoima apstrakcije. Ovakva razmatranja takođe važe za skaliranje napona, koje je u velikoj meri korišćeno u poslednje dve decenije. Konkretno, rad na 0,6 V je već dostupan za komercijalne procesore i biblioteke standardnih ćelija, što se brzo približava pragu tranzistora i stoga ostavlja ograničenu mogućnost za dalje skaliranje. Isto tako, paralelizam više ne obezbeđuje uštedu energije kao nekada, posebno za aplikacije velike brzine čije radno opterećenje možda nije prirodno paralelno. Na primer, poznato je da je broj istovremeno aktivnih jezgara u najsavremenijim UE platformama ostao suštinski konstantan u poslednje dve generacije, pa stoga upravljanje potrošnjom UE energije treba više zavisiti od energije na strani mreže. Gledajući u narednu deceniju, biće potrebne nove dimenzije dizajna da bi se uporedila potrošnja energije i smanjila, kad god se srodne specifikacije mogu ublažiti.

3.3. Povećanje energetske efikasnosti za zelene komunikacije

Kontinuirani rast bežičnog saobraćaja podataka, koji dolazi od povezivanja milijardi uređaja na Internet, doveo je do povećanja potrošnje energije. Pored toga, mrežni operateri su prepoznali da tradicionalni pristupi postavljanja većeg broja malih ćelija možda neće biti dovoljni da zadovolje tekuće velike potrebe za saobraćajem podataka. Osim toga, jedan od značajnih izazova sa kojima se suočava razvoj mreža malih ćelija je značajna količina interferencije između ćelija (ICI) od drugih ćelija [87]. Stoga, pronalaženje izvodljivih energetski efikasnih dizajna i operacija za buduće 6G mreže sa ciljem smanjenja nepoželjne emisije ugljen-dioksida (CO_2) po pretplatniku mobilne telefonije postaje od suštinskog značaja. Pored toga, ključno je pronalaženje odgovarajućih dizajna za realizaciju ekonomski održivih budućih bežičnih komunikacionih sistema koji postižu i spektralnu i energetsku efikasnost uz niske troškove hardvera. Zbog toga je koncept zelene radio pristupne mreže uveden kako bi se optimizovali resursi spektra i smanjila potrošnja energije. Radio resursi u bežičnim komunikacionim sistemima mogu se efikasno alocirati kako bi se maksimizovala energetska efikasnost.

Metrika za izračunavanje energetske efikasnosti komunikacione veze se dobija deljenjem broja bitova informacija (preko ukupne potrošene energije) celokupnom mrežom mereno u [bit/džul]. Upravljanje energijom je od suštinskog značaja za održivost budućih 6G bežičnih komunikacionih mreža. Nedavno je koncept radio pristupne mreže u oblaku (C-RAN) uveden kao obećavajuća mrežna infrastruktura za prevazilaženje rastućih zahteva mobilnog saobraćaja u ćelijskim sistemima. U C-RAN, većina intenzivnih računarskih zadataka, kao što je izračunavanje matrice prethodnog kodiranja, obrada signala osnovnog opsega i procena kanala, premešta se u oblak. S tim u vezi, CRAN ima potencijal da smanji potrošnju energije u cilju postizanja zelenih bežičnih komunikacionih sistema [88]. Međutim, od suštinskog je značaja pronalaženje izvodljivih front-haul rešenja za centralizaciju C-RAN mreže [88]. Štaviše, potrošnja energije se može smanjiti korišćenjem efikasne šeme planiranja mreže. Takođe, mogu biti potrebni odgovarajući algoritmi za uključivanje/isključivanje za kontrolu uslova saobraćaja i smanjenje potrošnje energije. Osim toga, pronalaženje izvodljivih hardverskih dizajna koji uzimaju u obzir potrošnju

energije je od suštinskog značaja za energetski efikasne bežične komunikacione sisteme. Ovo uključuje dizajn efikasnog lanca radio frekvencija i upotrebu pojednostavljenih struktura predajnika/prijemnika, na primer, jednobitno kvantovanje signala i korišćenje hibridnog analognog/digitalnog formiranja snopa.

Mobilno računarstvo u oblaku kao što je računarstvo magle i ivica je još jedna impresivna tehnika za postizanje energetske efikasnosti u bežičnim komunikacionim sistemima. Mobilno računarstvo u oblaku omogućava korisnicima sa velikim računarskim zahtevima da prebace svoje intenzivne zadatke na ivični oblak kako bi uštedeli energiju. Kombinovanje mobilnog računarstva u oblaku i C-RAN može dovesti do značajne uštede energije za buduće komunikacione mreže. Nedavno je nekoliko studija istraživalo maksimalizaciju energetske efikasnosti sa velikim brojem antenskih nizova. Ova istraživanja su se fokusirala na iskorišćavanje optimalne alokacije energije, algoritama za planiranje i topologije mreže za smanjenje potrošnje energije. Vredi napomenuti da korišćenje eksterno velikog broja antenskih nizova baznih stanica možda neće postići zahteve energetske efikasnosti budućih 6G mreža. To je zato što se potrošnja energije može povećati sa brojem radio-frekventnih lanaca [89], [90].

3.4. Sakupljanje energije

Sakupljanje energije se smatra jednom od najperspektivnijih metoda za poboljšanje energetske efikasnosti u 6G mrežama. Ova tehnika omogućava bežičnim uređajima da prikupljaju energiju iz radio-frekventnih signala koristeći rectenna kola, koja potom mogu bežično puniti baterije uređaja i podržavati njihov rad. Na primer, bežične senzorske mreže (VSN) često se koriste za zdravstveni nadzor, gde je ukupna potrošnja energije kritičan problem zbog potrebe za dugotrajnim povezivanjem i produženim radom baterija. U takvim slučajevima, sakupljanje energije može biti efikasno rešenje za podršku VSN mrežama [91], [92].

3.5. Ključne tačke prikupljanja energije

Tehnika prikupljanja energije omogućava efikasan rad bežičnih mreža na baterije. Ovo omogućava da se bežične mreže primenjuju u udaljenim ruralnim oblastima i u ljudskom telu. Sakupljanje energije se može koristiti u mnogim medicinskim i bezbednosnim aplikacijama i u daljinskom nadzoru sa produženim trajanjem baterije i dužim dometima komunikacije. Štaviše, tehnika prikupljanja energije omogućava da bežične komunikacione mreže budu napajane čistim izvorima energije. Tipično, tehnika prikupljanja energije uključuje bežični prenos snage (VPT), bežičnu komunikacionu mrežu (VPCN) i istovremeni bežični prenos informacija i energije (SVIPT). Zbog toga je potreban poseban dizajn na strani prijemnika za preuzimanje informacija i energije. U VPT pristupu, predajnik snage prenosi energiju na korisničke uređaje bez informacija. Prenesena energija se zatim koristi za punjenje baterija uređaja. Pristup zasnovan na VPT ima potencijal da se koristi sa implantatima u medicinske svrhe, električnim automobilima i bežičnim mrežama. U pristupu zasnovanom na VPCN, energija se prvo sakuplja u korisničkim uređajima, a

zatim se koristi za prenos podataka. Otuda se komunikaciona efikasnost bežičnih uređaja može značajno poboljšati.

U pristupu zasnovanom na SVIPT-u, predajnik snage može istovremeno da prenosi energiju i informacije do korisničkih uređaja. Zatim bi korisnici ili sakupljali energiju ili dekodovali informacije koje šalje predajnik snage. Kao takav, može se postići efikasan prenos energetskih informacija. SVIPT tehnika ima potencijal da postigne najbolje korišćenje radio-frekventnog spektra/zračenja. SVIPT tehnika omogućava da se veliki broj IoT uređaja napaja i povezuje bilo gde i bilo kada. Nekoliko studija je istraživalo tehniku prikupljanja energije za zelene komunikacije. Na primer, razmatran je kompromis između prikupljanja energije i brzine informacija u kanalima aditivnog belog Gausovog šuma (AVGN). Ova studija je pretpostavljala realističan prijemnik, koji prikuplja energiju i dekoduje informacije iz istog signala. Takođe je razmatran i praktičniji scenario sa pristupima zasnovanim na podelu snage (PS) i vremenskom komutacijom (TS). U tehnici zasnovanoj na PS-u, prijemnik može da podeli primljeni signal na dva različita dela, jedan za dekodovanje korisnih informacija i jedan za prikupljanje energije. U TS, međutim, prijemnik može trenutno da se prebaci između informacija za dekodovanje i prikupljanja energije. Tehnika komutacije antene (AS), koja koristi prekidače za prebacivanje između elemenata antene da bi se postiglo dekodovanje ili ispravljanje, takođe se može koristiti za SVIPT. U pristupu zasnovanom na SS, MIMO kanal se može efikasno dekomponovati na paralelne kanale korišćenjem dekompozicije singularne vrednosti (SVD). U ovom slučaju, MIMO bežični kanali mogu da prenose informacije ili energiju, tako da ni TS ni PS nisu neophodni. Razmatran je novi pristup koji koristi strukturu generalizovane trouglaste dekompozicije (GTD). Predloženi GTD pristup omogućava da se MIMO kanal razloži i zajednički koristi za prikupljanje energije i razmenu informacija. Sakupljanje energije i informacija mogu se efikasno razdvojiti na prijemniku [93], [94].

Pronalaženje tačnih modela za sisteme prikupljanja energije smatra se jednim od glavnih izazova. Još jedan izazov sa kojim se suočavaju sistemi za prikupljanje energije je nasumična priroda energije koja je dostupna u bilo kom trenutku. Pored toga, potrebna su nova poboljšanja u dizajnu mreže i obradi signala. Alokacija resursa i raspored se takođe smatraju glavnim pitanjima u sistemima prikupljanja energije. Više praktičnih eksperimenata je potrebno da bi se istražila efikasnost prenosa energije. Štaviše, kako bi se omogućio efikasan dizajn za prikupljanje energije, može se povećati složenost i cena kola uređaja. Ovo se takođe smatra jednim od tehničkih izazova kojima se treba pozabaviti da bi se postigao pun potencijalni dobitak sistema za prikupljanje energije. Takođe, za rešavanje ovog problema može se koristiti sistem za komunikaciju sa povratnim rasejanjem okoline.

3.6. Backsactter komunikacija

Kao što je ranije rečeno, smanjenje potrošnje energije je najvažniji deo 6G mreža. Osim toga, postoji ogroman broj IoT uređaja u 6G mrežama, koji se napajaju baterijama koje imaju ograničene mogućnosti. Zbog toga se simbiotski radio uvodi kao obećavajuća tehnologija za smanjenje potrošnje energije ka postizanju zelene komunikacije. Simbiotska radio tehnologija ima mogućnost da integriše pasivne uređaje za povratno rasejavanje sa aktivnim sistemima prenosa.

Ambijentalna komunikacija povratnog rasejanja se smatra primerom simbiotske radio tehnologije. U ovom slučaju, mrežni uređaji koriste ambijentalne radio frekvencijske signale kao što su TV, ćelijske bazne stanice i ViFi kao izvore signala za prenos podataka bez potrebe za aktivnim prenosom radio frekvencije. Tako se može postići značajna ušteda energije baterije. Korisnički podaci mogu biti kodirani u reflektovanom i ponovo emitovanom signalu modulacijom impedanse antene [95].

Komunikacioni sistem povratnog rasejanja troši oko 10 μV manje energije u poređenju sa konvencionalnim sistemima prenosa. Ovo čini komunikacione sisteme povratnog rasejanja izvodljivijim za buduće IoT aplikacije, senzore i takođe može olakšati bežičnu implantaciju u telu. Komunikacija povratnog rasejanja može se primeniti u radio-frekventnoj identifikaciji (RFID) za pasivnu RFID oznaku, koja prikuplja energiju iz upadnog jednotonskog talasa. Štaviše, komunikacionom sistemu sa povratnim rasejanjem ambijenta nije potreban namenski frekventni spektar. Komunikacija povratnog rasejanja omogućava IoT uređajima da prenose informacije reflektujući i modulišući upadni talas radio frekvencije bez potrebe za značajnom potrošnjom energije. Nedavno je uveden full-dupleks radio prenos kao omogućavajuća tehnika sa komunikacijom povratnog rasejanja kako bi se podržala istovremena bežična komunikacija između više ambijentalnih čvorova povratnog rasejanja. Programabilna metapovršina se takođe može koristiti sa komunikacijom povratnog rasejanja da bi se omogućila veća kontrola nad ambijentalnim talasima [95], [96], [97].

Sistemi povratnog rasejanja mogu se suočiti sa nekoliko tehničkih izazova kao što su niska brzina prenosa podataka, jednosmerni prenos podataka i kratki domet komunikacije. Napadi na bezbednost i ometanje signala su drugi problemi sa kojima se može suočiti komunikacioni sistem povratnog rasejanja. Ovo je zbog jednostavnosti tehnika modulacije i kodovanja koje se koriste u komunikacionim sistemima povratnog rasejanja. Implementacija konvencionalnih bezbednosnih rešenja možda neće biti moguća zbog ograničenih resursa u komunikacionom sistemu povratnog rasejanja. Zbog toga je neophodan razvoj visoko efikasnih bezbednosnih rešenja za sisteme povratnog rasejanja. Kvantna komunikacija se takođe može koristiti za poboljšanje performansi i bezbednosti sistema povratnog rasejanja. Pored toga, samosmetanje mogu značajno uticati na performanse komunikacionog sistema povratnog rasejanja. Stoga je razvoj izvodljivih tehnika poništavanja samosmetnji od ključnog značaja.

4. Povećanje povezivanja i puna pokrivenost

6G mreže su osmišljene da odgovore na praktične izazove sa kojima se suočavaju konvencionalne mreže. Njihov cilj je da podrže nove, podatkovno intenzivne aplikacije kroz povećanu povezanost i proširenje mrežnih kapaciteta. To se može postići poboljšanjem pokrivenosti, uključujući obezbeđivanje univerzalne dostupnosti u udaljenim i izolovanim područjima, koristeći izvodljiva i isplativa rešenja. Da bi se ovi ciljevi ostvarili, 6G mreže treba da budu decentralizovane i zasnovane na integraciji različitih mreža, uključujući zemaljske, vazdušne, pomorske, podvodne i satelitske komunikacije. Takva integracija omogućava stvaranje pouzdanih i preciznih mreža sa globalnom pokrivenošću, dok je ključna za povećanje kapaciteta i dometa mreže. Očekuje se da će integracija heterogenih mreža postati temeljna komponenta budućih 6G bežičnih komunikacionih sistema [98].

Ova kombinacija ima za cilj da obezbedi pristup Internetu velike brzine u ruralnim, urbanim, pustinjskim i morskim oblastima. Takva integracija bi mogla da igra suštinsku ulogu u omogućavanju nastajanja komunikacionih sistema Interneta podvodnih stvari (IoUT) [99]. IoUT komunikacija je neophodna za jeftin transport, pozicioniranje i navigaciju, nadgledanje i bezbednost, kao i za predviđanje i prevenciju katastrofa. Stoga, da bi se postigle besprekorne komunikacione mreže, potrebne su nove mrežne arhitekture, infrastrukture i arhitektura bez ćelija sa visokokvalitetnim komunikacionim uslugama.

4.1. Integracija zemaljskih i vanzemaljskih komunikacionih mreža

Kao što je gore pomenuto, očekuje se da buduće mreže 6G integrišu zemaljske platforme, koje sadrže konvencionalne bazne stanice, sa nezemaljskim (vazdušnim) platformama kao što su UAV, platforme za velike visine (HAPS) i satelitske komunikacije. Ova integracija se može iskoristiti za obezbeđivanje ekonomične, veće brzine prenosa podataka, sveprisutnog širokopojasnog povezivanja i pune pokrivenosti.

Konkretno, integracija između zemaljskih i vanzemaljskih mreža u budućim 6G komunikacionim sistemima može se koristiti za povećanje bežične pokrivenosti kako bi se dosegla područja koja se ne opslužuju ili slabo opslužuju. Na primer, nezemaljski se može koristiti u slepim uglovima kao što su pustinje, planine i mora. Pored toga, integracija se takođe može koristiti za poboljšanje dostupnosti, kontinuiteta i pouzdanosti usluge. Na primer, nezemaljske platforme mogu obezbediti sekundarnu rezervnu rutu za održavanje komunikacionih mreža kada je primarna ruta nedostupna. Takva rezervna ruta se može desiti u udaljenim oblastima ili okeanima, ili kada zemaljske kule ne rade, na primer, nakon prirodnih katastrofa. Štaviše, integracija između zemaljskog i nezemaljskog može podržati fleksibilnost mreže, skalabilnost i prilagodljivost. U tom pogledu, vanzemaljski se može koristiti za rasterećenje mreže u situacijama velikog opterećenja. Štaviše, vanzemaljske mreže bi mogle da podrže brzi bežični backhaul i omoguće besprekoran kontinuitet i pouzdanost usluge. Nedavne studije pokazuju mogućnost korišćenja vanzemaljskih mreža za prenošenje emitovanih signala između zemaljskih elemenata kao što je bazna stanica [100], [101].

Gore pomenute prednosti integracije zemaljskih i vanzemaljskih će zajedno doprineti boljem korisničkom iskustvu u budućim 6G mrežama. Pored toga, besprekorna integracija između zemaljskih i vanzemaljskih mreža će obezbediti visokokvalitetno širokopojasno povezivanje. U tom kontekstu, 6G mreže mogu dalje da prošire objedinjavanje zemaljskih i nezemaljskih komponenti u višedimenzionalnu i višeslojnu arhitekturu kako bi se postigao poboljšani kapacitet, fleksibilnost i otpornost. Nedavna dostignuća u softverski definisanim mrežama, veštačkoj inteligenciji i tehnologijama za presecanje mreže pružaju alate koji omogućavaju besprekornu integraciju između zemaljskih i vanzemaljskih mreža. Softverski definisane mreže mogu igrati ključnu ulogu u efikasnoj i dinamičkoj kontroli mreže i radu među segmentima. Dalje, veštačka inteligencija se može iskoristiti u integraciji između zemaljskih i vanzemaljskih mreža za automatizaciju rada i kontrole mreža i za postizanje otpornosti, fleksibilnosti i skalabilnosti u upravljanju sistemom.

Veštačka inteligencija se takođe može iskoristiti za donošenje brzih, efikasnih i tačnih odluka u realnom vremenu, što će pomoći uspešnosti integracije zemaljskih i vanzemaljskih mreža. Štaviše, upravljanje resursima zasnovano na presecanju mreže može se potencijalno iskoristiti za poboljšanje performansi integrisanog pružanja usluga različitim korisnicima sa različitim aplikacijama. Osim toga, mmVave komunikacija se može koristiti za poboljšanje performansi vanzemaljskih komunikacionih mreža. U tom smislu, efikasno upravljanje snopom i mehanizmi samoizlečenja mreže za vanzemaljske komunikacione mreže mogu se koristiti za postizanje ovog cilja.

4.2. Komunikacije bespilotnih letelica (UAV)

Očekuje se da će 6G mreže u potpunosti podržavati povezivanje autonomnih vozila i dronova kroz komunikacione sisteme zasnovane na UAV tehnologiji. UAV komunikacioni sistemi se mogu posmatrati kao platforme male visine (LAP) i biće korišćeni u 6G mrežama za omogućavanje komunikacije bez klasičnih ćelija. U poslednje vreme zabeležen je veliki interes za integraciju bespilotnih letelica u bežične mreže radi poboljšanja mrežne pokrivenosti u situacijama visokog opterećenja. Dronovi mogu funkcionisati kao leteće bazne stanice, pristupne tačke ili releji, pružajući ekonomičnu i energetsku efikasnu radio pokrivenost korisnicima u različitim geografskim oblastima.

Mreže zasnovane na bespilotnim letelicama mogu da igraju osnovnu ulogu u podršci brzog backhaul povezivanja za bežične mreže. UAV-ovi se mogu efikasno integrisati sa masivnim MIMO sistemima bez ćelija da bi se dobile mreže bez ćelija sa relativno malim kašnjenjem. UAV uz pomoć MIMO komunikacionih sistema može se efikasno istražiti za prikupljanje podataka u IoT scenariju. Bespilotne letelice mogu da lete na nekoliko stotina metara i mogu se fleksibilno savijati. Pored toga, bespilotne letelice se mogu efikasno kombinovati sa HAPS-ovima i satelitima kako bi se omogućila preciznija obrada podataka i podrška kontinuiranom emitovanju informacija u poređenju sa samostalnim primenama. Veštačka inteligencija i mašinsko učenje mogu se iskoristiti za pomoć komunikacionim sistemima bespilotnih letelica. Na primer, veštačka inteligencija i mašinsko učenje mogu da se koriste za dinamičku optimizaciju putanja bespilotnih letelica i za rekonfiguraciju mrežne topologije. Bespilotne letelice mogu pomoći komunikacionim

mrežama i imaju sposobnost da olakšaju usluge na zahtev, izbegnu rupe u pokrivenosti i omoguće veze u liniji vidljivosti sa visokom pouzdanošću komunikacije. Tehnologija bespilotnih letelica može biti dizajnirana tako da koristi od tehnika bežičnog prenosa energije i koristi obnovljivu energiju (npr. solarnu energiju). Korišćenje ovakvih tehnika omogućava bespilotnim letelicama da budu potpuno napunjene dugo vremena. Bespilotne letelice se mogu koristiti za podršku podvodnim komunikacionim sistemima, kao i za otkrivanje izlivanja nafte. Pored toga, bespilotne letelice se mogu efikasno koristiti za postizanje nekoliko osnovnih namena kao što su hitne službe, sistemi za predviđanje i rano upozoravanje, bezbednosno praćenje i nadzor, otkrivanje požara, upravljanje prirodnim katastrofama, dostava paketa i praćenje zagađenja. Bespilotne letelice mogu da se koriste da pomognu mobilnim računarskim mrežama da povećaju efikasnost računara i smanje kašnjenje. Ove ključne ključne usluge promovišu bespilotne letelice kao jednu od najvažnijih tehnologija za buduće 6G bežične komunikacione mreže [102].

Uprkos obećavajućim prednostima tehnologije bespilotnih letelica, postoji nekoliko tehničkih izazova koje treba rešiti. Na primer, male veličine bespilotnih letelica i varijabilnost položaja i brzina čine otkrivanje i praćenje bespilotnih letelica izazovnim. Stoga je od suštinskog značaja razvoj snažnog mehanizma za identifikaciju i praćenje bespilotnih letelica. MIMO sistemi velikih razmera mogu se koristiti zajedno sa radarima da bi se povećala verovatnoća otkrivanja bespilotnih letelica. Pored toga, bespilotne letelice obično troše veliku energiju kako bi podržale njihovu fleksibilnost kretanja i održale putovanja na velike udaljenosti . Zbog toga je potreban napredni mehanizam za upravljanje napajanjem. UAV obično prikupljaju ogromne količine podataka. Tako ogromno prikupljanje podataka može da izazove probleme sa ograničenjem skladištenja bespilotnih letelica [103]. Zbog toga su potrebne nove tehnike kompresije podataka za rešavanje problema skladištenja. U ovom kontekstu, ivično računarstvo se može iskoristiti kao održivo jeftino i energetski efikasno rešenje za povećanje računske sposobnosti bespilotnih letelica [103].

Bespilotne letelice su u stanju da efikasno prebace svoje računarski intenzivne aktivnosti na ivično računarstvo. Takođe, za bespilotne letelice su potrebne napredne tehnike obrade signala i slike. Tako se mogu koristiti efikasne i niskokompleksne šeme kompresije signala i slike [104]. Štaviše, razvoj efikasnih i robusnih zaštitnih mehanizama za suočavanje sa sajber i fizičkim napadima u UAV sistemima je od ključnog značaja. Štaviše, potrebno je razviti precizno modelovanje kanala i mehanizam za brzu procenu kanala za sistem bespilotnih letelica. Osim toga, potrebni su novi protokoli komunikacije i rutiranja za UAV sisteme. Smetnje su još jedno ključno pitanje koje utiče na pouzdanost komunikacije bespilotnih letelica. Takve smetnje postaju ozbiljnije u scenarijima u kojima dominira vidno polje gde bespilotne letelice lebde na velikim visinama [105]. Stoga je razvoj mehanizma za izbegavanje smetnji za bespilotne letelice zanimljiva istraživačka tema koju treba razmotriti u budućnosti.

Za efikasnu kontrolu i upravljanje rojem dronova od strane zemaljskih BS-ova u postavljanju zemaljskih čvorova male snage za HetNets sledeće generacije, predložen je robustan pristup kontroli formiranja roja dronova kako bi se povećala snaga formacije dronova tokom kontrole leta. Njihov cilj je bio da poboljšaju kapacitet mreže u žarišnim tačkama u saobraćaju uzimajući u obzir upotrebu mmVave komunikacija tokom razmene informacija između zemaljskih BS i dronova. Zbog ograničenja tradicionalnog oblika antene, kao što su ograničeni uglovi i neprijatnosti za postavljanje na leteće objekte, predstavljen je novi oblik antene u obliku cevi koja

se koristi za formiranje roja dronova. Posebno, model praćenja zraka zajedno sa teorijom prostorne distribucije prijemnika su korišćeni u dizajnu cevi antene. Prednost ove vrste antene bila je u poboljšanju kvaliteta i primljene snage mmtalasnih signala između zemaljskih BS i drona. U predloženom pristupu, bespilotne letelice opremljene usvojenom antenskom strukturom mogu da lete oko zadatih regiona u kojima je vodeći dron prenosio svoje signale položaja do zemaljske BS kao backhauling i istovremeno primao signal fronthaul od zemaljske BS [103].

Kako bi se prevazišlo ograničenje efekta blokade mmWave komunikacija, tehnika zgušnjavanja malih ćelija (tj. zgušnjavanje mreže) je dobar izbor za projektovanje arhitekture 5G sistema. Razlog je taj što primena zgušnjavanja malih ćelija može povećati verovatnoću uslova prenosa LOS-a zbog povećanog broja pristupnih tačaka (AP). Da bi omogućili denzifikaciju malih ćelija, primenjuju se bespilotne letelice kao mmWave AP koje su bili raspoređene na način mreže Menhetna kao tipičnog urbanog scenarija, sa ciljem da se smanji verovatnoća otkaza. Istražen je uticaj mmVave AP-ova montiranih na UAV na propusnost zemaljskih UE i verovatnoće pokrivenosti u slučaju neujednačenog opterećenja. Dokazano je da prisustvo letećih UAV AP sa mmVave komunikacijama pod datim urbanim scenarijima može dovesti do ping-pong efekata, gde je utvrđeno da performanse propusnosti fluktuiraju zbog čestih primopredaja UE pristupa između UAV-ova i najbližih AP-ova [104]. Ovo bi prouzrokovalo sveukupno pogoršanje performansi protoka po UE.

Integracija brojnih novih servisa i aplikacija u bežične mreže potpomognute UAV-om sa mmWave komunikacijama zahteva fundamentalno razumevanje principa dizajna i kontrolnih mehanizama, kako bi se ispunili zahtevi različitih kriterijuma optimizacije, npr. QoS, energetska efikasnost, maksimizacija protoka itd. Ovi zahtevi, jedan od glavnih izazova za principe dizajna i mehanizme kontrole je kako efikasno upravljati i planirati mrežne resurse, kao što su snaga prenosa, radio spektar, brzina prenosa, računarske sposobnosti, podnosač, kapacitet backhaul-a, dostupnost skladištenja, keširanje sadržaja itd. Problem upravljanja resursima je široko uključen u nekoliko mrežnih scenarija, ali nije dobro istražen u bežičnim mrežama koje podržavaju UAV sa mmVave komunikacijama.

Da bi se efikasno iskoristile prednosti 5G HetNeta uz pomoć bespilotnih letelica, predstavljena je nova HetNet arhitektura koja je koristila dvostruke operativne frekvencijske opsege u poređenju sa tradicionalnim HetNetovima. Konkretno, HetNet arhitektura se sastojala od makro zemaljskog BS-a koji radi u mikrotalasnom opsegu, višestrukih dual-modnih malih zemaljskih BS-ova koji rade u dve vrste mmWave opsega i više letećih malih BS-ova zasnovanih na UAV-ima koji rade u mikrotalasnom opsegu. Pored toga, zemaljski korisnici mogu da se opslužuju u tri vrste slučajeva [103]:

1) mikrotalasni zemaljski makro BS,

2) mali BS koji lete u mikrotalasima (SBS),

3) zemaljski SBS sa nižim mm Talasnim opsezima predstavljenim sa L i višim opsegom mm Talasa.

4.3. Stanica platforme na velikoj nadmorskoj visini (HAPS)

HAP-ovi, poput vazdušnih brodova i balona, predstavljaju kvazistacionarne umrežene vazdušne platforme koje operišu u stratosferskom sloju atmosfere. Oni se obično nalaze na nižim visinama u odnosu na satelite, sa komunikacionim visinama između 15 i 25 km iznad površine Zemlje. Tehnički, HAP platforme funkcionišu kao leteći repetitori, pružajući bežične širokopojasne usluge emitovanja i višestrukog prenosa, čime doprinose proširenju mrežne pokrivenosti i povezanosti [106], [107].

HAPS komunikacije imaju nekoliko prednosti kao što su:

1) operativna jednostavnost;
2) jednostavnost implementacije (tj. zahtevaju jednostavnu infrastrukturu);
3) jeftino postavljanje i lansiranje;
4) efikasno koristiti raspoloživi spektar;
5) podržavanje duge geografske pokrivenosti.

U pogledu vremena leta i pokrivenosti, HAP postižu bolje performanse u poređenju sa sistemima bespilotnih letelica [107]. HAP se može smatrati vrednim jeftinim rešenjem, koje se efikasno koristi za dopunu satelitskih komunikacionih mreža. HAP-ovi imaju značajno manje kašnjenje u širenju u poređenju sa satelitima na geostacionarnoj Zemljinoj orbiti (GEO) i satelitima niske Zemljine orbite (LEO). HAP-ovi mogu da lete na zahtev da obezbede brzu bežičnu vezu uzastopno za različite regione. Ova funkcija može biti korisna za podršku IoT aplikacijama koje su osetljive na kašnjenje u 6G mrežama. HAP se može koristiti kao srednji komunikacioni sloj između satelita i zemaljskog prijemnika za pružanje komunikacionih usluga na lokalnom regionalnom nivou. Komunikacioni sloj HAP-a se može iskoristiti za postizanje nekoliko zadataka obrade signala na lokalnom nivou, dopunjavanje postojećih zemaljskih i satelitskih komunikacionih sistema, podržavanje multimedijalnog emitovanja i multicast servisa i poboljšanje budžeta veze. HAP-ovi se takođe mogu iskoristiti za podršku velikog broja zemaljskih ćelija u situacijama velikog opterećenja i za postizanje visokopropusnih backhaul linkova. HAP-ovi se mogu iskoristiti za obavljanje višestrukih zadataka kao što su nadzor, navigacija i položaj, daljinsko otkrivanje, inteligentni transportni sistemi i komunikacije u hitnim slučajevima. HAPS platforme mogu ugostiti mobilno računarstvo na rubu da bi obezbedile dodatne računarske i skladišne funkcionalnosti, a samim tim i pomogle zemaljskim terminalima. HAPS-i mogu da iskoriste obnovljivu energiju, na primer, solarne panele, koji su energetski efikasniji izvori energije u poređenju sa tradicionalnim izvorima energije.

Iako HAP-ovi imaju potencijal da podrže nekoliko osnovnih aplikacija, oni se i dalje suočavaju sa nekim tehničkim izazovima koje treba rešiti da bi bili prihvaćeni na globalnom nivou. Na primer, ograničena autonomija HAP-ova smatra se jednim od ključnih izazova kojima se treba pozabaviti. Pored toga, HAPS su osetljiviji na vremenske uslove (npr. vetar velike brzine, slabljenje kiše, slabljenje snega, temperature i magla). Kao takav, potreban je robustan dizajn koji čini da se HAPS stabilizuje u vazduhu i radi u željenim vremenskim uslovima. Smetnje su još jedan problem sa kojim se suočava HAP komunikacija i ograničava performanse na nivou veze u takvim bežičnim mrežama. Zbog toga je potrebna šema za ublažavanje smetnji za HAP. Osim

toga, HAP-ovi moraju biti neprimetno integrisani sa postojećim mrežama da bi se obezbedile brze backhaul/fronthaul veze. Stoga je potrebna dalja istraga u ovom pogledu. Razvijanje tačnih modela kanala za HAP koji imaju za cilj da predvide snagu primljenog signala na datoj udaljenosti od predajnika je od interesa. Takođe je potrebno razviti efikasnu obradu signala, alokaciju resursa, raspoređivanje, modulaciju, kodovanje, protokole i mehanizme primopredaje za HAP sisteme. Konačno, korišćenje MIMO sistema velikih razmera i mmVave frekvencija sa HAP-ovima je zanimljiva istraživačka tema koju treba istražiti u budućnosti.

4.4. Satelitska komunikacija

Satelitska komunikacija se smatra jednom od ključnih tehnologija za buduće 6G mreže, omogućavajući širokopojasnu povezanost, visoko kapacitetne vazdušne platforme, preciznu globalnu pokrivenost i velike brzine prenosa podataka. Glavni cilj 6G mreža je integracija satelitskih sistema sa zemaljskim mrežama. Vazdušni komunikacioni sistemi i zemaljske bazne stanice mogu koristiti satelitsku povezanost za obezbeđivanje backhaul podrške i proširenje pokrivenosti na širem području [108].

Satelitske komunikacije mogu se efikasno primenjivati u navigaciji, hitnim službama, pozicioniranju, praćenju i detekciji. One takođe mogu dopuniti zemaljske mreže, podržavajući ključne IoT usluge i druge bežične komunikacione servise, uključujući AR, VR i multimedijalno emitovanje sa 4K i 8K video prenosom. Zbog svojih mogućnosti, satelitski komunikacioni sistemi privukli su značajnu pažnju kako industrije, tako i akademske zajednice.

Obično su satelitske stanice podeljene na tri platforme na osnovu njihovih karakteristika orbite. U ove kategorije spadaju sateliti geostacionarne orbite Zemlje (GEO) sa visinom od oko 35.800 km, sateliti srednje orbite Zemlje (MEO) visine između 2.000 i 35.000 km i sateliti niske Zemljine orbite (LEO) visine između 200. i 2.000 km. [109].

Dok GEO satelit može da pokrije izuzetno velika geografska područja i da se stalno vidi sa zemaljskih stanica, pati od velikog kašnjenja i slabljenja signala zbog dugih komunikacionih veza. Nasuprot tome, sateliti LEO i MEO nude poboljšani odnos primljenog signala i šuma sa manjim kašnjenjem u prenosu zbog njihove kraće udaljenosti od zemlje. Za širokopojasne aplikacije, LEO satelitski sistem je dobio značajnu pažnju poslednjih godina. Ovo je zbog činjenice da se LEO platforme nalaze blizu zemlje u poređenju sa MEO i GEO satelitima. Dakle, LEO ima sposobnost da smanji kašnjenje u prenosu, ublaži gubitak putanje i postigne visok odnos signal-šum, a samim tim i da obezbedi visoku brzinu prenosa podataka. Satelitska komunikacija LEO je od suštinskog značaja za ruralna i udaljena područja, koja mogu da obezbede veću pokrivenost i kapacitet i mogu se koristiti u kombinaciji sa komunikacionim sistemima zasnovanim na HAPS i UAV-ovima. Osim toga, Inteligentna mreža između satelitske i bespilotne letelice može biti veoma efikasna za buduće 6G mreže kako bi omogućila široku pokrivenost. Korišćenje MIMO sistema velikih razmera sa LEO satelitom može postići visoke dobitke niza, a samim tim značajno poboljšati performanse komunikacije.

Satelitske komunikacije se mogu suočiti sa nekim tehničkim izazovima kao što su varijacija doplera i doplerov pomeraj, veća stopa greške po bitu, osetljivost na gubitak putanje i kašnjenje u prenosu zbog velikih razdaljina komunikacije [110]. Ovim izazovima se treba

pozabaviti jer mogu uticati na komunikaciju kao što su sinhronizacija, pouzdanost, obrada i detekcija signala i nasumični pristup. Integracija zemaljskih i vanzemaljskih mreža suočava se sa izazovima vezanim za protokole prenosa fizičkog sloja i kontrole pristupa medijima (MAC), na primer, slučajni pristup i hibridni automatski zahtev za ponavljanje (HARK). Da bi se pokrila zemlja, potrebno je postaviti nekoliko satelitskih stanica. Ovo može stvoriti izazove sinhronizacije jer su sateliti stalno u pokretu. Potrebno je precizno modelovanje kanala vazduh-zemlja, optimizacija trajektorije i efikasni mehanizmi alokacije resursa za satelitske komunikacije. Metoda mašinskog učenja može biti korisna za satelitske komunikacione sisteme. Na primer, metoda mašinskog učenja može se istražiti u satelitskim operacijama, praćenju vremena, aplikacijama za posmatranje zemlje i fuziji senzora za navigaciju. Pored toga, mašinsko učenje se može koristiti za rešavanje problema složenosti u satelitskim mrežama i za poboljšanje efikasnosti tradicionalnih algoritama zasnovanih na modelu za obradu signala i alokaciju resursa. Stoga su potrebna dalja istraživanja u vezi sa primenom mašinskog učenja u satelitskim komunikacijama. Potrebne su tehnike inteligentnog upravljanja mobilnošću, koje uzimaju u obzir primopredaju satelitskih i zemaljskih stanica. Interferencija između zemaljske i satelitske platforme je još jedan problem koji bi mogao ograničiti performanse na nivou veze u satelitskim mrežama.

Drugi izazov je vezan za efikasno korišćenje resursa i efikasno korišćenje raspoloživog spektra sa satelitskim mrežama. Štaviše, razvoj novih komunikacionih protokola je takođe neophodan da bi se postigao besprekoran prenos između zemaljskih i satelitskih mreža. Sve u svemu, uprkos atraktivnim prednostima realizacije sveprisutne pokrivenosti u 6G mrežama integracijom zemaljskih i vanzemaljskih mreža, koje mogu prevazići konvencionalna ograničenja pokrivenosti, još uvek treba rešiti nekoliko izazova pre nego što se takva globalna pokrivenost može efikasno iskoristiti u budućim 6G mrežama.

4.5. Masivni MIMO Sistem bez ćelija

Masivni MIMO system bez ćelija se smatra ključnom fundamentalnom tehnikom za povećanje povezanosti i obezbeđivanje pune pokrivenosti u budućim 6G mrežama. U 6G mrežama će doći do integracije različitih frekvencija i heterogenih komunikacionih tehnologija. U tom cilju, upotreba u mrežama se mora neprimetno premeštati sa jedne mreže na drugu bez potrebe za bilo kakvim ručnim konfigurisanjem. U trenutno raspoređenim mrežama, mobilnost korisnika je predmet mnogih primopredaja u mrežama. Kao rezultat toga, biće mnogo kašnjenja primopredaje, neuspešnih primopredaja i gubitaka informacija. Stoga, 6G mreže treba da razbiju ograničenja koncepta ćelija u konvencionalnim bežičnim komunikacionim sistemima da bi postigle bolji kvalitet usluge. Pokrivenost na zahtev bez ćelija je uspostavljena da bi se prevazišla ekonomska neefikasnost konvencionalne ćelijske arhitekture. Nedavni rezultati su otkrili da se bez ćelija postiže obećavajuće rešenje za efikasnu podršku masovnog pristupa za IoE uređaje u budućim 6G mrežama. Vredi napomenuti da se očekuje zgušnjavanje infrastrukture 6G mreža, koje će sarađivati na formiranju mreže bez ćelija sa besprekornim kvalitetom usluge. Konkretno, zgušnjavanje mreže se može postići upotrebom više pristupnih tačaka koje su povezane sa centralnom procesorskom jedinicom (CPU). Pristupne tačke su proizvoljno raspoređene u geografskom području. Svaka pristupna tačka je opremljena sa više antena, koje mogu da sarađuju

kako bi formirale skalabilnu MIMO mrežu bez ćelija koja opslužuje više mobilnih uređaja na velikom geografskom području. Osnovni princip masivnog MIMO-a bez ćelija potiče od konvencionalnih distribuiranih MIMO komunikacija ili onoga što je poznato kao koordinirane komunikacije sa više tačaka (CoMP) [111], [112], [113].

Masivni MIMO komunikacioni sistem bez ćelija ima potencijal da postigne prostornu raznovrsnost omogućavajući mobilnom korisniku da bude zajednički opslužen na istom vremensko-frekventnom resursu od strane više od jedne bazne stanice na koordinisan način. Glavna razlika između komunikacije bez ćelije i konvencionalnih MIMO sistema je u tome što umesto dodeljivanja svakog mobilnog korisnika određenoj ćeliji sa specifičnom baznom stanicom, koja je opremljena sa relativno velikim brojem antenskih elemenata, ona opušta ograničenja granica ćelije. Dakle, inter-ćelijska smetnja koju izazivaju mobilni korisnici locirani na granicama ćelija može efikasno da se ublaži ili čak eliminiše. Pored toga, nedostatak lošeg kvaliteta kanala koji se može desiti kada opslužuje samo jedna bazna stanica može se efikasno rešiti. Štaviše, glavni cilj masivnog MIMO komunikacionog sistema bez ćelija je postizanje koherentne obrade preko velikih geografski raspoređenih antena baznih stanica. Ovo bi omogućilo poboljšan kvalitet usluge, skoro ujednačene dostižne stope širom područja pokrivenosti i besprekornu primopredaju za sve mobilne korisnike bez obzira na njihovu poziciju u mrežama.

U masivnim MIMO sistemima bez ćelija, svi mobilni korisnici imaju relativno jednake udaljenosti do dodeljenih pristupnih tačaka. Zahvaljujući svojoj sposobnosti da istražuje prostornu raznolikost protiv nestajanja, masivna MIMO komunikacija bez ćelija može potencijalno da obezbedi mnogo veću verovatnoću pokrivenosti u poređenju sa konvencionalnim raspoređenim MIMO sistemima. Korišćenje velikog broja proizvoljno raspoređenih pristupnih tačaka u masivnom MIMO sistemu bez ćelija bi ponudilo visoko pojačanje multipleksiranja, više stepena slobode i visoko pojačanje niza. Masivni MIMO bez ćelija radi sa bilo kojim frekventnim opsezima, uključujući ispod 6 GHz, mmVave opsege i THz frekvencije [111]. Pored toga, masivna MIMO komunikacija bez ćelija je posebno korisna za korisnike mobilnih uređaja na ivici ćelije koji doživljavaju ozbiljne gubitke velikih razmera. Mreže bez ćelija rade u TDD režimu, koji se oslanja na reciprocitet UL/DL kanala da bi se dobio CSI za DL prethodno kodiranje. Masivni MIMO bez ćelija se takođe može integrisati sa vazdušnim sistemima kako bi se efikasno poboljšala energetska efikasnost i poboljšala pokrivenost sistema. Masivni MIMO sistem bez ćelija omogućava implementaciju šema za digitalnu obradu signala niske složenosti u UL i DL prenosima. Dakle, većina obrade signala osnovnog opsega može da se postigne lokalno na pristupnim tačkama i uz pomoć računara od CPU-a. Ovaj UPU se može smatrati procesorom na ivici oblaka gde njegov dizajn podseća na okvir C-RAN. Do sada je pokazano da masivni MIMO sistem bez ćelija nadmašuje konvencionalne sisteme malih ćelija i ćelijske masivne MIMO sisteme. Takođe, masivni MIMO bez ćelija može postići do pet puta poboljšanje u smislu 95% verovatnoće brzine prenosa podataka po korisniku u poređenju sa konvencionalnim sistemom malih ćelija, i, što je još važnije, robusniji je za neželjeno slabljenje i smetnje. Čak i poboljšane performanse brzine prenosa podataka po korisniku sa verovatnoćom od 95% mogu se postići masivnim MIMO-om bez ćelija kada su pristupne tačke i korisnici opremljeni sa više antena [112]. Istraživano je prethodno kodiranje i optimizaciju snage, kao i MMSE obrada, razmatrana je prostorna korelacija za Raileigh i Rician kanale fedinga, analizirane su performanse i kontrola snage masivnog MIMO sistema bez ćelija sa hardverskim oštećenjima. Masivni MIMO sistem bez

ćelija ima potencijal da postigne značajno poboljšanje u bežičnim komunikacionim sistemima pod različitim scenarijima primene.

Slično konvencionalnim MIMO sistemima, performanse masivnog MIMO-a bez ćelija se oslanjaju na tačnost CSI procene, koja se dobija korišćenjem prenosa sekvence obuke između pristupnih tačaka i korisnika. Međutim, pošto se kanali razlikuju po vremenu i učestalosti, pilot resursi se moraju ponovo koristiti između korisnika. Stoga, ponovna upotreba ovog pilota može izazvati kontaminaciju pilota koja smanjuje masivne MIMO performanse bez ćelija. Pored toga, CSI procena može biti problematična u FDD režimu rada gde reciprocitet kanala između UL i DL ne važi. Backhaul je još jedno praktično ograničenje koje se suočava sa masivnim MIMO sistemom bez ćelija, koje treba istražiti. Osim toga, performanse masivnog MIMO-a bez ćelija na nivou sistema treba temeljno istražiti. Na primer, neophodan je razvoj tehnika raspoređivanja male složenosti koje postižu pravičnost među korisnicima, posebno kada veliki broj korisnika treba da bude opslužen istovremeno tokom istog vremenskog i frekventnog bloka resursa. Pronalaženje izvodljivih algoritama za alokaciju resursa u masivnim MIMO mrežama bez ćelija je takođe potrebno. Pored toga, optimizacija lokacija pristupnih tačaka i kako efikasno emitovati sistemske informacije i sinhronizaciju signala je takođe od suštinskog značaja. Pronalaženje izvodljivog pristupa usmerenog na korisnika i dalje je izazov. Kao takva, potrebna je dalja istraga u ovom pogledu. Primena mašinskog učenja i dubokog učenja u masivnim MIMO sistemima bez ćelija je takođe zanimljiva istraživačka tema koju treba istražiti u budućnosti. Štaviše, neophodan je razvoj izvodljivog mehanizma za slučajni pristup i algoritame za kontrolu snage, koji uravnotežuju kašnjenje, pravednost i brzinu podataka, u masivnim MIMO mrežama bez ćelija [111]. NOMA omogućen dvostepeni kanal sa slučajnim pristupom (RACH) može da se koristi sa masivnim MIMO mrežama bez ćelija radi poboljšanja efikasnosti korišćenja resursa i smanjenja kašnjenja [113]. Ovu kombinaciju NOMA i masivnih MIMO sistema bez ćelija trebalo bi dalje istraživati u budućnosti.

4.6. Održavanje bezbednosti, tajnosti i privatnosti

Očekuje se da će bezbednost, poverljivost i privatnost biti ključni elementi budućih 6G komunikacionih sistema. Tehnički izazovi u ovim oblastima moraju biti rešeni kako bi sistemi bili otporni na sajber-napade i bezbedni na fizičkom sloju. Pronalaženje efikasnih tehnika za prevazilaženje ovih izazova je od suštinskog značaja. Posebno je važno očuvanje privatnosti u zdravstvenim sistemima, gde 6G mora garantovati najviši nivo zaštite podataka pacijenata, uključujući i sigurnost implantabilnih uređaja. Tradicionalna rešenja verovatno neće biti dovoljna za buduće bezbednosne zahteve, pa su nove napredne tehnologije neophodne za ispunjavanje kriterijuma bezbednosti, poverljivosti i privatnosti. Osim toga, očekuje se da će 6G mreže omogućiti paradigmu autonomnih, dinamičnih i inteligentnih sistema, pri čemu se blockchain, kvantne komunikacije, veštačka inteligencija i mašinsko učenje ističu kao ključne tehnologije za rešavanje ovih izazova.

Priroda emitovanja radio-propagacije mmVave signala čini bežični prenos otvorenim i dostupnim kako legitimnim korisnicima, tako i neovlašćenim korisnicima (tj. zlonamernim prisluškivačima i napadačima) u bežičnim mrežama koje podržavaju UAV sa 5G mmVave

komunikacijama. Otvoreno okruženje za prenos i nedostatak fizičke zaštite dovode do ozbiljnog bezbednosnog rizika od zlonamernih napada i prisluškivanja, na primer, pasivno presretanje osetljivih informacija i prekid legitimnog prenosa putem aktivnog ometanja [111]. Da bi se suzbili napadi, potrebno je osmisliti efikasan bezbednosni mehanizam koji će omogućiti legitimnim primaocima da uspešno dobiju poverljive poruke od predajnika, dok istovremeno sprečavaju prisluškivače da tumače legitimni prenos.

Tradicionalne kriptografske tehnike zasnovane na ključu generalno se fokusiraju na primenu šifrovanja i dešifrovanja na višim slojevima kao što su sloj mreže i sloj aplikacije da bi se obezbedio bežični prenos [111]. Alternativno, korišćenjem prednosti fizičkih karakteristika širenja radija, teoretska bezbednost informacija se takođe može postići na fizičkom sloju kako bi se obezbedile direktne bezbedne komunikacije u bežičnim mrežama potpomognutim UAV [111], [112]. Integracijom mmVave komunikacija u bežične mreže potpomognute UAV-om, postoje i neke nedavne studije o bezbednosti fizičkog sloja koje su fokusirane na usmerenu modulaciju [111], [112] i prenos ometanja.

4.7. Usmerena modulacija

Zahvaljujući usmerenim mmWave snopovima, u bežičnim mrežama koje podržavaju UAV komunikacije podrazumevaju se kanali linijske vidljivosti (LOS). Kao značajna tehnika fizičkog sloja za bezbednost, usmerena modulacija (DM) je privukla pažnju i akademske zajednice i industrije kao efikasno rešenje za sigurne bežične komunikacije, posebno u LOS scenarijima. Za razliku od konvencionalnih kriptografskih metoda koje funkcionišu na višim slojevima, DM može unaprediti sigurnost na fizičkom sloju u UAV mmWave mrežama, zahvaljujući karakteristikama prenosa signala koji su oblikovani u zavisnosti od prostornog pravca.

Kao što je poznato, u konvencionalnoj modulaciji, zlonamerni prisluškivači imaju priliku da prisluškuju uhvaćene poruke iz modulisanih signala koji primaju, jer jedina razlika između primljenih poruka iz različitih pravaca leži u snazi signala za tradicionalni bežični predajnik. Međutim, DM je tipično bezbednosna tehnika na strani predajnika zbog svoje sposobnosti da projektuje modulisane signale poverljivih poruka u jedan ili više željenih prostornih pravaca u određenim obrascima konstelacije. Istovremeno, u svim ostalim prostornim pravcima, konstelacioni obrasci istih modulisanih signala biće namerno izobličeni u fazi i amplitudi tako da prisluškivači ne mogu uspešno presresti i dekodovati poverljive poruke. Kao rezultat toga, uglovi usmerenosti željenog prijemnika i prisluškivača (tj. DoAs modulisanih signala) su veoma važni za DM predajnik, jer DM može postići visoke performanse pomoću tehnike formiranja zraka u željenim prostornim pravcima. Sa praktične tačke gledišta, željeni prostorni pravci se mogu unapred definisati kao apriorne informacije za DM predajnik i legitimni prijemnik [66].

Sa strane DM predajnika, QPSK modulisani signali sa četiri fazno zavisna jedinstvena simbola poverljivih poruka se generišu u mmWave frekvenciji korišćenjem 3D tehnologije formiranja snopa. Za legitimnog primaoca, modulisani signal poverljivih poruka se projektuje u apriorni prostorni pravac, koji poseduje određeni obrazac konstelacije. Za prisluškivače, obrasci sazvežđa istog modulisanog signala su posebno kodovani duž svih pravaca, što takođe znači projekciju veštačkog šuma (AN). Zajednički rad formiranja zraka i AN projekcije na fizičkom

sloju čini prisluškivacima veoma teškim da presretnu poverljive poruke, što može dodatno poboljšati bezbednost sistema [67].

Međutim, kada se prisluškivač pomeri unutar pravca glavnog snopa željenog prijemnika, prisluškivač takođe može da presretne poverljive poruke. Da bi se rešio ovaj problem, predložen je novi koncept bezbednog i tačnog bežičnog prenosa, u koji su ugrađeni DM, nasumično frekvencijski diverzitet i fazno poravnanje. Konkretno, predstavljena je metoda merenja DOA zasnovana na Bajesovom učenju, a vektor prethodnog kodovanja i matrica veštačke projekcije šuma na DM predajniku su dalje dizajnirani.

U poređenju sa merenjem pojedinačnih snimaka bez mašinskog učenja, predloženi pristup merenja DOA može da generiše značajno povećanje performansi u stopi tajnosti. Pored toga, Bajesov metod zasnovan na učenju može poboljšati preciznost merenja DOA sa potpuno digitalnom strukturom. Tačnije, kada se veličina skupa podataka za obuku povećava, srednja kvadratna greška se smanjila, a preciznost merenja DOA je takođe poboljšana. Štaviše, stepen tajnosti se može povećati sa rastom SINR sistema koji koristi DM tehniku, ali bi se povećanje stepena tajnosti postepeno smanjivalo kada bi se SINR povećao.

4.8. Tehnologija Blockchain-a

Očekuje se da će Blockchain tehnologija igrati ključnu ulogu u bezbednosti i autentifikaciji budućih 6G komunikacionih sistema. Na primer, od Blockchain-a se očekuje da prevaziđe bezbednosni problem informacione komunikacije [114], [115]. Takođe, blockchain omogućava istovremenu alokaciju resursa i autentifikaciju.

Blockchain ima potencijal da poboljša efikasnost mrežne saradnje. Takođe, ima nekoliko prednosti kao što su:

1) omogućavanje pouzdane komunikacije;
2) postizanje interoperabilnosti putem uređaja;
3) obezbeđivanje decentralizacije i transparentnosti komunikacija.

Blockchain ima mogućnost pouzdane razmene podataka između različitih izvora bez prolaska kroz transportni centar. Blockchain može biti koristan za mobilno računarstvo na ivici. Blockchain takođe može biti od koristi za industrijska okruženja jer omogućava direktan daljinski pristup. Takođe kontroliše ogroman broj priključaka industrijske opreme. Štaviše, blockchain može poboljšati performanse zdravstvenih sistema.

Primena blockchain tehnologije može dovesti do nekih kašnjenja u obradi, što može uticati na performanse bežične komunikacije, posebno u aplikacijama osetljivim na kašnjenje. Skalabilnost koja dolazi od upotrebe masovno povezanih uređaja do danas se smatra potencijalnim problemom za blockchain. Pored toga, blockchain zahteva da bude prilagođen kako bi bio izvodljiv za IoT uređaje sa ograničenim resursima za računanje i skladištenje. Zbog toga su potrebni intenzivni istraživački radovi kako bi se pronašlo izvodljivo rešenje za poboljšanje performansi blockchain-a i učinilo ga izvodljivim za buduće 6G mreže.

Kvantna komunikacija je nova obećavajuća tehnologija za buduće 6G mreže. Kvantna komunikacija omogućava jaku sigurnost komunikacionih sistema za 6G bežične mreže. Ovo se

postiže primenom tehnike kvantnog ključa, koja se ostvaruje na osnovu principa neizvesnosti i kvantne teoreme o nekloniranju. Kvantna komunikacija ima potencijal da poboljša efikasnost otkrivanja neželjenog ponašanja prisluškivanja. Pored toga, kvantna komunikacija ima potencijal da obezbedi izuzetno visoku brzinu podataka i snažnu zaštitu od različitih sajber napada. Kvantna komunikacija je takođe izvodljiva za bežičnu komunikaciju na daljinu [116], [117].

Kvantna komunikacija ima potencijal da reši složene probleme optimizacije sa funkcijama višestrukih ciljeva. Tehnike zasnovane na kvantima imaju mogućnost da izvršavaju algoritme mnogo brže i izvan mogućnosti klasičnih sistema. Kvantna komunikacija se može kombinovati sa tehnikom veštačke inteligencije kako bi se dodatno poboljšala bezbednost 6G bežičnih mreža. Kvantna komunikacija može značajno poboljšati efikasnost i brzinu algoritama veštačke inteligencije koji zahtevaju velike podatke i masivnu obuku. Kvantna komunikacija može biti korisna za buduće 6G komunikacione mreže. Na primer, može da poboljša kapacitet kanala, ima mogućnost da prenese nepoznato kvantno stanje, tj. kvantne teleportacije, i da postigne sigurne informacije, odnosno kvantna kriptografija korišćenjem niza naprednih komunikacionih protokola. Ovakvi napredni komunikacioni protokoli nisu mogući sa klasičnim tehnikama.

Kvantna korekcija greške se smatra glavnim tehničkim izazovom koji treba da se reši. Kao takav, razvoj šeme kodovanja kvantne korekcije grešaka je od velike važnosti. Pored toga, izgradnja mrežnih entiteta sa kvantnim internetom smatra se još jednim tehničkim izazovom sa kojim se može suočiti kvantna komunikacija, koja zahteva kvantne prekidače/rutere i repetitore. Drugi izazov je vezan za mere kapaciteta kvantnih komunikacionih kanala. Ovo se pripisuje činjenici da kvantni kanali mogu imati različite mogućnosti u pogledu dostavljanja informacija uključujući kvantne informacije, klasične informacije potpomognute preplitanjem. Zbog toga su potrebni intenzivni istraživački radovi kako bi se kvantna komunikacija učinila praktično izvodljivom u budućim 6G komunikacionim sistemima.

4.9. Ostvarivanje ultra-pouzdanih komunikacija sa niskim kašnjenjem

Dok 5G mreže podržavaju mašinsku komunikaciju (MTC) i URLLC scenarije, očekuje se da 6G podržava masivne MTC (mMTC) i masivne URLLC (mURLLC) aplikacije. Ovo omogućava 6G mrežama da isporuče sve potrebne performanse unutar prostora za brzinu, pouzdanost i kašnjenje. URLLC u 5G mrežama je specificiran za aplikacije ograničene pouzdanosti i kašnjenja. Međutim, 6G mreže sa mMTC i mURLLC odstupaju od ograničenih zahteva za pouzdanošću i kašnjenjem prema arhiviranju zahteva za skalabilnost. Takođe, 6G ima za cilj postizanje najboljeg kompromisa između ovih zahteva. Ove masivne klase usluga 6G mreža dovešće do sveprisutnog mobilnog ultraširokopojasnog (uMUB), komunikacija ultra velike brzine sa malim kašnjenjem (uHSLC) i ultravisoke gustine podataka (uHDD) [118]. Nove usluge uMUB, uHSLC i uHDD zahtevaće novi kodizajn komunikacionih, kontrolnih, senzorskih i računarskih funkcija koje uglavnom nedostaju u 5G mrežama. Kao takav, 6G ima za cilj da u potpunosti podrži ove buduće zahteve. Očekuje se da će 6G mreže evoluirati ka omogućavanju masovnog sveprisutnog povezivanja, integracije različitih tehnologija i aplikacija, omogućavanja inteligencije i postizanja masivnih decentralizovanih računarskih operacija [117].

6G mreže takođe imaju za cilj da omoguće od mašine do mašine i od čoveka do mašine sa interaktivnim aplikacijama u realnom vremenu kao što su holografske teleportacione komunikacije i taktilni internet i haptička, multisenzorna proširena stvarnost (KSR), koja uključuje proširenu stvarnost (AR) mešovitu realnost (MR) i virtuelnu stvarnost (VR), kao i podršku za aplikacije Interneta pametnih stvari (IoST) [119]. Gore pomenute aplikacije Internet of Everithing (IoE) stvaraju ultra-visoku gustinu podataka (uHDD), a neke od njih stvaraju osnovne zahteve za ultra-brzo povezivanje sa ultra-pouzdanim komunikacionim uslugama sa malim kašnjenjem (URLLC). Stoga, buduće 6G mreže treba da podržavaju ove aplikacije sa izuzetno visokim brzinama podataka i različitim zahtevima kvaliteta usluge (QoS).

Zahtevi za ultra-niskim kašnjenjem prenosa mogu biti u rasponu od jedne do nekoliko milisekundi od kraja do kraja, dok bi ultra-pouzdana komunikacija mogla biti veća od 99,9999%. Age of Information (AoI) je novi koncept koji se odnosi na URLLC, koji je nedavno uveden kako bi se okarakterisao kvalitet ažuriranja statusa informacija o kanalu i izmerilo kašnjenje kako se posmatra od strane kontrolnog sloja. AoI se može smatrati efikasnim indikacionim alatom za merenje kašnjenja u aplikacijama u realnom vremenu. Međutim, da bi ispunile sve ove zahteve i raznolik skup zahteva, 6G bežične mreže će morati da iskoriste tehniku ivičnog računarstva. Ovo bi omogućilo da se deo obrade i skladištenja podataka specifičnih za uslugu premesti sa centralnog oblaka na ivične mrežne čvorove. Ovi ivični mrežni čvorovi biće locirani bliže dobavljačima podataka i krajnjim korisnicima. Pored toga, očekuje se da će tehnike veštačke inteligencije i mašinskog učenja (npr. duboke neuronske mreže) biti ključni faktor koji omogućava budućim 6G mrežama da postignu URLLC i zadovolje raznolik skup zahteva i usluga.

4.10. Holografska teleportacija

Očekuje se da 6G mreže podržavaju novi oblik ljudske interakcije na daljinu, koji koristi sva ljudska čula uključujući sluh, vid, ukus, miris i dodir kako bi se obezbedila fizička komunikacija na daljinu u realnom vremenu [118-120]. Holografska teleportacija se smatra virtuelnom teleportacijom u realnom vremenu, koja se može sprovesti na osnovu trodimenzionalnog videa sa tehnologijom mešane stvarnosti.

Holografska teleportacija koristi mnoge kamere sa višestrukim prikazom i više senzora kako bi omogućila daljinsku interakciju u realnom vremenu i kreirala rekonstrukciju hologramа u licu. Ovo se može posmatrati kao promena paradigme sa tradicionalnih video konferencija na virtuelni sastanak uživo u realnom vremenu, čime se poboljšava iskustvo komunikacije, omogućava virtuelne koncerte, omogućava virtuelni sport i indikativno obrazovanje na daljinu/na daljinu. Holografska teleportacija se smatra jednom od aplikacija koje zahtevaju masivnu URLLC uslugu. Međutim, takva povezanost i pojačana interakcija i komunikacija će zahtevati ogromnu količinu informacija u smislu slike i videa, osim toga, zahteva brzinu prenosa podataka reda terabita u sekundi (Tb/s). U tom cilju, za prikaz trodimenzionalne holografske teleportacije sa sirovim hologramom potrebna brzina prenosa podataka od 4,32 Tb/s [121].

Holografska teleportacija zahteva latenciju od kraja do kraja u redu od submilisekunde. Stoga, da bi se omogućila holografska teleportacija, potrebni su novi algoritmi semantičkog zaključivanja. Takvi algoritmi bi omogućili inkorporaciju predstavljanja znanja u komunikacije

[120]. Pored toga, potrebna je ultra-pouzdana komunikacija sa izuzetno velikim propusnim opsegom za prenošenje holografskih informacija. Štaviše, veštačka inteligencija i tehnike mašinskog učenja mogu biti ključni faktor za buduću holografsku komunikaciju. Stoga je potrebno dalje istraživanje primene veštačke inteligencije i tehnika mašinskog učenja za holografske komunikacije.

4.11. Taktilni Internet

Taktilni internet, Međunarodna unija za telekomunikacije (ITU) opisuje kao internet mrežu koja uključuje ultra-nisku latenciju sa izuzetno visokom pouzdanošću. Dakle, taktilni internet zahteva URLLC komunikacioni servis. Taktilni Internet omogućava interakciju u realnom vremenu između čoveka-mašine i mašine-mašine preko bežične mreže. Taktilni Internet je definisan standardom IEEE P1918.1 kao mreža virtuelnih objekata u realnom vremenu ili mehanizam za daljinsko upravljanje percepcijom pristupa. Postoje različite aplikacije za taktilni internet kao što su obrazovanje, poslovanje, zdravstvena zaštita (telehirurgija), industrijska (teleodržavanje), pametna mreža i društvena mreža [122], [123]. Taktilni Internet servis je sledeća evolucija koja će omogućiti kontrolu IoE aplikacija u realnom vremenu.

Taktilni internet ima sposobnost da poboljša interakciju svih ljudskih čula sa mašinama. Taktilni internet je ključ za omogućavanje haptičke interakcije, koja se uglavnom odnosi na čulo/percepciju dodira kod ljudi i poznata je kao komunikacija kinestetičke percepcije. Taktilni Internet ima potencijal da pruži ultra pouzdanu/ultraresponzivnu komunikacionu mrežu za haptike. Taktilni internet se može koristiti u inteligentnom transportu da bi se izbegao sudar zahvaljujući malom kašnjenju od kraja do kraja i visokoj pouzdanosti. Taktilni internet ima potencijal da revolucioniše trenutno onlajn učenje, učenje na daljinu i onlajn rad. Taktilni Internet može biti podržan uz pomoć tehnologija računarstva na ivici, koje omogućavaju brzu komunikaciju, visoku pouzdanost i dostupnost.

Da bi se omogućila efikasna taktilna internet usluga, neophodan je novi algoritam veštačke inteligencije za arhitekturu računarstva na ivici. Pored toga, potrebna je efikasna višeslojna arhitektura da bi se ispunili strogi zahtevi taktilne internet usluge. Takođe, potrebne su nove napredne tehnike fizičkog sloja. Na primer, potrebni su novi dizajni za kodovanje kanala, napredno multipleksiranje talasnog oblika i tehnike višestrukog pristupa za taktilnu internet uslugu. Štaviše, 6G mreže će zahtevati besprekornu integraciju različitih tehnologija, ultra-brzo povezivanje, brzi backhaul, novi vazdušni interfejs, nove mehanizme za protokole, novu šemu čekanja, novi mehanizam za planiranje i efikasne tehnike kodovanja.

4.12. Multi-senzorne aplikacije proširene realnosti (KSR)

Proširena stvarnost (AR), mešana stvarnost (MR) i virtuelna stvarnost (VR) se smatraju slučajevima korišćenja URLLC usluga i delom IoE aplikacija. Postojeće AR/MR/VR aplikacije, koje su nedavno uključene pod novim krovnim terminom kao KSR [124], imaju velike koristi od

tehnologije taktilnog Interneta [122]. Izuzetno visoka brzina prenosa podataka i izuzetno mala latencija su potrebni da bi se postiglo potpuno AR/MR/VR imerzivno komunikaciono iskustvo. Može se očekivati da će taktilni internet omogućiti izuzetno malo kašnjenje i omogućiti deljena virtuelna okruženja sa interakcijom u realnom vremenu. Taktilni Internet omogućava da se statički sadržaj u KSR-u prenese u dinamički [125].

KSR ima potencijal da kombinuje realno i virtuelno okruženje. Takve aplikacije bi koristile kompjuterski simuliranu platformu sa iskustvom u stvarnosti i stvorile virtuelni svet koji izgleda tačno kao stvarni svet. Pored toga, audio, video, globalni sistem pozicioniranja (GPS) bi se iskoristio za stvaranje interaktivnog okruženja za KSR tehnologije. KSR se smatra jednom od ključnih primena budućih 6G mreža [124]. KSR omogućava korisnicima virtuelnu interakciju i angažovanje uz igranje igrica, slikanje, obrazovanje, bavljenje sportom i prisustvovanje koncertima. KSR takođe može da omogući interaktivno proširenje vidnog polja korisnika tako da je moguće sprečiti štetne incidente [125]. VR i AR aplikacije su već razmatrane od strane IEEE radne grupe (IEEE P2048), gde je u ovoj verziji razvijeno 12 IEEE standarda [125]. VR i AR aplikacije mogu igrati suštinsku ulogu u telemedicini. Na primer, takve aplikacije se mogu koristiti u bubrežnoj intervenciji da bi se omogućilo precizno planiranje i postigla trodimenzionalna orijentacija [124].

Primena KSR tehnologije u 6G mrežama bi povećala količinu saobraćaja podataka. Zbog toga su potrebne napredne tehnike za oslobađanje tako ogromnog saobraćaja podataka u budućim heterogenim mrežama. Pored toga, potrebno je efikasno korišćenje resursa spektra kako bi se zadovoljili zahtevi KSR tehnologije za nisko kašnjenje prenosa. Štaviše, od interesa je razvoj novih šema kompresije podataka, upravljanje strimingom podataka i sinhronizacija za efikasne KSR aplikacije. Osim toga, razvijanje tačne procene udaljenosti objekta u virtuelnom okruženju, na primer, percepcije dubine, je ključno.

4.13. Aplikacije-Internet pametne stvari

Internet stvari (IoT) se definišu kao međusobno povezane mašine i objekti koji sadrže različite računarske mogućnosti [126]. U IoT mrežama, nekoliko različitih senzora i čipova je ugrađeno u fizičke uređaje ili objekte, što ih čini bežično povezanim. Ovi fizički senzori i objekti imaju mogućnost da razmenjuju ogromnu količinu podataka između sebe i sa drugim digitalnim komponentama bez ikakve ljudske intervencije. Očekuje se da će se IoT veze i aplikacije značajno povećati u budućim 6G komunikacionim sistemima. Očekuje se da će 6G mreže podržavati masovne veze na Internetu pametnih stvari, koje uključuju pametne gradove, pametna radio okruženja, pametne zdravstvene sisteme, pametne mreže, pametni transport, pametne fabrike, pametnu poljoprivredu i pametni dom. Slika 5 sumira ključne pametne aplikacije. Uopšteno govoreći, velika većina ovih pametnih aplikacija je osetljiva na kašnjenje, zahtevaju energiju, male su veličine i zahtevaju računarski zahtevne mogućnosti obrade signala [127], [128].

1) *Pametan grad*

Pametan grad ima za cilj da iskoristi ogromnu količinu senzora, koji se mogu primeniti u zgradama, vozilima, putevima, fabrikama i kućama kako bi podržao izuzetno veliki izbor usluga

za gradsku administraciju, kompanije i pojedince [129]. Jedan od ciljeva pametnog grada je poboljšanje kvaliteta usluga koje nude građani, bolje korišćenje javnih resursa i smanjenje operativnih troškova [129].



Slika 4.13.1. Ključne osnovne aplikacije na Internetu pametnih stvari (IoST).

Implementacija pametnog grada donela bi značajnu prednost u pogledu kontrole tradicionalnih usluga. Ovo uključuje mreže javnog prevoza, nadzor radi bezbednosti, sakupljanje smeća/upravljanje otpadom i održavanje javnih površina. Pametni gradovi bi unapredili svest građana o statusu grada. Pametni grad može omogućiti nekoliko bitnih stvari, senzora i usluga. Na primer, omogućavanje pametnih zgrada, senzora za primenu da prati kvalitet vazduha, što može pomoći u smanjenju emisije gasova sa efektom staklene bašte, prati zagušenje saobraćaja i upravljanje saobraćajem, omogućavajući automatski sistem vode za bašte, prati potrošnju energije, omogućava pametne komunalne usluge električne energije i vode i omogućava korišćenje pametnog parkinga i pametnog osvetljenje. Stoga bi se u 6G mrežama mogla primeniti jedinstvena mrežna arhitektura. Očekuje se da će se ekosistem pametnog grada dalje istraživati u 6G mrežama. Stoga se očekuje da će se ivično računarstvo, softverski definisane mreže i algoritmi veštačke inteligencije koristiti u pametnim gradovima kako bi se postigao siguran prenos, automatsko održavanje, inteligentni sistem za praćenje u realnom vremenu i besprekorno umrežavanje.

Potrebna je dalja istraga o primeni veštačke inteligencije u pametnom gradu. Osim toga, održavanje povezanosti u pametnim gradovima može izazvati nekoliko izazova. Na primer, potrebno je obezbediti pouzdano povezivanje sa masovno raspoređenim uređajima visoke mobilnosti. Pored toga, neophodna je napredna tehnika koja omogućava prelazak povezivanja sa uređaja na nivo mreže i obrnuto. Takođe, analiza velikih podataka se do danas smatra jednim od glavnih istraživačkih izazova u aplikacijama pametnih gradova zasnovanih na IoT-u [129]. Neophodno je pronalaženje izvodljivih rešenja za nisku potrošnju energije za održavanje trajanja baterije po veoma niskoj ceni u aplikacijama za pametne gradove. Potrebna su dalja istraživanja kako bi se odgovorilo na gore pomenute izazove.

2) *Pametna radio okruženja*

6G mreže su zamišljene da realizuju distribuirane inteligentne bežične komunikacije. 6G mreže takođe imaju za cilj da bežično okruženje, označeno radio talasima, učine kontrolisanim i energetski efikasnijim. Ovo motiviše razvoj pametnog radio okruženja, gde su fizički objekti presvučeni velikim rekonfigurabilnim materijalom, koji se naziva velikim rekonfigurabilnim inteligentnim površinama. Pametna radio okruženja imaju mogućnost da budućim 6G mrežama obezbede više bežičnog povezivanja i pokrivenosti. Pored toga, pametna radio okruženja imaju potencijal da prenose informacije bez generisanja novih radio signala. Širenje radio-talasi će biti oblikovani i prilagođeni korišćenjem velikih rekonfigurabilnih površina meta-materijala. Dakle, pametna radio okruženja će smanjiti potrošnju energije, poboljšati povezanost i povećati pouzdanost komunikacije [130], [131]. Pametna radio okruženja proširuju koncept mrežnog softvera sa logičkog u fizički domen. Zbog toga se radio okruženja mogu daljinski kontrolisati, konfigurisati, programirati i optimizovati.

Još uvek postoje mnoga praktična pitanja vezana za radio okruženje koje treba istražiti i rešiti u budućnosti. Na primer, eksperimentalna validacija, merenja, implementacija hardvera i precizno modelovanje kanala koji odražava realne karakteristike korišćenja pametnog radio okruženja zahtevaju temeljno istraživanje[130].

3) *Pametna zdravstvena zaštita*

Prema podacima Svetske zdravstvene organizacije, skoro 524 miliona ljudi bilo je starije od 65 godina i očekuje se da će porasti na 1,5 milijardi do 2050. godine. Takvo starenje stanovništva širom sveta čini tradicionalne zdravstvene sisteme neodrživim u budućnosti. Stoga, razvoj pametnih daljinskih zdravstvenih sistema ili stvaranje sistema telemedicine da budu pametniji kroz IoT postaje ključno. Istovremeno, poslednjih godina svedoci smo značajnog napretka u senzorskim i komunikacionim tehnologijama. Ovo je otvorilo nove mogućnosti za efikasno praćenje zdravlja pacijenata na daljinu u realnom vremenu i inteligentne medicinske sisteme. Osim toga, poslednjih godina je zabeležen ogroman rast broja IoT uređaja za nošenje/ugradnje i senzora koji mogu da obavljaju različite funkcije. Uređaji i senzori mogu biti postavljeni blizu (van tela), pričvršćeni (na telu) ili implantirani unutar ljudskog tela. Povezani ovi uređaji i senzori bežično vode do onoga što je poznato kao bežična mreža tela (VBAN), koja ima potencijal da nadgleda ljude i pruži informacije u realnom vremenu o njihovom zdravlju. Pored

toga, simptomi pacijenata mogu se izdvojiti iz podataka koje pružaju ovi IoT uređaji i senzori. Zbog toga se pacijenti mogu lečiti na daljinu, što će rezultirati efikasnijim i pametnijim daljinskim zdravstvenim sistemima [132], [133].

Pametni zdravstveni sistemi omogućavaju lekarima da daljinski nadgledaju pacijente. Dalje, može se pratiti i napredovanje bolesti pacijenata [132]. Pametni sistemi zdravstvene zaštite pomažu u otkrivanju bolesti, dijagnozi, prepoznavanju, predviđanju, prevenciji i lečenju. Heterogeno prikupljanje podataka sa različitih uređaja i senzora može se čuvati i analizirati tako da lekari mogu lako da pristupe evidenciji pacijenata. Međutim, tako velike količine podataka u realnom vremenu mogu dovesti do onoga što je poznato kao izazov velikih podataka. Zbog toga su potrebna nova izvodljiva rešenja i algoritmi za rad sa tako ogromnom količinom heterogenih podataka u realnom vremenu. Pored toga, veštačka inteligencija i tehnike mašinskog učenja mogu se iskoristiti za analizu podataka, povećanje pouzdanosti i tačnosti, omogućavanje brze obrade u realnom vremenu i donošenje pametnih odluka [133].

Predloženi su pametni ehealth gatevai zasnovan na IoT-u, koji se može koristiti za rešavanje nekih komunikacijskih izazova u vezi sa zdravstvenim sistemima, kao što su interoperabilnost, pouzdanost, bezbednost i skalabilnost. Stoga, buduće 6G mreže imaju za cilj da iskoriste pametni zdravstveni sistem kako bi omogućili laku daljinsku dijagnostiku gde se pacijenti mogu dijagnostikovati i lečiti iako su fizički locirani daleko od bolnica i klinika, odnosno u svojim domovima. Još jedan potencijal 6G mreža je omogućavanje operacije na daljinu. Očekuje se da će buduće 6G mreže usvojiti napredne tehnologije koje će pomoći medicinskoj nezi i daljinskom nadzoru u kući.

Buduće 6G mreže imaju viziju da unaprede postojeće zdravstvene sisteme kako bi omogućile dalju decentralizaciju i poboljšale performanse bezbednosti i privatnosti. Buduće 6G mreže imaju za cilj postizanje skladnije interakcije čoveka i mašine i efikasnijeg medicinskog procesa. Međutim, aplikacije u zdravstvu su osetljive na kašnjenje i zahtevaju izuzetno pouzdanu komunikaciju.

Nedavno je uveden Internet medicinskih stvari (IoMT) kao novi koncept vezan za IoT uređaje i senzore koji se bave medicinskim aplikacijama. IoMT se bavi prikupljanjem medicinskih podataka (dobijenih od različitih pacijenata) i aplikacijama medicinskog softvera. IoMT ima potencijal da donosi brze odluke, predviđa rizike i automatski preduzima odgovarajuće akcije. Pitanja bezbednosti i privatnosti su od suštinskog značaja za IoMT, koji je potreban za zaštitu podataka pacijenta. Međutim, upotreba IoMT sistema za dijagnozu može izazvati nekoliko problema u vezi sa tačnošću kliničkih smernica, kao i medicinsko-pravnim i etičkim problemima [134]. Fog/Edge računarske mreže su obećavajuće tehnike koje se mogu koristiti za rešavanje nekih od izazova u zdravstvenim sistemima.

Koncept Interneta nano stvari (IoNT) uveden je i ima potencijal da podstakne inovacije u pametnim aplikacijama u zdravstvu [134]. Ovo se pripisuje ograničenoj veličini uređaja i senzora, odnosno mikroskala i nanoskala, koji se lako mogu distribuirati, implantirati, pričvrstiti na ljudsko telo ili blizu njega. Ovi IoNT uređaji i senzori mogu se sarađivati i povezivati zajedno kroz jedinstvenu mrežu i obavljati različite zadatke obrade signala. Motivisan napretkom u oblasti nanotehnologije i sintetičke biologije, koncept Interneta Bio-Nano stvari (IoBNT) je nedavno predstavljen kao održivo rešenje za pametne zdravstvene sisteme [134]. Stoga je molekularna

komunikacija predložena kao ključna tehnika koja omogućava IoBNT, pri čemu se biohemijski molekuli mogu iskoristiti za kodovanje, prenos i primanje informacija između nanouređaja.

Pitanja bezbednosti i privatnosti smatraju se glavnim izazovima sa kojima se zdravstveni sistem suočava. Po pravilu, zdravstvene informacije pacijenta treba pažljivo čuvati i smatrati ih osetljivim. Ako to ne učinite, to može dovesti do ponižavanja i pogrešnog tretmana. Stoga su pouzdane i napredne tehnike komutacije i umrežavanja neophodne. Osim toga, u budućnosti su potrebne dalje istraživačke studije u istraživanju upotrebe molekularne komunikacije u pametnim zdravstvenim sistemima. Pored toga, potrebno je dalje istraživanje vezano za praktičnu implementaciju molekularne komunikacije sa IoBNT-om.

4) *Pametna mreža*

6G mreže imaju za cilj poboljšanje proizvodnje električne energije i tranzit tradicionalne centralizovane energetske mreže ka sistemu distribuirane proizvodnje, koji može u velikoj meri zavisiti od obnovljive energije kao osnovnog izvora energije i pametno kontrolisati upotrebu energije. Dakle, takav sistem energetske mreže treba da bude pametno povezan i kontrolisan korišćenjem naprednih komunikacionih tehnologija. Stoga se efikasni sistemi pametne mreže mogu iskoristiti. Pametna mreža je definisana kao inteligentna električna mreža koja je integrisana sa komunikacionim tehnologijama radi postizanja ekonomskih i društvenih koristi [135].

Pametna mreža je obećavajuća elektroenergetska infrastruktura koja može inteligentno kontrolisati upotrebu električne energije i postići dvosmernu komunikaciju između dobavljača električne energije i potrošača. U pametnoj mreži može se koristiti nekoliko naprednih pametnih brojila, pametnih uređaja, obnovljivih izvora energije, senzorskih i kontrolnih tehnologija. Podaci prikupljeni iz ovih izvora takođe se mogu pratiti i analizirati u realnom vremenu kako bi se pružile prediktivne informacije i korisne preporuke svim zainteresovanim stranama, na primer, dobavljačima električne energije, operaterima mreže i potrošačima [135]. Primena sistema pametne mreže bi imala prednosti značajnog poboljšanja i upravljanja upotrebom električne energije [136]. Dakle, sve zainteresovane strane (npr., dobavljači električne energije, mrežni operateri i potrošači) mogu imati koristi od ove pametne implementacije.

Održavanje bezbednosti sistema u distribuiranoj mreži pametne mreže smatra se glavnim izazovom [135], [136]. Stoga su potrebna dalja istraživanja za rešavanje bezbednosnih izazova u mrežama pametnih mreža. Osim toga, povećanje međusobnog povezivanja i integracije pametnih mreža može dovesti do nekoliko izazova. Kao takvi, potrebni su dalji istraživački radovi da bi se prevazišli ove tehničke prepreke.

5) *Pametan transport*

Pametan transport (takođe poznat kao inteligentni transport) je obećavajuća tehnologija za buduće 6G mreže, koja omogućava autonomnim vozilima da međusobno komuniciraju, razmenjuju informacije sa drugim krajnjim uređajima i javnim mrežama [137]. Pametan transport se smatra posebnim slučajem pametnih gradova.

Pametan transport pomaže u značajnom smanjenju broja saobraćajnih nezgoda [138]. Komunikacione mreže za vozila zasnovane na pametnom transportu mogu olakšati nekoliko

mobilnih servisa podataka, omogućiti pomoć u samovožnji i omogućiti upravljanje saobraćajem [137]. Tipično, vozila mogu biti opremljena sa nekoliko senzora kako bi bila pametnija i automatizovanija [138]. Vehicle-to-everithing (V2Ks) je jedna od aplikacija za autonomne mreže za vozila koja je već razmatrana IEEE standardom (IEEE 802.11). Do danas su uvedene različite metode i protokoli razmene informacija između vozila i infrastrukture [137]. Nedavno je koncept Interneta vozila (IoV) uveden kao proširenje konvencionalne V2Ks komunikacije kako bi se omogućile sveprisutne automobilske mreže sa izuzetno velikim brojem aplikacija i funkcija [137]. Komunikacioni sistemi vozila zahtevaju URLLC i visok nivo bezbednosti. Da bi se postigao ovaj zahtev, Evropski institut za standarde za telekomunikacije (ETSI) je nedavno uveo periferno računarstvo kao obećavajuće rešenje za zadovoljavanje zahteva URLLC prenosa komunikacija autonomnih vozila [138].

Tehnike veštačke inteligencije takođe mogu da igraju ključnu ulogu u omogućavanju i podršci efikasnim komunikacionim sistemima vozila za buduće 6G mreže. Međutim, potrebno je kombinovati različite konvencionalne i nove bežične tehnologije da bi se u potpunosti razvile povezane mreže vozila. Štaviše, budući komunikacioni sistemi za vozila zahtevaju posebnu arhitekturu mreže koja će podržati vozila velikih brzina i masivnu povezanost [138]. Rezanje mreže se može smatrati izvodljivim rešenjem za podršku saobraćajnoj komunikaciji, pri čemu se fizičke mreže mogu podeliti na više virtuelnih mreža.

Omogućavanje preseka mreže u budućim 6G mrežama je i dalje otvorena tema istraživanja koju vredi proučiti. Pored toga, potrebne su napredne tehnike umrežavanja koje podržavaju vozila velike brzine i masivnu povezanost u komunikacionim sistemima vozila.

6) *Pametne fabrike*

Poslednja decenija je bila svedok ogromnog rasta industrijalizacije i metoda informatizacije. Ovo je motivisalo napredak u razvoju sledeće generacije pametnih proizvodnih i fabričkih tehnologija. Četvrta industrijska revolucija, odnosno Industrija 4.0, je najnoviji trend u proizvodnom sektoru, koji karakteriše visok stepen automatizacije, produktivnosti, operativne efikasnosti i industrijske integracije [139]. Sistemi automatske kontrole i komunikacione tehnologije mogu se integrisati i efikasno koristiti u Industriji 4.0 kako bi se smanjila potreba za ljudskom intervencijom u industrijskom procesu. Takva kombinacija sistema automatskog upravljanja i komunikacionih tehnologija dovodi do implementacije industrijske kontrolne mreže (ICN) [140]. ICN je nedavno uveden 5G NR standardom kao specifična URLLC aplikacija [140]. Bežični izohroni sistem u realnom vremenu (VIRT) je uveden u [140] da bi se dodatno poboljšale performanse ICN-a u Industriji 4.0. 6G mreže imaju za cilj da revolucionišu proizvodnu industriju postizanjem potpune digitalizacije proizvodnje, korišćenjem robotike i sistema automatizacije, daljinskim održavanjem, prilagođavanjem proizvoda i postizanjem veće fleksibilnosti u razvoju proizvoda i garantovanjem pune veze sa celim proizvodnim ciklusom.

Pametna fabrika teži da zadrži razumnu ravnotežu između ponude i potražnje, napravi napredno planiranje i razvoj proizvoda, postigne najbolju praksu prodaje i otpreme proizvoda i automatsko praćenje. Ovo se može postići korišćenjem objedinjenih mreža. Pored toga, buduće 6G mreže imaju tendenciju da upravljaju resursima u smislu energije, vode i protoka ekološkog otpada. Osim toga, buduće 6G mreže imaju za cilj da se kreću ka kružnoj ekonomiji sa ponovnom

upotrebom, daljinskom popravkom, ponovnom proizvodnjom, recikliranjem i renoviranjem. Štaviše, postoji potreba za tečnom saradnjom ekosistema. Zbog toga je za 6G mreže od ključne važnosti više besprekorne saradnje i saradnja između ljudi, robota i mašina. Na primer, uređaji, mašine i ljudi će biti povezani zajedno i razmenjivaće informacije unutar fabrika [140]. Ove funkcionalnosti će zaista zahtevati obradu podataka u realnom vremenu, kao i nisko kašnjenje i visoku pouzdanost komunikacije. Takođe, ove funkcionalnosti zahtevaju konvergenciju više tehnologija. Edge computing i veštačka inteligencija mogu se koristiti za podršku zahtevima pametne fabrike. MmVave (posebno opseg od 60 GHz) je identifikovan kao moguće rešenje za postizanje URLLC u pametnoj fabrici.

Pametna fabrika zahteva ogromnu povezanost industrijske proizvodne opreme. Stoga, decentralizovane mrežne arhitekture postaju neophodne. Osim toga, potrebne su nezavisne i inteligentne metode donošenja odluka da bi se postigle pune autonomne fabrike. Potrebna su dalja istraživanja u vezi sa ulogom ivičnog računarstva, veštačke inteligencije i frekvencije mm talasa u omogućavanju pametnih fabrika. Problemi kašnjenja i skalabilnosti se do danas smatraju glavnim izazovima u pametnim fabrikama. Potrebna su dalja istraživanja za rešavanje izazova kašnjenja i skalabilnosti u pametnoj fabrici.

7) *Pametna poljoprivreda*

Pametna poljoprivreda je koncept koji koristi komunikacionu tehnologiju u poljoprivredi [141]. Primena bežičnih komunikacionih tehnologija u pametnoj poljoprivredi omogućava postizanje velikog broja usluga. Na primer, poljoprivrednicima omogućava da uštede vreme i trud, ostvare bolju produktivnost i profit [142].

Pametna poljoprivreda omogućava inteligentni sistem vode i postiže najbolje navodnjavanje, automatizaciju i preciznost, praćenje biljaka, useva i stoke, prognozu i praćenje vremena i otkrivanje biljnih bolesti [142]. Pametna poljoprivreda se takođe može iskoristiti da bi se obezbedilo odgovarajuće osvetljenje biljaka i vlaga za optimalan rast, poboljšanje proizvodnje biljaka u stakleniku i predviđanje bolesti. Ovo bi omogućilo povećanje proizvodnje hrane i sigurnost hrane, što se smatra glavnim problemom za većinu zemalja. Očekuje se da će se u ovom razvoju koristiti nove tehnologije kao što su računarstvo u oblaku i veštačka inteligencija.

Algoritmi mašinskog učenja se mogu koristiti za prepoznavanje bolesti sa slika biljke/lišća. Osim toga, napredne šeme za analizu podataka mogu se koristiti za poboljšanje operativne efikasnosti i produktivnosti u sektoru pametne poljoprivrede [141]. UAV tehnologija takođe može da igra suštinsku ulogu u sistemu pametne poljoprivrede. Na primer, poljoprivrednici mogu da koriste bespilotne letelice za praćenje stanja farme na početku bilo koje godine useva [141]. Pored toga, bespilotne letelice se takođe mogu koristiti u praćenju zemljišta, analizi polja, navodnjavanju i u upravljanju nivoom azota da bi se postigao bolji rast useva [142]. Dakle, pametna poljoprivreda može imati posebnu korist od integracije između vazdušnih, zemaljskih i satelitskih komunikacionih mreža.

Međutim, problem skalabilnosti u pametnoj poljoprivredi, koji može biti rezultat korišćenja milijardi IoT uređaja i senzora, kao i bespilotnih letelica, smatra se glavnim tehničkim izazovom koji treba da se reši u pametnoj poljoprivredi. Stoga su potrebna dalja istraživanja kako bi se prevazišao problem skalabilnosti u pametnoj poljoprivredi.

Pametna kuća je jedna od IoT aplikacija, koja se definiše kao mreža prodornih fizičkih uređaja koji pružaju usluge svesne konteksta [143].

Pametna kuća ima mogućnost da nadgleda kućno okruženje, olakša interakciju udaljenih stanovnika i obezbedi daljinsko očitavanje brojila različitih komunalnih usluga kao što su struja, gas i voda [144]. Pametna kuća se takođe može koristiti u različite svrhe, uključujući praćenje zdravstvene zaštite, upravljanje potrošnjom energije i kućnu automatizaciju. Sistem pametne kuće ima potencijal da poboljša bezbednost u kući, što se može postići korišćenjem više senzora za inteligentno praćenje i implementaciju pametnog video nadzora. Sistem pametne kuće može da obezbedi ekonomičniji i udobniji rad u kući. Takođe može da obezbedi visok stepen inteligentne funkcionalnosti i fleksibilnosti [143]. Štaviše, pametna kuća ima potencijal da pruži korisne informacije i pomoćne usluge bilo kada i bilo gde [144].

Sigurnost i skalabilnost su dva glavna izazova u sistemu pametne kuće. Zbog toga su za rešavanje ovih izazova potrebni algoritmi za šifrovanje podataka i kriptografiju i metode kompresije podataka [143], [144]. Potrebna je dalja istraga za rešavanje ovih izazova u pametnoj kući.

4.14. EDGE računarstvo

Vođeni zahtevima IoST-a, poslednjih godina se razvila nova paradigma koja promoviše softverizaciju i virtuelizaciju mreža, odnosno omogućava programabilne i decentralizovane mreže kroz korišćenje ivičnog računarstva. Ovo se postiže deljenjem mreže na različite komunikacione slojeve — od krajnjih uređaja korisnika, preko ivične platforme, jezgra mreže, do platforme u oblaku (centara podataka). Takva struktura pomaže u prevazilaženju velike udaljenosti između korisnika i oblaka, smanjujući osetljivost IoT aplikacija na kašnjenje.

Računarstvo na mobilnoj ivici (MEC) se smatra važnim tipom platforme za ivično računarstvo koja se nalazi na ivici ćelijske mreže i može brzo da obrađuje velike količine podataka po prijemu [145]. Ključni koncept MEC-a je da premesti deo obrade, računarstva i skladištenja podataka specifičnih za uslugu iz centralizovanog jezgra u oblaku na čvorove na rubu mreže, koji se mogu nalaziti u blizini dobavljača podataka i krajnjih korisnika. Nekoliko intenzivnih računskih usluga može se prebaciti na MEC, koji se sastoji od mreže servera. Stoga se MEC smatra ključnom tehnologijom koja omogućava postizanje URLLC-a, optimizaciju saobraćaja, poboljšanje performansi 6G mreža.

Korišćenje MEC-a u 6G dovodi do značajnog poboljšanja kapaciteta mreže, završava kritične zadatke osetljive na kašnjenje i ostvaruje mrežno intenzivne računare. MEC se može koristiti kao efikasno rešenje za produženje trajanja baterije u mobilnim uređajima i smanjenje potrošnje energije mreže pošto se ogromne mobilne aplikacije sa veoma zahtevnom obradom signala mogu preneti na MEC. MEC je odgovoran za poboljšanje mrežnih mogućnosti i upravljanja, poboljšanje usluga, postizanje upravljanja energijom i resursima i smanjenje opterećenja na backhaul-u [145].

Cisco je nedavno predstavio ideju računarstva u magli, što je slično MEC-u. U računarskoj mreži magle, definicija ivičnih uređaja postaje šira. Svi ovi suštinski zadaci MEC-a mogu se

ostvariti na osnovu virtuelizovane softverske platforme koja koristi virtuelizaciju mrežnih funkcija (NFV) i softverski definisane mreže (SDN).

NFV omogućava jednom računarskom serveru da obezbedi nekoliko mobilnih uređaja sa računarskim uslugama. Ovo se postiže stvaranjem više virtuelnih mašina koje mogu da obavljaju nekoliko zadataka istovremeno ili da upravljaju različitim mrežnim funkcijama [145]. Pored toga, NFV ima potencijal da upravlja računarskim uslugama i poboljša pouzdanost, skalabilnost i fleksibilnost mrežnih usluga [145]. S druge strane, SDN omogućava MEC mreži da dinamički upravlja različitim uslugama. Takođe ima potencijal da odvoji kontrolu i ravan podataka [145], [146]. SDN može da obezbedi logički centralizovanu kontrolnu platformu za ivičnu računarsku mrežu [146]. Korišćenje ovakve centralizovane kontrolne platforme omogućilo bi lakše upravljanje prometom podataka unutar mreže, postiglo optimalnu alokaciju resursa, rešilo bi problem skalabilnosti u mreži, smanjilo troškove, poboljšalo pouzdanost mreže i što je najvažnije smanjilo kašnjenje.

Nekoliko različitih IoT aplikacija može imati koristi od ivičnog računarstva, uključujući pametnu kuću za nadgledanje i merenje, zdravstvenu zaštitu za praćenje i generisanje podataka, video nadzor za bezbednost, pametnu mrežu za upravljanje energijom, pametne gradove za kontrolu gradskog osvetljenja, pametan transport i okruženje za nadgledanje.

Edge computing omogućava interaktivne aplikacije u realnom vremenu kao što su holografska teleportacija, taktilni internet i KSR. Kombinovanje ivičnog računarstva sa tehnikama veštačke inteligencije dovodi do nove promene komunikacione paradigme poznate kao inteligencija na ivici, koja može da igra suštinsku ulogu u 6G mrežama. 6G mreže će usvojiti distribuiranu veštačku inteligenciju, koja premešta inteligenciju iz centralnog oblaka u računarstvo na ivici. Mogućnost Edge inteligencije će podržati razvoj novih usluga Interneta inteligentnih stvari (IoIT) i funkciju 6G mreža.

Edge inteligencija ima potencijal da izvrši analizu podataka i razvije rešenja u blizini dobavljača podataka i krajnjih korisnika. Pored toga, ivica inteligencije može poboljšati sigurnost podataka i sačuvati privatnost, smanjiti troškove, omogućiti prilagodljivu kontrolu saobraćaja, smanjiti kašnjenje i smanjiti zagušenje mrežnog saobraćaja. Edge inteligencija se takođe može iskoristiti za postizanje pouzdanije i sigurnije mreže autonomne vožnje u vozilu. Predložene su dinamičke šeme alokacije resursa za ivičnu inteligenciju, koja se nalazi na ivičnom serveru. Osim toga, može se istražiti duboko učenje sa pojačanjem kako bi se smanjilo kašnjenje, olakšalo automatizovano izvršavanje IoT aplikacija i poboljšao kapacitet mreže. Iz perspektive komunikacije, IRS tehnika je nedavno predložena kao rešenje za poboljšanje performansi MEC sistema [146]. Rezultati su pokazali da je IRS u stanju da poboljša performanse MEC sistema. NOMA tehnika je takođe nedavno kombinovana sa MEC sistemom kako bi se poboljšale performanse rasterećenja, maksimizirao kapacitet sistema i postigla ušteda energije [145], [146].

Upravljanje resursima, upravljanje mobilnošću i bezbednost mreže su glavni izazovi sa kojima se suočava primena ivičnih računara. Prenošenje podataka sa komunikacijom vozila do danas se smatra izazovnim pitanjem zbog velike brzine kretanja vozila. Osim toga, postoji suštinski zahtev da se nosite sa saobraćajnim zagušenjima u okruženjima visoke mobilnosti i donesete inteligentnu odluku za prenošenje podataka. Štaviše, neophodan je razvoj efikasnih algoritama učenja za realizaciju ivične inteligencije i optimizacije mreže. Takođe, potrebne su nove mrežne arhitekture za podršku distribuiranom učenju ivica.

Razvijanje efikasnih algoritama za analizu velikih podataka koji se prikupljaju sa različitih IoT uređaja je od suštinskog značaja. Osim toga, neophodan je razvoj efikasne šeme kompresije podataka koja se nosi sa tako velikim podacima. Pored toga, postoji suštinski zahtev da se dizajnira dinamička i fleksibilna mrežna konfiguracija za mobilno ivično računarstvo sa heterogenim okruženjima. Stoga je od interesa razvoj novih komunikacionih protokola za ivično računarstvo sa heterogenim okruženjem.

4.15. Ostvarivanje inteligencije

Algoritmi mašinskog učenja (ML) pokušavaju da nauče mapiranje od ulaza do izlaza iz podataka, a ne kroz eksplicitno programiranje. ML koristi algoritme koji iterativno uče iz podataka za opisivanje podataka ili predviđanje ishoda, tj. za proizvodnju preciznih modela zasnovanih na tim podacima. Kako podaci za obuku postaju sve veći, tada je moguće proizvesti preciznije modele. Postoji mnogo algoritama i aplikacija za učenje. Pažljivo ručno izrađene karakteristike su kritična komponenta procesa izgradnje modela u tradicionalnim algoritmima ML. To jest, stručnjak za domen treba da izdvoji i izabere ključne karakteristike ulaza pre nego što ih unese u model. Inženjering karakteristika ne samo da zahteva značajno stručno znanje, već je i proces koji oduzima mnogo vremena.

Mogu se uzeti u obzir tri vrste zadataka ML: učenje pod nadzorom, učenje bez nadzora i učenje uz pomoć:

1) Učenje pod nadzorom je zadatak zaključivanja klasifikacije ili regresije iz označenih podataka o obuci.

2) Učenje bez nadzora je zadatak izvođenja zaključaka iz neobeleženih podataka o obuci, tj. ulaznih podataka bez označenih odgovora.

3) Učenje sa pojačanjem je zadatak učenja kako da stupite u interakciju sa okruženjem preduzimanjem niza radnji kako bi se maksimizovale kumulativne nagrade.

Nema sumnje da će buduće 6G bežične komunikacione mreže naići na mnoge tehničke izazove. Velika količina podataka će se periodično prikupljati u realnom vremenu sa različitih pametnih, senzorskih i nosivih uređaja. Ovo ogromno prikupljanje podataka dovodi do onoga što je poznato kao izazov velikih podataka. Da bi se nosile sa ovim zahtevima i izazovima, buduće 6G mreže moraju da budu super inteligentne i automatizovane kako na ivici tako i u jezgru mreža. Takođe, buduće 6G mreže zahtevaju samoučenje, samostalnu konfiguraciju, dinamičku raspodelu resursa i donošenje odgovarajuće odluke.

Očekuje se da buduće 6G mreže realizuju inteligenciju i koriste nekoliko kontrolnih funkcija i analitiku prediktivnih podataka [147]. Takva inteligencija u umrežavanju budućih 6G sistema će smanjiti složenost tradicionalnih algoritama zasnovanih na modelima i učiniti da se njima efikasno upravlja i optimizuje. Osim toga, veštačka inteligencija i mašinsko učenje smatraju se ključnim faktorima koji omogućavaju da 6G mreže budu inteligentnije i da se postigne visok nivo dinamičkog upravljanja mrežom i optimizacije. Veštačka inteligencija i tehnike mašinskog učenja imaju potencijal da pomognu mrežnim operaterima da sprovode inteligentne operacije i obogate donošenje odluka u bežičnim komunikacionim sistemima [148]. Veštačka inteligencija i tehnike mašinskog učenja su od suštinskog značaja za ultra-pouzdane komunikacije sa malim

kašnjenjem u 6G mrežama [148]. Očekuje se da će veštačka inteligencija i tehnike mašinskog učenja igrati suštinsku ulogu u bezbednosti budućih 6G mreža.

4.16. Veštačka inteligencija i mašinsko učenje

Očekuje se da će veštačka inteligencija (AI) i mašinsko učenje (ML) imati ključnu ulogu u budućim 6G mrežama. AI omogućava mašinama da se ponašaju na način sličan ljudima, donose odgovarajuće odluke i ostvaruju specifične ciljeve. ML, kao podgrupa AI, omogućava kompjuterskim agentima da akumuliraju i primenjuju znanje, razmišljaju i donose inteligentne odluke na osnovu prikupljenih podataka. Obično, ML stiče osnovna saznanja kroz analizu skupova podataka ili interakciju sa postojećim okruženjem [149].

Očekuje se da će veštačka inteligencija i tehnike mašinskog učenja biti integrisane u optimizaciju, planiranje i dizajn budućih 6G bežičnih komunikacionih mreža. Ovo uključuje podršku masovnih osnovnih usluga kao što su zdravstvena zaštita, industrijska proizvodnja, onlajn obrazovanje, onlajn kupovina, onlajn igre i korisničke usluge. Štaviše, tehnike veštačke inteligencije i mašinskog učenja biće osnovna tehnika za buduće 6G bežične komunikacione sisteme, koji imaju sposobnost da postignu upravljanje resursima inteligencije, donošenje odluka u vezi sa inteligencijom, pametno procenjivanje i otkrivanje, pametno rutiranje, automatizovano održavanje, automatizovane mrežne operacije i uprave [150].

Veštačka inteligencija i mašinsko učenje takođe mogu da se koriste za poboljšanje performansi komunikacionog sistema, obradu ogromnih količina podataka, smanjenje potrošnje energije i smanjenje kašnjenja mreže od kraja do kraja. Algoritmi veštačke inteligencije i mašinskog učenja imaju potencijal da odgovore na izazove u vezi sa složenošću mreže i održavanjem kvaliteta usluge [150]. Veštačka inteligencija i mašinsko učenje mogu da se koriste u dizajnu budućih autonomnih bežičnih sistema.

Algoritmi veštačke inteligencije i mašinskog učenja takođe mogu biti korisni za satelitske komunikacione sisteme. Takođe, veštačka inteligencija i algoritmi mašinskog učenja su od suštinskog značaja za ublažavanje smetnji, praćenje vremena, upravljanje spektrom i resursima energije, fuziju senzora za navigaciju, upravljanje velikim konstelacijama i optimizaciju rada satelitskih mreža. Veštačka inteligencija i mašinsko učenje imaju priliku da se pozabave različitim problemima bežične komunikacije kao što su klasifikacija, optimizacija mreže, detekcija signala, dizajn protokola, analiza i oporavak retkog signala. Tehnologija mašinskog učenja može se efikasno koristiti u sistemima telemedicine. Pored toga, tehnike mašinskog učenja mogu da se iskoriste sa inteligentnim programabilnim metapovršinama da bi se postigla visoka energetska efikasnost, smanjili troškovi sistema i omogućilo prepoznavanje objekata visoke preciznosti [151], [152]. Štaviše, tehnike mašinskog učenja mogu se efikasno koristiti u upravljanju smetnjama za UAV komunikacione sisteme.

Duboko učenje se smatra posebnim metodom mašinskog učenja, koji koristi velike višeslojne veštačke neuronske mreže (ANN). Tehnike dubokog učenja su klasifikovane na nadgledano, nenadgledano i učenje sa pojačanjem [153]–[155].

Svaka od ovih tehnika ima svoje jedinstvene karakteristike. Na primer, u nadgledanom učenju, obavezni su označeni skupovi podataka za obuku, koji bi trebalo da budu poznati unapred.

Obično je za učenje pod nadzorom potreban veliki broj skupova podataka (parovi ulaza i željenog izlaza).

Nasuprot tome, u učenju bez nadzora, označeni skupovi podataka nisu potrebni, što ima za cilj da zaključi karakteristike u skupovima podataka. Konačno, skupovi podataka koji se dobijaju implementacijom, a ne istorijski skupovi podataka, potrebni su u učenju sa pojačanjem, što omogućava agentima učenja da uče iz iskustva. U učenju sa potkrepljenjem, na svakom koraku, akteri učenja posmatraju stanje okoline, izvode radnju ili donose zadovoljavajuću odluku i zatim prelaze na sledeću fazu. Smatra se da je učenje sa pojačanjem izvodljivije za dinamičke bežične komunikacione sisteme [156].

Duboko učenje je moćna tehnika koja može biti korisna za prepoznavanje govora, bežičnu optimizaciju i obradu slike [156]. Duboko učenje se takođe može efikasno koristiti u prepoznavanju brojeva, izdvajanju karakteristika i u mnogim aplikacijama za obradu signala [153]–[155]. Štaviše, duboko učenje se može koristiti u zajedničkim radarskim komunikacionim sistemima. Može se efikasno koristiti za dinamičku alokaciju potrebnih resursa sa smanjenim troškovima. Duboko učenje ima potencijal da odgovori na izazove u vezi sa procenom kanala u scenarijima visoke frekvencije i visoke mobilnosti. Osim toga, duboko učenje se može iskoristiti za kompresiju podataka, regresiju smanjenja dimenzionalnosti, grupisanje, klasifikaciju, procenu gustine i oporavak podataka. Na primer, duboko učenje se može koristiti u kompresiji podataka izdvajanjem najznačajnijih karakteristika iz određenih podataka. Dakle, tako efikasno izdvajanje karakteristika pomoću metode dubokog učenja može se koristiti za identifikaciju kompresovanih podataka sa visokom preciznošću. Kao takva, veličina podataka i kašnjenje od kraja do kraja mogu se značajno smanjiti. Duboko učenje se smatra suštinskim alatom za rešavanje mnogih tehničkih izazova u vezi sa komunikacionim sistemima zasnovanim na bespilotnim letelicama. Duboko učenje je takođe obećavajući metod za rešavanje mnogih tehničkih izazova vezanih za bežičnu AR, MR i VR.

Očekuje se da će tehnika dubokog učenja igrati suštinsku ulogu u dizajnu keširanja na ivici mobilnih uređaja i računarskih pristupa. Duboko učenje ima potencijal da automatski koduje podatke zajedničkim učenjem implementacije predajnika i prijemnika. Ovi zadaci se mogu obaviti bez prethodnog znanja. Duboko učenje može garantovati poboljšanja performansi u složenim komunikacijskim scenarijima, koje je teško opisati matematičkim modelima koji se mogu složiti. Na primer, duboko učenje je razmatrano za slepo otkrivanje u MIMO komunikacionim sistemima sa kvantizacijom niske rezolucije. Takođe, metoda dubokog učenja je korišćena za rešavanje problema upravljanja resursima u bežičnim komunikacionim sistemima. Nedavno je istraživano duboko učenje za kompresiju signala, dekodiranje kanala, kodiranje kanala [155], poboljšanje kvaliteta procene masivnog MIMO sistema u modulaciji sa jednim nosiocem [155] i u modulaciji sa više nosilaca [156] i mreže za prepoznavanje modulacije. Štaviše, hibridno prethodno kodovanje za mmVave masivne MIMO komunikacione sisteme je istraženo korišćenjem pristupa dubokog učenja.

Rezultati su pokazali da pristup dubokog učenja poboljšava performanse komunikacionog sistema i omogućava manje vremena računanja u poređenju sa konvencionalnim tehnikama. Pored toga, tehnika dubokog učenja se može iskoristiti za postizanje različitih zadataka za komprimovanje sensinga [156]. Tehnika dubokog učenja se takođe može kombinovati sa tradicionalnom teorijom optimizacije kako bi se ubrzalo izračunavanje optimalnih resursa u

bežičnim komunikacionim mrežama. Tehnologija dubokog učenja ima potencijal da podrži prilagodljivo i masovno MIMO formiranje snopa u realnom vremenu kako bi se pravilno pratile strukturne informacije radio kanala, efikasno alocirala potrebna snaga i hvatali obrasci mobilnosti.

Adaptacija veštačke inteligencije i algoritama mašinskog učenja u budućim 6G mrežama je suštinski neophodna da bi se otkrio njihov puni potencijal dobiti u bežičnim komunikacionim sistemima. Konkretno, da bi se garantovao kvalitet usluga, koji su standardni u dizajnu bežičnih komunikacionih sistema, potrebno je detaljno razumevanje osnovnih ograničenja performansi sa veštačkom inteligencijom i aplikacijama za mašinsko učenje.

Konvencionalnu veštačku inteligenciju i algoritme mašinskog učenja možda neće biti lako implementirani u mobilne ili nosive uređaje zbog njihove velike složenosti i potrošnje energije. Zbog toga je potreban razvoj efikasnih algoritama koji su pogodni za implementaciju u malim uređajima. Pored toga, potrebno je razmotriti kompromis između tačnosti predviđanja veštačke inteligencije i algoritama mašinskog učenja i složenosti obuke.

Osim toga, postoje neki tehnički izazovi u vezi sa dugim vremenima konvergencije algoritama za mašinsko učenje. Zbog čega je potrebno dalje istraživanje kako bi se pronašli efikasni algoritmi mašinskog učenja sa brzim vremenima konvergencije. Štaviše, bežične mreže su podložne veoma dinamičnoj mobilnosti i uslovima saobraćaja. Kao takvi, izvodljivi algoritmi koji se nose sa ovim realnim uslovima su ključni. Federativno učenje se smatra obećavajućom tehnikom koja se može primeniti za poboljšanje efikasnosti učenja [157]. Međutim, primenu federalnog učenja u budućim 6G mrežama treba dalje istražiti. Potrebna su dalja istraživanja da bi se istražila upotreba veštačke inteligencije i tehnika mašinskog učenja za procenu kanala sa okruženjima visoke mobilnosti i sa mmWave kanalima.

5. Procena performansi bežičnog komunikacionog sistema u prisustvu fedinga pod uticajem interferencije i senke

Prilikom dizajniranja bežičnog komunikacionog sistema, ključno je uzeti u obzir tri faktora koji mogu negativno uticati na prenos: kratkoročni feding uzrokovan višeputajnim širenjem, dugotrajni feding uzrokovan interferencijom i štetnim uticajem smetnji iz drugih kanala [158].

U poslednje vreme raste interesovanje za razumevanje nelinearnih svojstava medijuma kroz koji se signali šire. Tradicionalne distribucije sa kratkotrajnim fedingom kao što su Nakagami-m, Ricean i Raileigh pretpostavljaju homogeno difuzno polje rasejanja od nasumično raspoređenih rasejača. Međutim, površine u stvarnom svetu su često prostorno povezane, što dovodi do nelinearnih efekata. Nedavno je predložen novi model α κ-μ kratkotrajnog fadinga koji uzima u obzir činjenicu da je omotač signala nelinearna funkcija zbira višeputajnih komponenti. Ovaj model je definisan troparametarskom funkcijom gustine verovatnoće (PDF) α, κ i μ koja opisuje nelinearnost okruženja, broj višeputajnih klastera i odnos snage rasejanog talasa u fazi i kvadraturne komponente svakg klastera višeputajnih komponenti [159].

$\alpha - k - \mu$ raspodela je opšta rasprostranjena raspodela koja uključuje Rejlijevu, Rajsovu, Nakagami-m, $k - \mu$, Vejbulovu i jednostranu Gausovu distribuciju kao posebne slučajeve. Distribucija $k - \mu$ se može dobiti iz $\alpha - \eta - \mu$ raspodele postavljanjem parametra na $\alpha = 2$. Distribucija Nakagami-m se može dobiti iz $k - \mu$ distribucije postavljanjem $k = 0$. Rajs raspodela se može dobiti iz $k - \mu$ distribucije postavljanjem $\mu = 1$ i korišćenjem relacije $\kappa = k$, gde je k parametar R . Na isti način, iz Rajsove raspodele se Rejlejeva raspodela dobija za $k = 0$. Konačno, Vejbulova raspodela se može dobiti iz $\alpha - k - \mu$ distribucije postavljanjem $k = 0$ i $\mu = 1$. Tabela 5.1 pokazuje kako se ove distribucije mogu dobiti iz $\alpha - k - \mu$ raspodele.

Tabela 5.1. $\alpha - k - \mu$ raspodela i druge feding raspodele.

	Rayleigh	Rice	$\alpha - {}_{\alpha}\mu$	$k - \mu$	One-Sided Gaussian	Weibull	Nakagami-m
α	2	2	α	2	2	α	2
k	0	k	0	k	0	0	0
μ	1	1	${}_{\alpha}\mu$	μ	1/2	1	m

Dalje, predstavljen je analitički okvir za analizu performansi bežičnih komunikacionih sistema koji su podvrgnuti interferenciji kokanalnog (CCI) preko $\alpha - k - \mu$ kanala. Biće obezbeđena analiza zasnovana na signalu-interferenciji (SIR), a za primljene SIR PDF i CDF (funkcija kumulativne distribucije) biće obezbeđeni izrazi zatvorenog oblika. Iz ove statistike dobiće se vrednosti verovatnoće otkaza (OP) u funkciji parametara sistema. Čak i poboljšanje OP-a će se posmatrati kroz prizmu uređaja prijemnih diverziti tehnika, posebno uređaja za kombinovanje selekcije (SC).

Brojni modeli kompozitnih kanala su korišćeni u literaturi za analizu bežičnih komunikacionih sistema, za slučaj kada se višeputno bledenje i senčenje javljaju istovremeno. Takvi su $k - \mu/gamma$ [160], $k - \mu/gamma$ [161], K [162] i generalizovani model K (KG) [163]. Polazeći od uopštene, biće uvedeni distribucija $\alpha - k - \mu$, PDF, CDF i izrazi momenata n-tog reda

zatvorenog oblika, koji do sada nisu bili prikazani u literaturi, za novopredstavljenu kompozitnu distribuciju. Dobijeni matematički oblik će omogućiti jednostavnu analizu performansi bežičnih komunikacionih sistema, koji rade u kompozitnim fading okruženjima. Ova analiza performansi je takođe praćena grafički prikazanim numeričkim rezultatima, koji pokazuju uticaj različitih parametara komunikacionog sistema (parametre slabljenja i senke), na standardne kriterijume performansi.

5.1. Prenos pod uticajem kokanalne interferencije

U savremenim bežičnim komunikacionim sistemima postoji želja da se efikasno iskoristi raspoloživi spektar. Ovo se može postići ponovnim korišćenjem frekventnih kanala u oblastima koje su geografski blizu jedna drugoj. Međutim, ovo je ograničeno nivoom smetnji u kokanalnom kanalu (CCI), koji se definišu kao ometajući signali koji imaju istu frekvenciju nosioca kao i željeni informacioni signal. Kada se frekventni kanali ponovo koriste na različitim lokacijama, to može dovesti do smetnji između signala koji rade na istoj frekvenciji nosioca. Ispitano je kako CCI utiče na dobro utvrđene kriterijume performansi bežičnih sistema u smislu trenutnih i prosečnih odnosa signal-interferencija (SIR). Analiza performansi zasnovana na SIR-u je posebno korisna jer se SIR može meriti u realnom vremenu i na baznim i na mobilnim stanicama. Takođe ćemo se fokusirati na sisteme ograničene na smetnje, pod pretpostavkom da je efekat šuma zanemarljiv.

Željeni informacioni signal sa α-k-μ slučajnom raspodelom amplitude može se predstaviti pomoću [159]:

$$p_R(R) = \frac{\alpha k_d^{\frac{1-\mu_d}{2}} (1+k_d)^{\frac{1+\mu_d}{2}} \mu_d R^{\frac{\alpha(1+\mu_d)}{2}-1}}{\exp(\mu_d k_d) \Omega_d^{\frac{1+\mu_d}{2}}} \times \exp\left(-\frac{\mu_d(1+k_d)R^\alpha}{\Omega_d}\right) I_{\mu_d-1}\left(2\mu_d\sqrt{k_d(1+k_d)\frac{R^\alpha}{\Omega_d}}\right) \quad (5.1.1)$$

sa $\Omega_d=E[R^2]$, što označava željenu prosečnu snagu signala, dok je $I_n(x)$ modifikovana Beselova funkcija *n*-tog reda Gama funkcije prvog reda [164, jed. (8.406)].

Na sličan način, rezultujući ometajući signal može se predstaviti kao:

$$p_r(r) = \frac{\alpha k_c^{\frac{1-\mu_c}{2}} (1+k_c)^{\frac{1+\mu_c}{2}} \mu_c r^{\frac{\alpha(1+\mu_c)}{2}-1}}{\exp(\mu_c k_c) \Omega_c^{\frac{1+\mu_c}{2}}} \times \exp\left(-\frac{\mu_c(1+k_c)r^\alpha}{\Omega_c}\right) I_{\mu_c-1}\left(2\mu_c\sqrt{k_c(1+k_c)\frac{r^\alpha}{\Omega_c}}\right) \quad (5.1.2)$$

sa $\Omega_c=E[r^2]$, koji označava prosečnu snagu CCI signala, i parametri α, k i μ_c [159].

Ako je trenutni SIR, λ, definisan kao $\lambda=R^2/r^2$, dok je prosečan SIR, *S*, definisan kao $S=\Omega_d/\Omega_c$, može biti predstavljen relacijom [165], [166]:

$$p_\lambda(\lambda) = \frac{1}{2\sqrt{\lambda}} \int_0^\infty p_R\left(r\sqrt{\lambda}\right) p_r(r) dr \quad (5.1.3)$$

Nakon izvođenja sličnih matematičkih transformacija kao što su već date u literaturi, PDF trenutnog SIR se može predstaviti u obliku:

$$p_\lambda(\lambda) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{\alpha \mu_d^{2p+\mu_d} \mu_c^{2j+\mu_c} k_d^p k_c^j (1+k_d)^{p+\mu_d} (1+k_c)^{j+\mu_c}}{\exp(\mu_d k_d + \mu_c k_c) \Gamma(p+\mu_d) \Gamma(j+\mu_c) p! j!} \times \frac{\Gamma(p+j+\mu_d+\mu_c) S^{j+\mu_c} \lambda^{\frac{\alpha(p+\mu_d)-1}{2}}}{\left(\lambda^{\frac{\alpha}{2}} \mu_d(1+k_d) + S\mu_c(1+k_c)\right)} \quad (5.1.4)$$

pri čemu $\Gamma()$ označava dobro poznatu Gama funkciju [164, jed. (8.310/1)]. Dvostruki zbir suma u (5.1.4) brzo konvergira, pošto samo oko 20-30 članova treba sabrati da bi se postigla tačnost na 5. značajnoj cifri za različite vrednosti odgovarajućih parametara sistema.

5.2. Prenos pod uticajem senke

U ovom odeljku je po prvi put u literaturi predstavljena nova kompozitna raspodela, koja kombinuje uticaj višeputajnog α-κ-μ fedinga modelovanog opštom distribucijom i uticaj senke modelovane Gama distribucijom. Pošto se i višeputajni feding i uticaj senka dešavaju istovremeno u bežičnom prenosu, neophodno je razviti opšti model koji može tačno da opiše ovaj kompozitni slučajni proces. U slučaju kompozitnog fadinga, prosečna snaga višeputajne komponente, $\Omega=E[R^2]$ je takođe nasumično promenljiv proces, koji će se modelovati korišćenjem Gama modela dugoročnog bleđenja. Nova kompozitna distribucija fadinga može se dobiti usrednjavanjem kratkoročnog fedinga uslovne slučajne promenljive:

$$f_{R|\Omega}(R|\Omega)=\frac{\alpha k^{\frac{1-\mu}{2}}(1+k)^{\frac{1+\mu}{2}}\mu R^{\frac{\alpha(1+\mu)}{2}-1}}{\exp(\mu k)\Omega^{\frac{1+\mu}{2}}}\times\exp\left(-\frac{\mu(1+k)R^{\alpha}}{\Omega}\right)I_{\mu-1}\left(2\mu\sqrt{k(1+k)\frac{R^{\alpha}}{\Omega}}\right) \tag{5.2.1}$$

preko sporo promenljivog Gama procesa, za koji se pokazalo da tačno aproksimira fenomene senke, opisanih u [167], [168]:

$$f_{\Omega}(\Omega)=\frac{\Omega^{c-1}}{\Gamma(c)\Omega_0^c}\exp\left(-\frac{\Omega}{\Omega_0}\right) \tag{5.2.2}$$

sa c koji označava parametar oblikovanja i $\Omega_0=E[\Omega]$. Korišćenjem teoreme totalne verovatnoće, nakon nekih matematičkih manipulacija, PDF nove kompozitne distribucije može se izraziti u zatvorenom obliku kao:

$$f_R(R)=\int_0^{\infty}f_{R|\Omega}(R|\Omega)f_{\Omega}(\Omega)d\Omega$$
$$=\sum_{p=0}^{\infty}\frac{2\alpha\mu^{(3p+\mu+c)/2}k^p(1+k)^{(p+\mu+c)/2}R^{\frac{\alpha(p+\mu+c)-2}{2}}}{\exp(\mu k)\Gamma(p+\mu)p!\Gamma(c)\Omega_0^{(p+\mu+c)/2}}\times K_{(c-p-\mu)}\left(2\sqrt{\frac{\mu(1+k)R^{\alpha}}{\Omega_0}}\right) \tag{5.2.3}$$

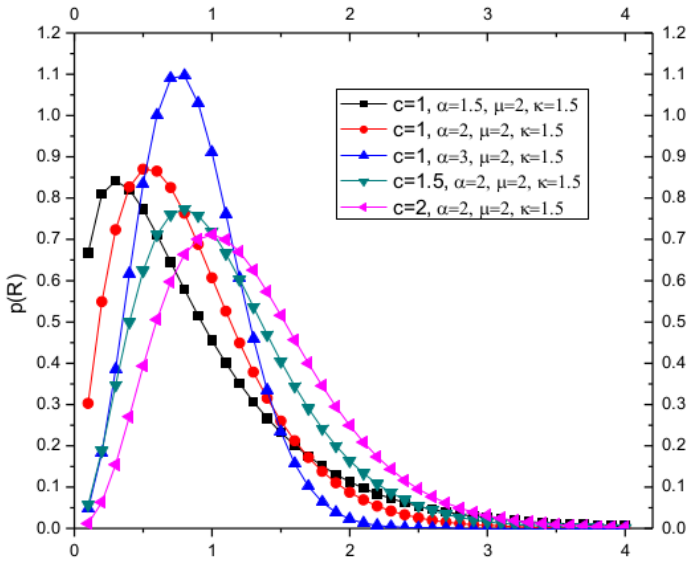
pri čemu $K\upsilon()$ označava modifikovanu Beselovu funkciju drugog reda υ [164, jed. (8.407/1)]. Konvergencija izraza (5.2.3) je brza pošto nekoliko članova treba sabrati da bi se postigla tačnost 5. značajne cifre za različite vrednosti odgovarajućih PDF parametara. Novoizvedeni kompozitni PDF je predstavljen na Slici 5.3.1 za različite vrednosti odgovarajućih parametara. Nakon čega će biti izvedeni drugi statistički parametri prvog reda za ovu kompozitnu feding raspodelu, naime CDF i momenti n-tog reda. Kapitalizirajući (5.1.4) i koristeći iste matematičke transformacije kao u [169, jed. (03.04.26.0006.01)] i [170, jed. (26)], izraz zatvorenog oblika za CDF kompozitnog procesa može se predstaviti u sledećem obliku:

$$F_R(R) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{\mu^{(3p+\mu+c)/2} k^p (1+k)^{(p+\mu+c)/2} R^{(p+\mu+c)/2}}{\exp(\mu k)\Gamma(p+\mu)p!\Gamma(c)\Omega_0^{(p+\mu+c)/2}}$$
$$\times G_{1,3}^{2,1}\left[\frac{1-(p+\mu+c)/2}{(c-p-\mu)/2, (p+\mu-c)/2, -(p+\mu+c)/2} \middle| \frac{\mu(1+k)R}{\Omega} \right] \quad (5.2.4)$$

gde predstavlja Majerovu G-funkciju [164, jed. (9.301)].

5.3. Numerički rezultati

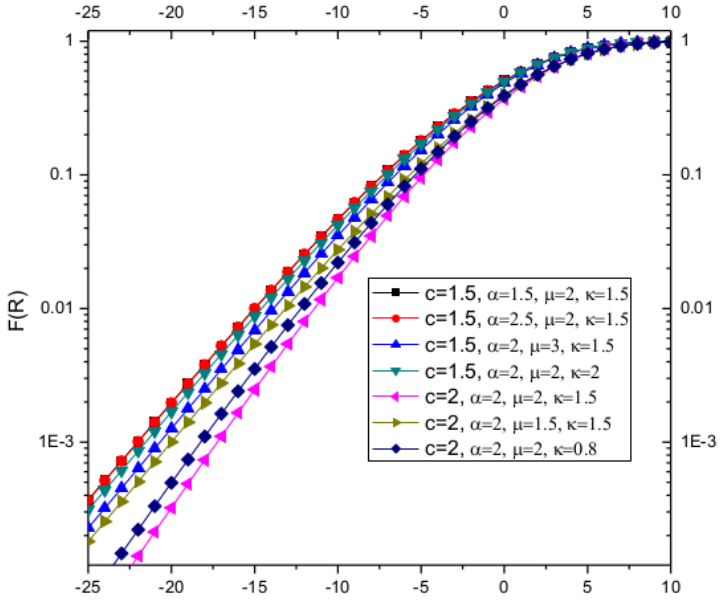
Sa Slike 5.3.1 može se videti da je promena PDF mnogo izraženija kada su veće vrednosti parametra α, za konstantne vrednosti μ i k, respektivno, PDF ima veći maksimum. Kada se c parametar poveća, maksimum PDF se smanjuje.



Slika 5.3.1. PDF nove kompozitne distribucije za različite vrednosti odgovarajućih parametara

Razmatrane su standardne mere performansi bežičnog prenosa za posmatrane scenarije. S obzirom na sistem sa ograničenim smetnjama, verovatnoća otkaza (OP) je efikasno procenjena za različite vrednosti parametara prenosa i grafički prikazana na Slici 5.3.1.

Kao što se može videti, na Slici 5.3.2 je takođe primećen uticaj tehnike kombinovanja selekcije (SC) na prijemniku, na poboljšanje performansi. Koriste se različite tehnike za smanjenje efekta bledenja i uticaja smetnji kokanalne interferencije. Prijem sa više grananja je efikasno rešenje, zasnovano na obezbeđivanju prijemnika sa više replika istog željenog signala [171-173]. Na taj način se povećava pouzdanost prenosa bez povećanja snage prenosa i propusnog opsega. Najjednostavniji prijem diverziteta, taj proces samo jedna od grana diverziteta je SC prijem.



Slika 5.3.2. CDF funkcija kompozitnog procesa za različite vrednosti odgovarajućih parametara.

Opšti zaključak sa Slike 5.3.2 je da se postižu niže vrednosti verovatnoće otkaza, u oblastima gde k, α i μ parametri dobijaju veće vrednosti. Slično, kada se parametar *c* povećava, niže vrednosti verovatnoće otkaza se dobijaju na Slici 5.3.2. To je zato što je uticaj senke manji kada parametar *c* ima veće vrednosti. Vidljivo je poboljšanje performansi dobijeno korišćenjem diverziteta SC sa dve grane, jer se za iste vrednosti sistemskih parametara postižu značajno niže vrednosti OP.

6. Analiza performansi hibridne RF/FSO veze preko Nakagami-m fedinga i hi-kvadrat-inverzne gama atmosferske turbulencije sa greškama usmeravanja

Sistemi za komunikaciju u slobodnom prostoru (FSO) privukli su značajnu pažnju zbog svog velikog propusnog opsega, niskih troškova implementacije i kompatibilnosti sa optičkim vlaknima. Međutim, njihove performanse su veoma podložne nepovoljnim vremenskim uslovima i privremenom gubitku linije vida (LOS). Brojne studije [174–176] su pokazale da magla ima najštetniji uticaj na prostiranje optičkog signala, dok kiša unosi zanemarljivo slabljenje. To se pripisuje činjenici da su veličine čestica u magli i izmaglici uporedive sa optičkim talasnim dužinama, što dovodi do značajnog rasejanja. Atmosfersko slabljenje u FSO vezama je stoga prvenstveno uzrokovano rasejanjem, dok apsorpcija igra sekundarnu ulogu, što u krajnjoj liniji ograničava propusni opseg kanala i degradira kvalitet prenosa.

Da bi se poboljšala pouzdanost sistema pod takvim oštećenjima, predložene su hibridne arhitekture. Ovi sistemi kombinuju snage radiofrekventne (RF) i FSO komunikacije. RF veza radi u milimetarskim talasnim opsezima i ostaje uglavnom netaknuta maglom, dok FSO veza nudi velike brzine prenosa podataka po vedrom vremenu. U maglovitim uslovima gde se performanse FSO-a degradiraju, RF veza obezbeđuje kontinuitet komunikacije. Nasuprot tome, RF performanse se degradiraju pod jakom kišom, u kom slučaju FSO veza preuzima kontrolu [174–176]. Ovaj mehanizam prebacivanja poboljšava ukupnu robusnost veze koristeći komplementarne karakteristike RF i FSO kanala.

Dve glavne konfiguracije se koriste u hibridnim RF/FSO sistemima:

1) Istovremeni prenos, gde obe veze rade istovremeno, pružajući visoku pouzdanost, ali po cenu spektralne neefikasnosti.

2) Prenos zasnovan na primopredaji, gde se prenos dinamički prebacuje između RF i FSO veza na osnovu kvaliteta kanala, nudeći bolje iskorišćenje resursa, ali povećanu osetljivost na brze promene u okruženju [174].

Tehnike kombinovanja diverzita, prvobitno razvijene za RF sisteme, takođe su prilagođene za hibridne RF/FSO veze kako bi se ublažio feding i poboljšala robusnost signala [176]. Posebno su se strategije predaje koje aktiviraju RF vezu kada odnos signal-šum (SNR) FSO padne ispod unapred definisanog praga pokazale efikasnim za održavanje dostupnosti veze.

Hibridni RF/FSO sistem sa jednim skokom, gde se podaci prenose direktno od izvora do odredišta bez posredničkih releja, zahteva precizno statističko modelovanje za procenu performansi. Zbog varijabilnosti i složenosti efekata kanala izazvanih vremenskim uslovima, univerzalni model nije izvodljiv. Stoga se koriste kompozitni statistički modeli za odvojeno modelovanje RF i FSO komponenti. U radu [177] korišćen je Gama-Gama model za FSO vezu i Nakagami-mm feding za RF vezu, demonstrirajući poboljšanja u prosečnoj stopi grešaka bita (ABER) i verovatnoći prekida. Slično tome, [178] je usvojio Malaginu distribuciju za FSO feding i generalizovani α-η-k-μ model za RF, pokazujući poboljšanu otpornost na turbulenciju i greške usmeravanja.

Analiziran je hibridni jednoskočni RF/FSO komunikacioni sistem u kome je RF feding modelovan korišćenjem Nakagami-mm raspodele, a FSO turbulencija je okarakterisana

korišćenjem Hi-kvadrat-inverzne gama raspodele. Izvedena je kumulativna funkcija raspodele (CDF) za kompozitni sistem na osnovu proizvoda nezavisnih CDF-ova oba kanala. Štaviše, predlažen je novi analitički izraz za ABER korišćenjem koherentne binarne fazno-pomerene modulacije (CBPSK). Performanse hibridnog modela su upoređene sa samostalnim FSO sistemom pod različitim nivoima turbulencije i parametrima sistema, ilustrujući prednosti hibridnog pristupa u ublažavanju atmosferskih oštećenja i efekata neusklađenosti.

6.1 Model sistema i kanala

Hibridni RF/FSO sistem se sastoji od dve veze, RF i FSO, koje koriste istu šemu digitalne modulacije. Na predajniku se signal šalje i na RF i na FSO veze, gde se prenos odvija istovremeno preko obe veze. Nakagami-m raspodela se koristi za modelovanje fedinga RF kanala. Funkcija gustine verovatnoće (PDF) Nakagami-m raspodele, u zavisnosti od SNR-a, može se predstaviti izrazom [177]:

$$f_{\gamma_1}(\gamma_1) = \left(\frac{m}{\mu_1}\right)^m \left(\frac{{\gamma_1}^{m-1}}{\Gamma(m)}\right) G_{0.1}^{1.0}\left(\begin{matrix}-\\0\end{matrix}\middle|\frac{m\gamma_1}{\mu_1}\right) \tag{6.1.1}$$

где фактор статистике фединга m≥0,5m представља релативну јачину коефицијента фединга, γ_1 означава SNR RF система, μ1 представља просечан SNR, а G означава гама функцију.

$$F_{\gamma_1}(\gamma_1) = \int_0^{\gamma_1} f_{\gamma_1}(\gamma_1) d\gamma_1 \tag{6.1.2}$$

Zamenom izraza (6.1.1) u izraz (6.1.2) i primenom pravila [179. 07.34.21.0084.01], integral je rešen, a rezultujući izraz predstavlja CDF:

$$F_{\gamma_1}(\gamma_1) = \left(\frac{1}{\Gamma(m)}\right) G_{1.2}^{1.1}\left(\begin{matrix}1\\m,0\end{matrix}\middle|\frac{m\gamma_1}{\mu_1}\right) \tag{6.1.3}$$

Za modeliranje turbulencije FSO veze korišćena je inverzna gama raspodela Hi-kvadrat. Izraz za PDF kada se primenjuje IM/DD pod uticajem greške pokazivanja, u odnosu na SNR, dat je izrazom [180]:

$$f_{\gamma_2}(\gamma_2) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{\xi^2 \mathrm{K}^p \Gamma\left(b+\xi^2+1\right)\exp(-K)}{2\gamma_2(b+\xi^2)\Gamma(p+1)p!\Gamma(b)\Gamma(b+\xi^2)} G_{2.2}^{2.1}\left(\begin{matrix}1-b, 1+\xi^2\\ \xi^2, p+1\end{matrix}\middle|\frac{(\mathrm{K}+1)\xi^2}{(b-1)(\xi^2+1)}\sqrt{\frac{\gamma_2}{\mu_2}}\right) \tag{6.1.4}$$

gde K označava Rajsov faktor, koji definiše odnos između direktne komponente i komponenti koje nastaju usled rasejanja, je SNR FSO sistema, a ξ predstavlja grešku laserskog usmeravanja, izračunatu kao $\xi = {}_{eq}/2\sigma_s$, gde je σ_s standardna devijacija greške usmeravanja (podrhtavanje) na prijemniku, a ${}_{eq}$ je ekvivalentni poluprečnik primljenog snopa $w_{L\,eq}^2 = w_L^2 \frac{\mathrm{erf}(v)\sqrt{\pi}}{2v}$, gde je, $v = \frac{\sqrt{\pi}a}{\sqrt{2}w_L}$, $A_0 = [\mathrm{erf}\,(v)]^2$, gde erf(.) označava funkciju greške, a b predstavlja parametar raspodele, koji se može izračunati pomoću izraza:

$$b = \frac{1}{exp(\sigma_{ls}^2)-1} + 2 \tag{6.1.5}$$

σ_{ls}^2 se može dobiti iz izraza:

$$\sigma_{ls}^2 = \sigma_{ls}^2(l_0) - \sigma_{ls}^2(L_0) \tag{6.1.6}$$

i predstavlja logaritamsku varijansu zračenja, gde su $\sigma_{ls}^2(l_0)$ i $\sigma_{ls}^2(L_0)$ efekti fluktuacija vrtloga velikih i malih razmera, respektivno.

$$\sigma_{ls}^2(l_0) = 0{,}04\sigma_1^2 \left(\frac{\eta_{Xa} Q_{ls}}{\eta_{Xa}+Q_{ls}}\right)^{7/6} \left[1 + 1{,}75\left(\frac{\eta_{Xa}}{\eta_{Xa}+Q_{ls}}\right)^{1/2} - 0{,}25\left(\frac{\eta_{Xa}}{\eta_{Xa}+Q_{ls}}\right)^{7/12}\right] \tag{6.1.7}$$

gde:

$$\eta_{Xa} = \frac{8{,}56}{1+0{,}18a^2+0{,}20\sigma_R^2 Q_{ls}^{1/6}} \tag{6.1.8}$$

$$Q_{ls} = \frac{10{,}89L}{kl_0^2} \tag{6.1.9}$$

k označava talasni broj, gde je λ talasna dužina, l_0 predstavlja vrtloge malih razmera (izražene u mm), dok σ_R^2=1,23$C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$ predstavlja Ritovu varijansu, ovde je C_n^2 parametar strukture indeksa prelamanja koji se koristi za definisanje intenziteta turbulencije, a L je rastojanje propagacije.

$$\sigma_{ls}^2(L_0) = 0{,}04\sigma_1^2 \left(\frac{\eta_{Xa_0} Q_{ls}}{\eta_{Xa_0}+Q_{ls}}\right)^{7/6} \left[1 + 1{,}75\left(\frac{\eta_{Xa_0}}{\eta_{Xa_0}+Q_{ls}}\right)^{1/2} - 0{,}25\left(\frac{\eta_{Xa_0}}{\eta_{Xa_0}+Q_{ls}}\right)^{7/12}\right] \tag{6.1.10}$$

gde:

$$\eta_{Xa_0} = \frac{\eta_{Xa} Q}{\eta_{Xa}+Q} \tag{6.1.11}$$

$$Q = \frac{64\pi^2 L}{kL_0^2} \tag{6.1.12}$$

$d = \sqrt{k(2a)^2/4L}$ je ekvivalentni prečnik otvora blende, gde a označava poluprečnik otvora blende prijemnika, dok L_0 predstavlja vrtloge velikih razmera.
Izraz za određivanje CDF-a dat je jednačinom:

$$F_{\gamma_2}(\gamma_2) = \int_0^{\gamma_2} f_{\gamma_2}(\gamma_2) d\gamma_2 \tag{6.1.13}$$

Zamenom jednačine (6.1.4) u jednačinu (6.1.13) i primenom pravila za rešavanje integrala [179, 07.34.21.0084.01], dobija se izraz za CDF:

$$F_{\gamma_2}(\gamma_2) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-2}\xi^2 \mathrm{K}^p \Gamma\left(b+\xi^2+1\right)\exp(-K)}{\pi(b+\xi^2)\Gamma(p+1)p!\Gamma(b)\Gamma(b+\xi^2)} G_{4.4}^{3.3}\left(\begin{matrix}1, \frac{1-b}{2}, \frac{2-b}{2}, \frac{2+\xi^2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{p+1}{2}, \frac{p+2}{2}, 0\end{matrix} \middle| \frac{4(\mathrm{K}+1)^2\xi^4\gamma_2}{(\xi^2+1)^2(b-1)^2\mu_2}\right) \tag{6.1.14}$$

6.2. Statističke karakteristike hibridnog RF/FSO sistema sa jednim skokom

U RF/FSO sistemu, usvojena je šema selektivnog kombinovanja, koja se implementira upoređivanjem SNR RF/FSO veze sa izlaznim signalom maksimalnog SNR [176]:

$$\gamma = \max(\gamma_1, \gamma_2) \tag{6.2.1}$$

gde su i odnosi signal/šum (SNR) RF i FSO veza, respektivno. Prema ovome, pretpostavljajući statističku nezavisnost između RF i FSO kanala, CDF hibridnog RF/FSO sistema pod se dobija kao proizvod pojedinačnih CDF-ova, [181]:

$$F_\gamma(\gamma) = P_r(\max(\gamma_1, \gamma_2) \le \gamma) = P_r(\gamma_1 \le \gamma, \gamma_2 \le \gamma) = F(\gamma_1)F(\gamma_2) \tag{6.2.2}$$

Zamenom jednačina (6.1.3) i (6.1.14) u jednačinu (6.2.2) i primenom pravila proizvoda Majerovih funkcija, dobija se generalizovani prošireni oblik bivarijantne Majer-G funkcije (EGBMGF – Extended Generalized Bivariate Meijer-G Function) [17, 07.34.16.0003.01], koji predstavlja CDF hibridnog RF/FSO sistema.

$$F_\gamma(\gamma) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-2}\xi^2 \mathrm{K}^p \Gamma\left(b+\xi^2+1\right)\exp(-K)}{\pi(b+\xi^2)\Gamma(m)\Gamma(p+1)p!\Gamma(b)\Gamma(b+\xi^2)} \times$$
$$G_{0,0\ 1,2}^{0,0\ 1,1\ 3,3\ 4,4}\left(\begin{matrix} 1 \\ m, 0 \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1, \frac{1-b}{2}, \frac{2-b}{2}, \frac{2+\xi^2}{2} \\ \frac{\xi^2}{2}, \frac{p+1}{2}, \frac{p+2}{2}, 0 \end{matrix} \middle| m\frac{\gamma_1}{\mu_1} \middle| \frac{4(\mathrm{K}+1)^2\xi^4\gamma_2}{(\xi^2+1)^2(b-1)^2\mu_2} \right) \tag{6.2.3}$$

6.3. ABER hibridnog RF/FSO sistema sa jednim skokom

Za hibridni RF/FSO sistem, izraz za određivanje ABER-a je izveden iz sledećeg izraza:

$$P_{ABER}(\gamma) = \frac{y^x}{2\Gamma(x)} \int_0^\infty e^{-y\gamma} \gamma^{x-1} F_\gamma(\gamma) d\gamma \tag{6.3.1}$$

x i *y* predstavljaju ABER parametre za binarnu modulacionu šemu. Tabela 6.3.1 prikazuje vrednosti parametara *x* i *y* u zavisnosti od modulacije.

Tabela 6.3.1. Vrednosti parametara *x* i *y* u zavisnosti od tehnike modulacije

Modulacione tehnike	x	y
Coherent Binary Phase Shift Keying (CBPSK)	0.5	1
Coherent Binary Frequency Shift Keying (CBFSK)	0.5	0.5
Non-Coherent Binary Frequency Shift Keying (NBFSK)	1	0.5
Diferential Binary Phase Shift Keying (DBPSK)	1	1

Zamenom jednačine (6.2.3) u jednačinu (6.3.1), implementacijom tehnike CBPSK modulacije i primenom pravila [179, 01.03.26.0004.01], gde je $e^{-y\gamma} = G_0^1{}_1^0\left(y\gamma\middle|\begin{matrix}-\\0\end{matrix}\right)$, a zatim primenom pravila [17, 07.34.21.0081.01], dobija se izraz za ABER hibridnog RF/FSO sistema prenosa sa jednim skokom:

$$P_\gamma(\gamma) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-3}\xi^2 \mathrm{K}^p \Gamma\left(b+\xi^2+1\right)\exp(-K)}{\pi(b+\xi^2)\Gamma(m)\Gamma(\mathrm{x})\Gamma(p+1)p!\Gamma(b)\Gamma(b+\xi^2)} \times G_{1\,0}^{0\,1\;1,1\;3.3}{}_{1,2\;4.4}\left(\begin{matrix}0\\-\end{matrix}\middle|\begin{matrix}1\\m,0\end{matrix}\middle|\begin{matrix}1,\frac{1-b}{2},\frac{2-b}{2},\frac{2+\xi^2}{2}\\\frac{\xi^2}{2},\frac{p+1}{2},\frac{p+2}{2},0\end{matrix}\middle|\frac{m}{\mu_1}\middle|\frac{(\mathrm{K}+1)^2\xi^4}{2(\xi^2+1)^2(b-1)^2\mu_2}\right) \quad (6.3.2)$$

Zamenom jednačine (6.2.3) u jednačinu (6.3.1), primenom tehnike CBPSK modulacije i rešavanjem integrala korišćenjem pravila [179, 07.34.21.0088.01], dobija se izraz za ABER od izvora do prijemnog čvora samo za FSO:

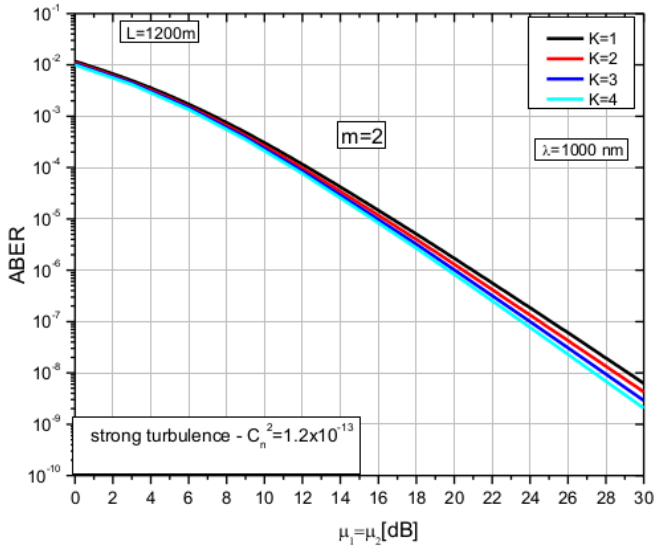
$$P_{\gamma_2}(\gamma_2) = \sum_{p=0}^{\infty} \frac{2^{b+p-3}\xi^2 \mathrm{K}^p \Gamma(b+\xi^2+1)\exp(-K)}{\pi(b+\xi^2)\Gamma(p+1)p!\Gamma(b)\Gamma(b+\xi^2)\Gamma(\mathrm{x})} G_{5.4}^{3.4}\left(\begin{matrix}1-x,1,\frac{1-b}{2},\frac{2-b}{2},\frac{2+\xi^2}{2}\\\frac{\xi^2}{2},\frac{p+1}{2},\frac{p+2}{2},0\end{matrix}\middle|\frac{4(\mathrm{K}+1)^2\xi^4}{(\xi^2+1)^2(b-1)^2\mu_2}\right) \quad (6.3.3)$$

6.4. Rezultati i diskusija

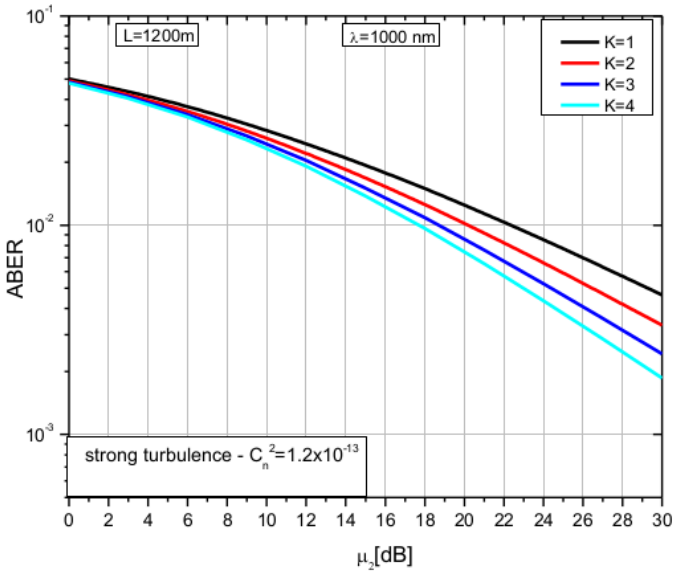
Performanse predloženog hibridnog RF/FSO sistema i samostalnog FSO sistema analizirane su korišćenjem ABER izraza izvedenih u jednačinama (6.3.2) i (6.3.3). Parametri simulacije su navedeni u Tabeli 6.4.1. Svi rezultati su dobijeni pod pretpostavkom da obe veze dele isti prosečan SNR (μ1 = μ2).

Tabela 6.4.1. Vrednosti parametara korišćene za numeričke proračune

Opis parametra	Notacija	Vrednost		
Indeks prelamanja – jačina turbulencije.	[$m^{-2/3}$]	Slab $6x10^{-15}$	Umeren $2x10^{-14}$	Jak $1.2x10^{-13}$
Talasna dužina	[			
Udaljenost između predajnika i prijemnika	L[	1200		
Primljena snaga na prijemniku	Ω	1		
Osetljivost prijemnika	R[A/W]	1		
Varijacija šuma		10^{-7}		
Radijus kružnog detektora	m]	0.05		
Radijus optičkog snopa na daljini	[			
Velike turbulencije		0.8		
Male turbulencije	[	6		



Slika 6.4.1. ABER za hibridni One-Hop RF/FSO sistem u uslovima jake turbulencije za različite vrednosti K-faktora kada se primenjuje CBPSK tehnika modulacije.

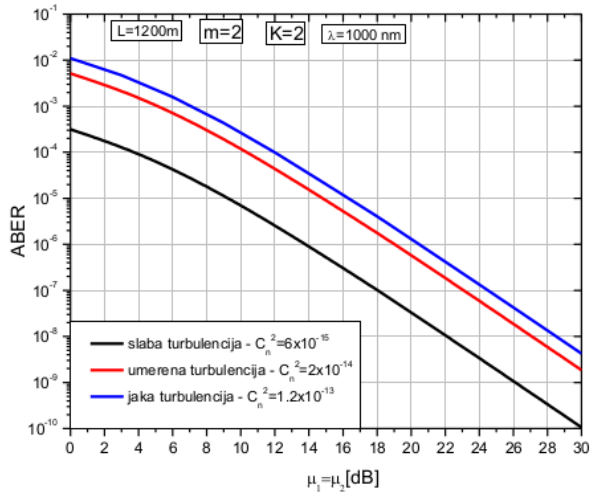


Slika 6.4.2. ABER za FSO sistem u uslovima jake turbulencije za različite vrednosti K-faktora kada se primenjuje CBPSK tehnika modulacije.

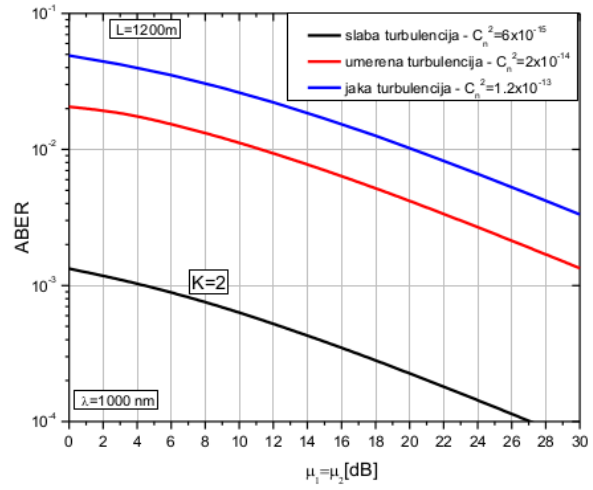
Analizom grafikona može se zaključiti da je nivo ABER-a značajno niži za hibridni RF/FSO sistem u poređenju sa FSO sistemom, što ukazuje da primena hibridnog modela poboljšava performanse sistema. Takođe se može primetiti da vrednost ABER-a opada sa povećanjem vrednosti električnog SNR-a. Pored toga, ABER se može dodatno smanjiti povećanjem vrednosti K-faktora, što poboljšava performanse i FSO i hibridnog sistema.

Slika 6.4.1 ilustruje performanse ABER-a hibridnog RF/FSO sistema pod jakom turbulencijom za različite vrednosti Rice-ovog K-faktora. Očigledno je da povećanje K-faktora značajno poboljšava performanse zbog jačanja komponente direktnog signala. Slika 6.4.2, koja predstavlja samo FSO sistem, pokazuje primetno veći ABER pod istim uslovima, potvrđujući robusnost hibridnog sistema.

Slike 6.4.3 i 6.4.4 upoređuju performanse ABER-a pod slabom, umerenom i jakom turbulencijom. Hibridni sistem konstantno nadmašuje FSO vezu u svim režimima. Ovo poboljšanje se pripisuje šemi selektivnog kombinovanja, gde RF veza kompenzuje degradaciju performansi u FSO putanji. Jaz se širi sa povećanjem turbulencije, ističući prilagodljivost hibridnog sistema teškim atmosferskim uslovima.

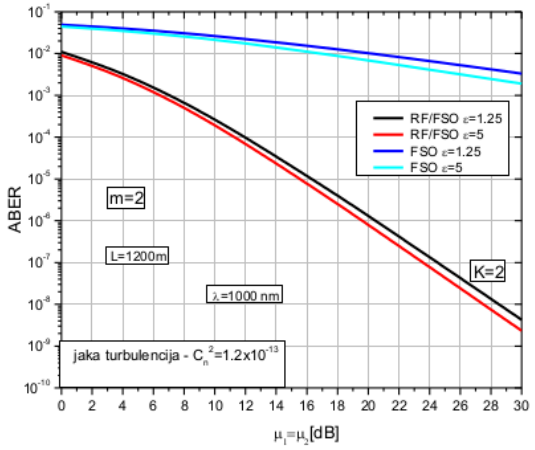


Slika 6.4.3. ABER za hibridni One-Hop RF/FSO sistem u uslovima slabe, umerene i jake turbulencije za vrednosti K=2, K=2 i m=2 pri primeni CBPSK tehnike modulacije.



Slika 6.4.4. ABER za FSO sistem u uslovima slabe, umerene i jake turbulencije za K=2 pri primeni CBPSK tehnike modulacije.

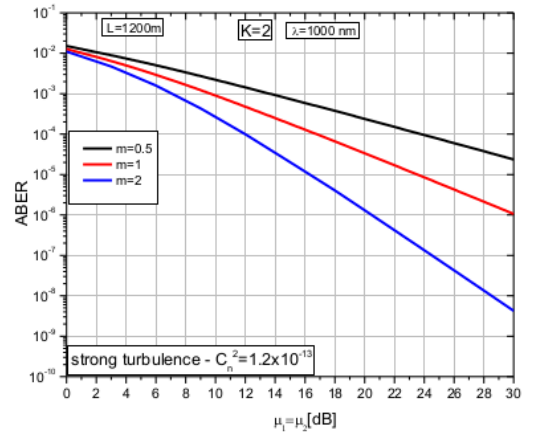
Sa slike 6.4.4 se može videti da je za slabije uslove turbulencije vrednost ABER niža i za hibridni i za FSO sistem. Hibridni RF/FSO sistem pokazuje nešto veću otpornost na atmosfersku turbulenciju u poređenju sa FSO vezom, što se i očekivalo. U hibridnom RF/FSO sistemu, kada se performanse FSO-a degradiraju zbog efekata turbulencije, RF veza preuzima prenos, a pošto je RF minimalno pogođen turbulencijom, ukupne karakteristike prenosa ostaju bolje.



Slika 6.4.5. ABER za hibridne One-Hop RF/FSO i FSO sisteme kao funkcija greške pokazivanja.

Na slici 6.4.5, ABER je procenjen kao funkcija greške usmeravanja (kvantifikacione pomoću parametra ξ). Manji ξ podrazumeva veće podrhtavanje i neusklađenost, što smanjuje performanse. Kako se ξ povećava, oba sistema imaju koristi, ali hibridni model održava konstantnu prednost, posebno pri višim vrednostima SNR-a, gde neusklađenost ima izraženiji efekat.

Slika 6.4.6 istražuje uticaj parametra fedinga Nakagami-mm na hibridni sistem pod slabom turbulencijom. Kao što se i očekivalo, povećanje mm daje bolje performanse, jer veće vrednosti odgovaraju manje jakom fedingu. Hibridni sistem pokazuje značajnu osetljivost na mm, posebno u režimima niskog do umerenog SNR-a.



Slika 6.4.6. ABER za hibridni RF/FSO sistem sa jednim skokom u uslovima slabe turbulencije za različite vrednosti statistike fedinga pri korišćenju CBPSK tehnike modulacije.

7. Modeli dubokog učenja za primenu prepoznavanja slika u 6G mrežnom okruženju

Upotreba metoda dubokog učenja može se videti u sistemu prepoznavanja slika koji se oslanja na tehnike dubokog učenja za automatizovanu klasifikaciju ili prepoznavanje objekata, područja ili karakteristika unutar slika. Postoje razne primene za računarski vid, kao što su prepoznavanje slika, detekcija objekata, analiza medicinskih slika i druge raznovrsne primene. Tehnika automatskog preuzimanja slika kao teksta naziva se automatsko prepoznavanje slika (AIA). Ovaj proces zahteva veliku količinu podataka o slici koji se brzo prenose i primaju u realnom vremenu. Modeli dubokog učenja za ovu vrstu primene zahtevaju obimne podatke, a 6G mreže obezbeđuju brzinu obrade. Razmatrani su različiti koncepti i tehnike za zadatak prepoznavanja slika koje mogu prepoznati objekte i anotirati ih odgovarajućim oznakama ili oznakama klase kako bi klasifikovale objekte na slici u odgovarajuću klasu. Pored toga, razmatrani su izazovi i problemi u primeni modela dubokog učenja za anotaciju slika, zajedno sa izazovima u 6G mrežama.

U sistemima za snimanje, kvalitet digitalnih slika često se degradira tokom snimanja. Šum, niska rezolucija (LR), zamućenje i kompresija su glavni uzroci degradacije slike [183]. Teško je konstruisati instrumente za snimanje sa proizvoljno visokom rezolucijom (HR) i bez degradacije dobijenih slika. Kao rezultat toga, potrebni su pristupi rekonstrukciji slike kako bi se poboljšao kvalitet slike i interpretabilnost vizuelnih informacija za čoveka kao posmatrača.

Da bi se postigao ovaj cilj, mogu se primeniti tehnike restauracije slike (IR) i poboljšanja slike u prostornom ili frekventnom domenu. IR pristupi koriste prethodno znanje o degradaciji da bi rekonstruisali osnovnu sliku [183], dok poboljšanje slike generalno ne modeluje degradaciju [184]. Iako je teoretski moguće u mnogim slučajevima rekonstruisati osnovnu sliku iz loših podataka dobijenih opremom iz stvarnog sveta, u praksi je rekonstrukcija slike iz dobijenih podataka komplikovana inverzna operacija zbog odsustva informacija o stvarnoj inverznoj transformaciji. Stoga konvencionalne metode rekonstrukcije slike takođe imaju tendenciju da budu netačne.

Zadaci rekonstrukcije slike su doživeli značajan napredak poslednjih godina u smislu novih modaliteta, poboljšane vremenske i prostorne rezolucije, šire primenljivosti, robusnosti, brzine i tačnosti. Razvoj brzih, otpornih i preciznih metoda rekonstrukcije je poželjna, ali izazovna tema istraživanja [184].

Savremeno duboko učenje (DL) postiglo je ogroman uspeh u primenama računarskog vida (CV), kao što su segmentacija slike, identifikacija objekata i sinteza slike, nadmašujući najsavremenije tehnike u prisustvu velikih skupova podataka [183]. Pored toga, DL algoritmi su se nedavno pojavili kao popularan izbor za rešavanje zadataka vida niskog nivoa u rekonstrukciji slike, sa obećavajućim rezultatima. U CV, rekonstrukcija slike korišćenjem DL-a se uglavnom odnosi na tehnike za generisanje visokokvalitetnih slika iz oštećenih ili slika niskog kvaliteta. Njihov zadatak se generalno može posmatrati kao rekonstrukcija slike dobijene pomoću uređaja za snimanje, npr. kamere visoke definicije, u slučaju prirodnog snimanja koje se vrši satelitskim snimanjem, podvodnim snimanjem itd.

IR zadaci, posebno uklanjanje šuma, superrezolucija (SR), dofarbavanje slike (IP), dekonvolucija i kolorizacija, nude širok spektar zanimljivih primena [184]. Na primer, IP pokušava da povrati pravu sliku iz nepotpuno oštećene slike popunjavanjem nedostajućih regiona. Interpolacija piksela, koja je povezana sa IP, nastoji da nadoknadi uklonjene piksele koji su nepovezani. Većina elektronskih aplikacija za snimanje zahteva HR slike jer mogu pružiti više informacija. Korišćenjem HR satelitskih fotografija, može biti jednostavno razlikovati jednu stavku od sličnih, a efikasnost prepoznavanja obrazaca u CV može se poboljšati ako se obezbedi HR slika. Rekonstrukcija slike je sposobna da kreira 2D ili 3D sliku iz delimičnih podataka, kao što su rezultati zračenja prikupljeni tokom medicinskog skeniranja. Kompresija slike se rutinski koristi za kompresiju podataka koji se prenose, a JPEG (Joint Photographic Experts Group) je najčešće korišćeni sistem kompresije. JPEG, kao strategija kompresije zasnovana na blokovima, često rezultuje blokirajućim artefaktima u oporavljenim slikama. Metode uklanjanja zamućenja i uklanjanja šuma sa slike smanjuju aberaciju defokusiranja na slikama i oporavljaju slike oštećene šumom senzora.

7.1. Korišćenje veštačke inteligencije za segmentaciju teksta iz slika

Segmentacija teksta iz slika predstavlja ključni zadatak u oblasti obrade slika i računarskog vida. Ona podrazumeva efikasno odvajanje tekstualnih regiona od netekstualnih regiona unutar slike, što predstavlja izazov zbog raznovrsnog niza stilova teksta, fontova i pozadina. Sa nedavnim napretkom u veštačkoj inteligenciji, posebno u dubokom učenju, efikasnost i tačnost segmentacije teksta su značajno poboljšane. Trenutna istraživanja pokazuju da su pristupi zasnovani na dubokom učenju, kao što su potpuno konvolucione mreže (FCN) i rekurentne neuronske mreže (RNN), postigli vrhunske performanse u segmentaciji teksta iz slika. Na primer, nedavno sprovedena studija [185] predstavila je novu metodu koja kombinuje FCN i RNN, što rezultuje poboljšanom tačnošću segmentacije teksta u prirodnim slikama. Pored toga, druga studija [186] predložila je inovativni okvir koji koristi konvolucione neuronske mreže (CNN) i mreže dugoročne kratkoročne memorije (LSTM) za rešavanje segmentacije teksta u istorijskim dokumentima.

Predlaženo je korišćenje veštačke inteligencije za segmentaciju teksta iz slika. Cilj je istražiti potencijal pristupa zasnovanih na dubokom učenju u ovom kontekstu i sprovesti sveobuhvatnu analizu trenutnih najsavremenijih metoda. Procenom različitih tehnika zasnovanih na veštačkoj inteligenciji za segmentaciju teksta iz slika, prikazan je vredan doprinos oblasti obrade slika i računarskog vida.

7.2. Materijali i metode Prikupljanje podataka

Korišćen je skup podataka sa slikama koje sadrže tekst na različitim jezicima i pismima. Skup podataka je prikupljen iz javno dostupnih izvora, kao što su internet i digitalne biblioteke. Slike su poticale iz različitih izvora, uključujući skenirane dokumente, prirodne slike i istorijske slike. Da bi se osigurala sposobnost algoritma da obrađuje različite oblasti teksta, skup podataka

se sastojao od slika sa različitim stilovima teksta, fontovima i pozadinama. Pre upotrebe, slike su prošle prethodnu obradu kako bi se osigurao visok kvalitet i rezolucija. Slikama su dodate odgovarajuće anotacije koje će služiti kao osnovna istina za procenu.

Pre implementacije algoritma za segmentaciju teksta, izvršena je prethodna obrada kako bi se poboljšale oblasti teksta i smanjio šum. Korišćene su tehnike kao što su binarizacija slike, izravnavanje slike i poboljšanje slike. Binarizacija slike je konvertovala slike u sivim tonovima ili u boji u binarne slike koristeći Ocuovu metodu, dobro poznatu tehniku praga. Izravnavanje slike je izvršeno pomoću Gausovog filtera, smanjujući šum i detalje slike. Štaviše, poboljšanje slike je koristilo algoritam za izjednačavanje ograničenog adaptivnog histograma (CLAHE), koji je poboljšao kontrast slike.

U segmentaciji teksta, potpuno konvolucione mreže (FCN) i rekurentne neuronske mreže (RNN) se često kombinuju kako bi se rešili različiti problemi u računarskom vidu i obradi prirodnog jezika. FCN, vrsta konvolucione neuronske mreže (CNN), zadržava prostorne informacije ulaznih slika zamenom potpuno povezanih slojeva konvolucionim slojevima, čime omogućava predviđanja za svaku lokaciju slike. Ona izdvaja karakteristike poput oblika, ivica i tekstura kako bi identifikovala tekstualne regione. Nasuprot tome, RNN modeliraju sekvencijalne informacije, kao što su tekst ili govor, hvatajući kontekst iz prethodnih unosa. U segmentaciji teksta, RNN modeluje sekvencijalne informacije tekstualnih regiona, kao što su redosled i raspored znakova. Sinergija FCN i RNN omogućava robusnu i preciznu segmentaciju tekstualnih regiona na slikama.

Predložen je pristup segmentaciji teksta zasnovan na dubokom učenju. Konkretno, kombinacija FCN i RNN je korišćena da bi se poboljšala tačnost segmentacije teksta na slikama. FCN je bavio ekstrakcijom karakteristika, dok se RNN bavio sekvencijalnim modeliranjem tekstualnih regiona. FCN je treniran na skupu podataka slike da bi naučio karakteristike tekstualnih regiona, a RNN je zatim korišćen za modeliranje sekvencijalnih informacija ovih regiona. Predložena FCN-RNN arhitektura je efikasno identifikovala i odvojila tekstualne regione od netekstualnih regiona na slikama. U-Net arhitektura je izabrana za FCN, omogućavajući snimanje finih i grubih karakteristika putem preskakanja veza između segmenata kodera i dekodera. LSTM arhitektura je implementirala RNN, efikasno snimajući vremenske zavisnosti između tekstualnih regiona na slikama.

Performanse predloženog algoritma za segmentaciju teksta procenjene su korišćenjem nekoliko metrika, uključujući preciznost, prisetljivost i F1-skor. Takođe je izvršeno poređenje sa najsavremenijim metodama za segmentaciju teksta iz slika kako bi se procenila njegova efikasnost. Preciznost, prisetljivost i F1skor korišćeni su za procenu sposobnosti algoritma da precizno identifikuje regione teksta na slikama. Pored toga, performanse algoritma analizirane su u odnosu na druge metode, otkrivajući potencijalne oblasti za poboljšanje.

Istražene su i druge metode segmentacije teksta:

- Tradicionalna metoda zasnovana na obradi slika: Ovaj pristup koristi konvencionalne tehnike obrade slika, kao što su pragovi, morfološke operacije i detekcija ivica, za identifikaciju tekstualnih regiona na slikama. Iako jednostavna i brza, ova metoda ima ograničenu mogućnost obrade složenih slika, jer ne uzima u obzir kontekst slike.

- Metoda zasnovana na dubokom učenju koja koristi samo potpuno konvolucionu mrežu (FCN): U ovoj metodi, FCN arhitektura se koristi za izdvajanje karakteristika iz slika i identifikaciju tekstualnih regiona. Iako FCN-ovi mogu automatski da uče karakteristike i obrađuju složene slike, nedostaje im svest o kontekstu.

- Metoda zasnovana na dubokom učenju koja koristi kombinaciju FCN i uslovnih slučajnih polja (CRF): Ova metoda kombinuje FCN i CRF za identifikaciju tekstualnih regiona na slikama. FCN izdvaja karakteristike, dok CRF uzima u obzir kontekst slike za pravljenje predviđanja. Ovaj pristup se pokazao robusnijim i preciznijim od drugih metoda, jer uključuje i karakteristike slike i kontekst.

7.3. Segmentacija teksta

Slika se konvertuje u sive tonove pomoću funkcije rgb2gray(), ali samo ako je u pitanju RGB slika. To je zato što Otsuova metoda praga koja se koristi kasnije u kodu radi samo na slikama u sivim tonovima. Zatim se slika konvertuje u binarnu sliku pomoću Otsuove metode, koja automatski izračunava vrednost praga na osnovu histograma slike kako bi se razdvojili prednji plan i pozadina. Funkcija graythresh() se koristi za izračunavanje vrednosti praga, a funkcija im2bw() se koristi za konvertovanje slike u binarnu sliku koristeći ovaj prag.

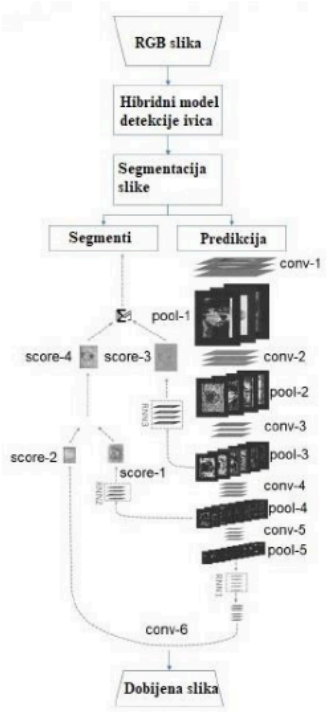
Nakon konvertovanja slike u binarnu sliku, kod uklanja sve objekte na slici koji su manji od 30 piksela pomoću funkcije bwareaopen(). Ova funkcija uklanja sve povezane komponente (objekte) u binarnoj slici koji imaju manje piksela od navedene vrednosti. Ovaj korak je važan za uklanjanje malih, šumnih objekata koji mogu uticati na rezultate segmentacije.

Dobijena binarna slika se zatim prikazuje pomoću funkcije imshow(). Operator ~ se koristi za invertovanje binarne slike, tako da je prednji plan beo, a pozadina crna.

Povezane komponente u binarnoj slici se zatim obeležavaju pomoću funkcije bwlabel(), koja svakoj povezanoj komponenti u binarnoj slici dodeljuje jedinstvenu celobrojnu vrednost. Broj povezanih komponenti se čuva u promenljivoj Ne.

Funkcija regionprops() se koristi za merenje svojstava povezanih komponenti u binarnoj slici. U ovom kodu, mere se samo granične kutije povezanih komponenti pomoću opcije BoundingBox. Promenljiva „propied“ čuva svojstva svih povezanih komponenti. Kod zatim ponovo prikazuje originalnu sliku i preklapa granične kutije povezanih komponenti preko nje pomoću funkcije rectangle(). Ovaj korak je koristan za vizuelizaciju rezultata segmentacije i proveru da li su objekti od interesa pravilno identifikovani.

Konačno, kod izdvaja svaki objekat sa slike pomoću petlje koja iterira kroz sve povezane komponente. Za svaku povezanu komponentu, funkcija find() se koristi za pronalaženje indeksa piksela koji joj pripadaju. Zatim se izračunavaju minimalni i maksimalni indeksi reda i kolone, a objekat se izdvaja isecanjem slike na oblast od interesa pomoću ovih indeksa. Dobijeni objekat se prikazuje na posebnoj slici pomoću funkcije imshow() i čuva se kao PNG datoteka pomoću funkcije imwrite(). Algoritam predložene metode je prikazan na slici 7.3.1.



Slika 7.3.1. Modifikovana hibridna metoda za segmentaciju teksta

Ukratko, Matlab kod koristi hibrid koji kombinuje pragove i morfološke operacije za segmentiranje slike. Kod prvo konvertuje sliku u sive tonove, a zatim u binarnu sliku koristeći Ocuovu metodu. Zatim uklanja male objekte iz binarne slike i označava povezane komponente. Svojstva povezanih komponenti se mere pomoću regionprops(), a objekti se ekstrahuju i čuvaju kao PNG datoteke. Kod pruža koristan okvir za segmentiranje objekata na slikama i može se modifikovati i prilagoditi za različite primene [187].

7.4. Rezultati segmentacije teksta

Predloženi algoritam je primenjen na skup podataka slika, a njegovi rezultati segmentacije teksta su temeljno analizirani. Rezultati su pokazali izuzetnu sposobnost algoritma da precizno identifikuje tekstualne regione unutar slika i uspešno ih odvoji od netekstualnih regiona. Postignuta je visoka preciznost, prisetljivost i F1-skor, što potvrđuje sposobnost algoritma da pravilno identifikuje tekstualne regione.

Kvantitativna evaluacija predloženog algoritma je sprovedena poređenjem njegovih rezultata sa ručno anotiranim podacima o stvarnosti, gde su tekstualni regioni ručno identifikovani na slikama. Zanimljivo je da je algoritam pravilno identifikovao tekstualne regione u preko 95% slika unutar skupa podataka. Pored toga, algoritam je pokazao robusnost u rukovanju različitim stilovima teksta, fontovima i pozadinama, što je kritičan aspekt za primene u stvarnom svetu.

Štaviše, algoritam je pokazao kompetentnost u obradi slika niskog kvaliteta i niske rezolucije, ključnih karakteristika za upotrebljivost u stvarnom svetu [188].

7.5. Poređenje sa najsavremenijim metodama

Predloženi algoritam je upoređen sa nekoliko najsavremenijih metoda za segmentaciju teksta iz slika, sa evaluacijom zasnovanom na preciznosti, prisetljivosti i F1-skoru. Rezultati su otkrili superiornost predloženog algoritma u odnosu na druge metode u pogledu preciznosti, prisetljivosti i F1-skora, potkrepljujući njegovu superiornu efikasnost u identifikaciji tekstualnih regiona unutar slika. Na primer, predloženi algoritam je postigao impresivan F1-skor od 0,92, dok je najsavremenija metoda postigla samo 0,87.

Pored toga, predloženi algoritam je upoređen sa drugim najsavremenijim metodama u pogledu njegove sposobnosti da obrađuje različite stilove teksta, fontove i pozadine. Rezultati su nedvosmisleno utvrdili superiornost predloženog algoritma u obrađivanju različitih tekstualnih regiona, obuhvatajući različite jezike i pisma, čime je potvrđena njegova robusnost i svestranost [189].

7.6. Analiza performansi algoritma

Detaljna evaluacija performansi predloženog algoritma proširena je na specifične aspekte segmentacije teksta [190]. Ovo je uključivalo ispitivanje efikasnosti algoritma u obrađivanju tekstualnih regiona sa različitim veličinama fonta, orijentacijama i nivoima preklapanja sa drugim regionima. Rezultati su ukazali na pohvalne performanse algoritma u svim ovim aspektima, prikazujući visoku preciznost, prisetljivost i F1-skor [191].

Ispitana je sposobnost algoritma da obrađuje različite tipove pozadina. Rezultati su pokazali njegovu kompetentnost u efikasnoj obradi slika sa jednostavnim i složenim pozadinama, pokazujući visoku preciznost, prisetljivost i F1-skor. Međutim, algoritam je pokazao mala ograničenja kod slika sa pretrpanim pozadinama, posebno kod onih sa brojnim preklapajućim elementima ili veoma složenim pozadinama [192].

Uprkos predloženim povoljnim performansama, određena ograničenja zahtevaju rešavanje. Jedno takvo ograničenje odnosi se na rukovanje slikama sa veoma zatrpanim pozadinama. Pored toga, performanse algoritma sa slikama koje sadrže iskrivljene oblasti teksta zahtevaju dalje usavršavanje. Budući napori će se fokusirati na rešavanje ovih ograničenja predlaganjem novih tehnika, kao što je uključivanje naprednih arhitektura dubokog učenja, korišćenje dodatnih metoda obrade slika ili primena mehanizama pažnje. Štaviše, efikasnost algoritma može se dodatno poboljšati integrisanjem raznovrsnijih podataka u skup podataka za obuku, čime se poboljšava njegovo rukovanje različitim jezicima i pismima.

Predloženi algoritam za segmentaciju teksta pokazao je svoju superiornost u pogledu performansi u poređenju sa najsavremenijim metodama. Sa visokom preciznošću, prisetljivošću i F1-rezultatom, algoritam je dosledno i precizno identifikovao tekstualne regione unutar slika. Njegova sposobnost da obrađuje različite stilove teksta, fontove i pozadine, kao i njegova

kompetentnost u obradi slika niskog kvaliteta i niske rezolucije, dodatno učvršćuju njegovu efikasnost.

Pored toga, algoritam je podvrgnut evaluaciji korišćenjem Indeksa strukturne sličnosti (SSIM) kao široko korišćene metrike za procenu kvaliteta slike. Rezultati su pokazali visok SSIM rezultat, što ukazuje na uspeh algoritma u generisanju tekstualnih regiona koji su blisko podsećali na stvarno stanje. Ovo ističe efikasnost algoritma u preciznoj segmentaciji tekstualnih regiona na slikama.

Štaviše, u pogledu stabilnosti, predloženi algoritam se pokazao kao jedna od najrobusnijih i najpouzdanijih dostupnih metoda. Dosledno je proizvodio pouzdane rezultate u svim test slučajevima, efikasno obrađujući slike sa različitim stilovima teksta, fontovima i pozadinama, kao i one sa karakteristikama niskog kvaliteta i niske rezolucije koje se često sreću u realnim primenama.

Predloženi algoritam za segmentaciju teksta se pojavljuje kao veoma efikasna i otporna metoda za preciznu identifikaciju tekstualnih regiona na slikama. Njegove izvanredne performanse, označene visokom preciznošću, prisetljivošću, F1-rezultatom i SSIM rezultatima, pojačavaju njegovu vrednost za realne primene. Kombinacija potpuno konvolucione mreže (FCN) i rekurentne neuronske mreže (RNN) pokazala se kao efikasan pristup za segmentaciju teksta. FCN se ističe u izdvajanju bitnih karakteristika iz slika, dok RNN vešto modelira sekvencijalne informacije tekstualnih regiona. Korišćenje U-Net arhitekture za FCN i arhitekture dugoročne memorije (LSTM) za RNN takođe je doprinelo impresivnim performansama algoritma.

Gledajući ka budućim naprecima, uključivanje raznovrsnijih podataka u skup podataka za obuku moglo bi poboljšati sposobnost algoritma da obrađuje različite jezike i pisma. Pored toga, istraživanje integracije naprednih arhitektura dubokog učenja, kao što su mehanizmi pažnje ili dodatne tehnike obrade slika, može dodatno poboljšati performanse algoritma u obrađivanju slika sa veoma pretrpanim pozadinama ili iskrivljenim tekstualnim regionima.

Predloženi algoritam je upoređen sa drugim metodama, uključujući tradicionalnu metodu zasnovanu na obradi slika, metodu zasnovanu na dubokom učenju koja koristi samo potpuno konvolucionu mrežu (FCN) i metodu zasnovanu na dubokom učenju koja koristi kombinaciju FCN i uslovnih slučajnih polja (CRF). Predloženi metod je postigao impresivan SSIM rezultat od 0,95, dok su druge najsavremenije metode dobile rezultate od 0,9, 0,87 i 0,83, respektivno. Ova značajna razlika u performansama podržava superiornost predloženog algoritma u preciznom segmentiranju tekstualnih regiona na slikama u poređenju sa njegovim pandanima.

Predloženi algoritam za segmentaciju teksta se pokazao kao veoma efikasan i robustan metod za precizno segmentiranje tekstualnih regiona na slikama. Njegova svestranost u rukovanju različitim stilovima teksta, fontovima i pozadinama, u kombinaciji sa njegovom otpornošću u obradi slika niskog kvaliteta i niske rezolucije, utvrđuje njegovu vrednost kao vrednog alata za primene u stvarnom svetu. Sinergistička kombinacija FCN i RNN, zajedno sa uključivanjem U-Net i LSTM arhitektura, značajno je doprinela izuzetnim performansama algoritma.

8. Zaključak

U disertaciji je primenjen sveobuhvatan pristup u analizi 6G sistema. Na početku je predstavljena vizija buduće generacije mreža, a zatim i pregled ključnih slučajeva upotrebe, među kojima se izdvajaju holografske komunikacije visoke rezolucije, imerzivna stvarnost, taktilni internet, visoko povezana društva i komunikacije integrisane sa svemirskim tehnologijama. Za svaki scenario upotrebe definisani su tehnički zahtevi, nakon čega je razmatrana implementacija i okruženja u kojima bi 6G sistemi mogli da funkcionišu. Posebno je analiziran niz istraživačkih izazova – od aplikativnog nivoa, preko dizajna jezgra mreže sledeće generacije, do fizičkog sloja – kao i moguća rešenja. Jasno je napravljen razdor između onoga što je teorijski ostvarivo i onoga što je praktično izvodljivo u okviru pojedinih segmenata sistema.

Prilikom uvođenja 6G mora se voditi računa o kompatibilnosti, budući da će uređaji raditi u više modova i frekvencijskih opsega. To znači da će 6G uređaji morati da podrže prelazak na 5G ili 4G u zavisnosti od dostupne pokrivenosti. Samim tim, i 6G RAN i jezgro mreže moraće da budu prilagođeni prethodnim generacijama, što donosi brojne tehničke izazove i kompromise u dizajnu – na primer, uvođenje nove arhitekture jezgra mreže. Slična pitanja otvaraju se i kod izbora metoda talasnog oblika i kodovanja, jer mnogi pristupi neće biti usklađeni sa onima koje koristi 5G mreža.

Nakon detaljne analize komponenti sistema i istraživanja potencijalnih rešenja, može se zaključiti da 6G donosi uzbudljive perspektive. Iako put do njihovog ostvarenja obiluje preprekama, istraživanja pružaju dovoljno osnova da se krene ka obećavajućim pravcima razvoja.

Za mnoge, 6G označava početak perioda dubokih transformacija i radikalnog preoblikovanja komunikacionih tehnologija. U disertaciji je analizovana evolucija bežičnih mobilnih sistema, sa fokusom na razdoblje „posle 5G“, jer se upravo tu otvara mogućnost za snažniji spoj tehnologije i čovečanstva – povezivanje većeg broja ljudi i pružanje koristi marginalizovanim i nedovoljno razvijenim delovima globalnog društva. Posebna pažnja posvećena je tehničkim preprekama i izazovima koje 6G mora da prevaziđe, kao i faktorima koji mogu olakšati njegovo uvođenje. Istaknuto je da, iako su do sada ostvarena značajna dostignuća, još uvek postoji niz otvorenih problema. Vizija univerzalnog, besplatnog i dostupnog interneta bez prekida ostaje glavni cilj i predmet brojnih istraživačkih smernica.

Iako je 5G doneo velika poboljšanja, pristupačan i ultrabrz internet sa minimalnim kašnjenjem, uključujući sajber-fizičku integraciju sa vazdušnim i svemirskim komunikacijama, tek treba da postane stvarnost. U radu su prikazana ključna pitanja i ograničenja 5G mreža, definisana kao osnovne prepreke za razvoj 6G, i označena kao glavni istraživački izazovi.

6G se opisuje kao era novih početaka i hiper-digitalizacije, gde će tehnološki napredak pratiti globalne društvene trendove poput održivog razvoja, zelene energije i zaštite životne sredine. Očekuje se da 6G neće biti samo još jedna etapa u razvoju bežične komunikacije, već platforma koja donosi šire društvene koristi – omogućavajući industrijama da napreduju, a društvima da ostvare inkluzivni rast. Posebno se naglašava da budući razvoj otvara široko polje istraživanja u oblastima kao što su komunikacije na milimetarskim i terahercnim talasima, molekularno i kvantno računarstvo, duboko učenje i blockchain. Novi 6G ekosistem zahtevaće istraživanja u vezi sa arhitekturom, fizičkim i višim slojevima mreže, izazovima atmosferskih

smetnji i ograničenjima Thz spektra, uz traženje održivih rešenja za modulaciju, dupleks i sigurnost.

Predstavljeno je pozicioniranje ključnih aktera u procesu definisanja društvenog i poslovnog potencijala 6G ere, sa posebnim naglaskom na konvergenciju digitalnih, fizičkih i ličnih domena, trendove u mobilnim komunikacijama, kao i tehničke specifikacije i zahteve. Posebno je analizirano sakupljanje energije, koje omogućava bežičnim uređajima da prikupljaju energiju iz radiofrekventnih signala. Takođe su razmotrena uputstva u vezi sa arhitekturom sistema, upravljanjem, računarstvom, povezivanjem i dizajnom uređaja. Kao osnova za 6G, nedavno je uveden koncept menadžmenta bez dodira, koji obezbeđuje novu perspektivu arhitekture i kontrole. Pored toga, izvedeni su izrazi zatvorenog oblika za funkciju gustine verovatnoće i kumulativnu distribucionu funkciju odnosa signal–smetnja u scenariju sistema ograničenog interferencijama.

Internet stvari (IoT) postaje sve značajniji deo savremenog društva i beleži konstantan i brz rast na tržištu. Najbrže se razvijaju sektori zasnovani na celularnim i širokopojasnim mrežama, dok aktuelni i budući standardi mobilnih komunikacija predstavljaju ključne pokretače različitih IoT primena. U disertaciji je sprovedeno detaljno istraživanje savremene literature koja se nalazi na preseku IoT tehnologija i 5G/6G celularnih mreža. Posebno su istaknuti glavni pokazatelji performansi ovih mreža, uz analizu u kojoj meri postojeća istraživanja odgovaraju zahtevima za masovni pristup, energetsku efikasnost, pouzdanost, nisku latenciju i bezbednost, kao i koje su dodatne mere neophodne da bi se do 2030. godine dostigao željeni nivo razvoja.

Istraživanje obuhvata i aspekte koji su često zanemareni u prethodnim studijama, poput energetske efikasnosti i kodovanja kanala radi postizanja pouzdanosti i smanjenja latencije u prenosu podataka. Pored toga, razmotreni su osnovni koncepti i principi različitih modela dubokog učenja, distribuiranog i federalnog učenja, uz naglasak na njihovu prilagodljivost IoT aplikacijama. Takođe je prikazano rešenje koje predviđa integraciju satelita i dronova u mreže sledeće generacije, čime se otvaraju nove mogućnosti za razvoj i implementaciju IoT sistema.

Istraživani su uslovi prostiranja u bežičnim komunikacijama u opštem kanalu sa fedingom, koji se mogu primeniti na druge tipove kanala sa fedingom, kao što su Raileigh, κ-μ, Nakagami-k (Hoit), Nakagami-m i Veibull. Izrazi zatvorenog oblika za funkciju gustine verovatnoće i kumulativnu funkciju distribucije odnosa signal-interferencija su izvedeni za slučaj sistema ograničenog smetnjama. Pored toga, predstavljeni su izrazi zatvorenog oblika za statistiku prvog reda (funkcija gustine verovatnoće, kumulativna funkcija distribucije i momenti različitih redova) novouvedenog kompozitnog modela, omogućavajući jednostavnu, neograničenu analizu, precizno planiranje bežičnog sistema, kao i evaluaciju mera performansi. Neke mere performansi su takođe izračunate i razmatrane.

Predložen je hibridni RF/FSO model koji pokazuje superiorne performanse u različitim jačinama turbulencije, nivoima grešaka usmeravanja i uslovima fedinga. Njegova otpornost proizilazi iz komplementarnih karakteristika RF i optičkih veza i efikasnosti selektivnog kombinovanja u ublažavanju oštećenja veze.

U cilju unapređenja FSO komunikacionih sistema, predstavljen je novi hibridni RF/FSO model za analizu performansi, koji kombinuje dva nezavisna statistička modela. Izračunati su novi izrazi za ABER, koji određuju performanse hibridnog RF/FSO sistema i performanse FSO sistema sa direktnom propagacijom signala u vidnoj liniji pri primeni CBPSK modulacije. Uporedna analiza performansi ova dva sistema sprovedena je za različite vrednosti parametara sistema, greške neusklađenosti i nivoe atmosferske turbulencije.

Zahvaljujući analizi i istraživanju, utvrđeno je nekoliko veoma važnih zaključaka. Predloženi hibridni RF/FSO sistem sa jednim skokom značajno nadmašuje FSO-samo sistem u svim procenjenim scenarijima. Primetno je da hibridna šema pokazuje jaku otpornost na atmosferske turbulencije i greške usmeravanja, održavajući pouzdan prenos adaptivnim prebacivanjem između RF i FSO veza na osnovu trenutnih uslova SNR. Ovaj dinamički mehanizam prebacivanja obezbeđuje kontinuirani protok podataka i minimalnu verovatnoću prekida, što sistem čini posebno efikasnim u urbanim sredinama, platformama na velikim nadmorskim visinama i u komunikaciji u hitnim slučajevima.

Takođe se može zaključiti da K-faktor ima značajan uticaj na poboljšanje performansi i FSO i hibridnih RF/FSO sistema. Pored toga, hibridni RF/FSO sistem karakteriše parametr m, čije povećanje može imati veliki uticaj na poboljšanje performansi hibridnog RF/FSO sistema. Ovi nalazi potvrđuju efikasnost predloženog statističkog modela i ističu praktičnu održivost hibridnih RF/FSO veza u realnim primenama.

Predstavljen je pristup segmentacije teksta iz slika zasnovan na dubokom učenju za automatizovanu klasifikaciju ili prepoznavanje objekata, područja ili karakteristika unutar slika, koristeći kombinaciju potpuno konvolucione mreže (FCN) i rekurentne neuronske mreže (RNN). Predloženi algoritam je pokazao izuzetnu efikasnost u preciznom identifikovanju tekstualnih regiona unutar slika i njihovom efikasnom odvajanju od netekstualnih regiona. Njegove performanse su potkrepljene visokom preciznošću, što ukazuje na kompetentnost algoritma u pravilnom otkrivanju tekstualnih regiona.

Algoritam je pokazao prilagodljivost različitim stilovima teksta, fontovima i pozadinama, uz održavanje robusnih performansi u obrađivanju slika niskog kvaliteta i niske rezolucije, ključnih atributa u stvarnim primenama. Pored toga, algoritam je pokazao svoju svestranost efikasnom obradom teksta na različitim jezicima i pismima, ističući tako svoj kapacitet za podršku različitim jezicima. Štaviše, evaluacija algoritma koristeći indeks strukturne sličnosti (SSIM) kao široko korišćenu metriku za procenu kvaliteta slike otkrila je visok SSIM rezultat, potvrđujući sposobnost algoritma da precizno segmentira tekstualne regione koji blisko podsećaju na stvarno stanje. Predloženi algoritam se pokazao kao jedna od metoda sa najboljim performansama u poređenju sa najsavremenijim pristupima. Njegove izuzetne performanse, zajedno sa stabilnošću i pouzdanošću, pozicioniraju ga kao jedno od najrobusnijih i najpouzdanijih rešenja trenutno dostupnih na tržištu. Kao vredan alat za primene u stvarnom svetu, on ima značajan potencijal za dalje usavršavanje i unapređenje u budućim istraživačkim poduhvatima.

9. Literatura

[1] Draft proposal for a European Partnership under Horizon Europe, Smart Networks and Services, 30 June 2020.

[2] European Technology Platform NetWorld2020, Strategic Research and Innovation Agenda 2021-2027.

[3] European Vision for the 6G Network Ecosystem, The 5G Infrastructure Association, 2021, DOI: 10.5281/zenodo.5007671

[4] Mojtaba Vaezi, Amin Azari, et al., "Cellular, Wide-Area, and Non-Terrestrial IoT: A Survey on 5G Advances and the Road Towards 6G", Networking and Internet Architecture, Computer science, 2021, https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.03059

[5] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld, and M. Hoffmann, "Industry 4.0," Bus. Inf. Syst. Eng., vol. 6, no. 4, pp. 239–242, 2014.

[6] "The evolution of Industry 1.0 to 4.0," 2019, https://www.seekmomentum.com/blog/manufacturing/ the-evolution-of-industry-from-1-to-4.

[7] Deloitte, "Internet of Things (IoT): The rise of the connected world," 2019, www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/in/Documents/technology/media/telecommunications/in-tmt-IoT Theriseoftheconnectedworld-28aug-noexp.pdf.

[8] "Cellular IoT evolution for industry digitalization," 2019, https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/cellular-iot-evolution-forindustry-digitalization.

[9] E. AB, "Ericsson mobility report, November 2020," November 2020, https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports

[10] A. Elnashar, "IoT evolution towards a super-connected world," arXiv:1907.02589, 2019.

[11] M. Kanj, V. Savaux, and M. Le Guen, "A Tutorial on NB-IoT physical layer design," IEEE Commun. Surveys Tuts., 2020.

[12] A. Zaidi et al., "Designing for the future: the 5G NR physical layer," Ericsson Technology Review, 2017.

[13] G. P. Fettweis, "The Tactile Internet: Applications and Challenges," in IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 64-70, March 2014, doi: 10.1109/MVT.2013.2295069.

[14] A. Mesbah, "Stochastic Model Predictive Control: An Overview and Perspectives for Future Research," in IEEE Control Systems Magazine, vol. 36, no. 6, pp. 30-44, Dec. 2016, doi: 10.1109/MCS.2016.2602087.

[15] A. González, A. Villamil, N. Franchi and G. Fettweis, "String Stable CACC under LTE V2V Mode 3: Scheduling Periods and Transmission Delays," 2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF), 2019, pp. 292-297, doi: 10.1109/5GWF.2019.8911631.

[16] C. De Lima et al., "Convergent Communication, Sensing and Localization in 6G Systems: An Overview of Technologies, Opportunities and Challenges," in IEEE Access, vol. 9, pp. 26902-26925, 2021.
[17] Antzela Kosta; Nikolaos Pappas; Vangelis Angelakis, Age of Information: A New Concept, Metric, and Tool, now, 2017, doi: 10.1561/1300000060.
[18] Y. Chen, W. Liu, Z. Niu, Z. Feng, Q. Hu, T. Jiang, "Pervasive intelligent endogenous 6G wireless systems: Prospects, theories and key technologies,", Digital Communications and Networks, vol. 6, pp. 312-320, 2020.
[19] G Fettweis, "6G Research Challenges – Enabling Collaborative Personal Consumer Robotics," Keynote, VTC Spring 2021. https://vtc-virtual.org/presentation/keynote/6g-research-challenges-enabling-collaborative-personal-consumer-robotics
[20] 3GPP TS 22.261 Service requirements for the 5G system; Stage 1.
[21] M. Xiao, S. Mumtaz, Y. Huang, L. Dai, Y. Li, M. Matthaiou, G. K. Karagiannidis, E. Björnson, K. Yang, I. Chih-Lin et al., "Millimeter wave communications for future mobile networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 9, pp. 1909–1935, 2017.
[22] A. Ghosh, T. A. Thomas, M. C. Cudak, R. Ratasuk, P. Moorut, F. W. Vook, T. S. Rappaport, G. R. MacCartney, S. Sun, and S. Nie, "Millimeter-wave enhanced local area systems: A high-data-rate approach for future wireless networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 6, pp. 1152–1163, 2014.
[23] R. W. Heath, N. Gonzalez-Prelcic, S. Rangan, W. Roh, and A. M. Sayeed, "An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems," IEEE journal of selected topics in signal processing, vol. 10, no. 3, pp. 436–453, 2016.
[24] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G," IEEE communications magazine, vol. 52, no. 2, pp. 74–80, 2014.
[25] T. Bai, A. Alkhateeb, and R. W. Heath, "Coverage and capacity of millimeter-wave cellular networks," IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 9, pp. 70–77, 2014.
[26] C. Saha and H. S. Dhillon, "Millimeter wave integrated access and backhaul in 5G: Performance analysis and design insights," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 37, no. 12, pp. 2669–2684, 2019.
[27] J. Choi, V. Va, N. Gonzalez-Prelcic, R. Daniels, C. R. Bhat, and R. W. Heath, "Millimeter-wave vehicular communication to support massive automotive sensing," IEEE Communications Magazine, vol. 54, no. 12, pp. 160–167, 2016.
[28] B. Wang, R. Shi, F. Shi, and J. Hu, "mmwave-NOMA-based low-latency and high-reliable communications for enhancement of V2X services," IEEE Access, vol. 8, pp. 57 049–57 062, 2020.
[29] S. Singh, M. N. Kulkarni, A. Ghosh, and J. G. Andrews, "Tractable model for rate in self-backhauled millimeter wave cellular networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 10, pp. 2196–2211, 2015.

[30] W. Roh, J.-Y. Seol, J. Park, B. Lee, J. Lee, Y. Kim, J. Cho, K. Cheun, and F. Aryanfar, "Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results," IEEE communications magazine, vol. 52, no. 2, pp. 106–113, 2014.
[31] Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, and H. Ishii, "Future steps of LTE-A: evolution toward integration of local area and wide area systems," IEEE wireless communications, vol. 20, no. 1, pp. 12–18, 2013.
[32] A. Pyattaev, K. Johnsson, S. Andreev, and Y. Koucheryavy, "Communication challenges in high-density deployments of wearable wireless devices," IEEE Wireless Communications, vol. 22, no. 1, pp. 12–18, 2015.
[33] T. Lv, Y. Ma, J. Zeng, and P. T. Mathiopoulos, "Millimeter-wave NOMA transmission in cellular m2m communications for internet of things," IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 3, pp. 1989–2000, 2018.
[34] O. El Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," IEEE transactions on wireless communications, vol. 13, no. 3, pp. 1499–1513, 2014.
[35] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 2016.
[36] E. Bjornson, L. Van der Perre, S. Buzzi, and E. G. Larsson, "Massive MIMO in sub-6 GHz and mmwave: Physical, practical, and use-case differences," IEEE Wireless Communications, vol. 26, no. 2, pp. 100– 108, 2019.
[37] S. A. R. Naqvi and S. A. Hassan, "Combining NOMA and mmwave technology for cellular communication," in 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). IEEE, 2016, pp. 1–5.
[38] B. Wang, L. Dai, Z. Wang, N. Ge, and S. Zhou, "Spectrum and energy efficient beamspace MIMO-NOMA for millimeter-wave communications using lens antenna array," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 10, pp. 2370–2382, 2017.
[39] A. S. Marcano and H. L. Christiansen, "Performance of non-orthogonal multiple access (NOMA) in mmwave wireless communications for 5G networks," in 2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). IEEE, 2017, pp. 969–974.
[40] C.-H. Liu, K.-H. Ho, and J.-Y. Wu, "Mmwave UAV networks with multicell association: Performance limit and optimization," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 37, no. 12, pp. 2814–2831, 2019.
[41] X. Wang and M. C. Gursoy, "Coverage analysis for energy-harvesting uav-assisted mmwave cellular networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 37, no. 12, pp. 2832–2850, 2019.
[42] H. Elgala, R. Mesleh, and H. Haas, "Indoor optical wireless communication: potential and state-of-the-art," IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 9, pp. 56–62, 2011.
[43] M. Z. Chowdhury, M. T. Hossan, A. Islam, and Y. M. Jang, "A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and applications," IEEE Access, vol. 6, pp. 9819–9840, 2018.

[44] S. Dimitrov and H. Haas, Principles of LED light communications: towards networked Li-Fi. Cambridge University Press, 2015.
[45] M. Uysal, C. Capsoni, Z. Ghassemlooy, A. Boucouvalas, and E. Udvary, Optical wireless communications: an emerging technology. Springer, 2016.
[46] A. Boucouvalas, "Ambient light noise and its effect on receiver design for indoor wireless optical links," in Proceedings of ICC/SUPERCOMM'96- International Conference on Communications, vol. 3. IEEE, 1996, pp. 1472–1476.
[47] S.-H. Lee, "Reducing the effects of ambient noise light in an indoor optical wireless system using polarizers," Microwave and Optical Technology Letters, vol. 40, no. 3, pp. 228–231, 2004.
[48] A. Jaiswal, M. R. Bhatnagar, and V. K. Jain, "Performance of optical space shift keying over gamma–gamma fading with pointing error," IEEE Photonics Journal, vol. 9, no. 2, pp. 1–16, 2017.
[49] I. S. Ansari, M.-S. Alouini, and J. Cheng, "Ergodic capacity analysis of free-space optical links with nonzero boresight pointing errors," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 8, pp. 4248– 4264, 2015.
[50] M. Katz and D. OâA˘ ZBrien, "Exploiting novel concepts for visible light ´ communications: from light-based IoT to living surfaces," Optik, vol. 195, p. 163176, 2019.
[51] S. U. Rehman, S. Ullah, P. H. J. Chong, S. Yongchareon, and D. Komosny, "Visible light communication: a system perspective-overview and challenges," Sensors, vol. 19, no. 5, p. 1153, 2019.
[52] H. Haas, L. Yin, Y. Wang, and C. Chen, "What is lifi?" Journal of lightwave technology, vol. 34, no. 6, pp. 1533–1544, 2015.
[53] H.-H. Lu, C.-Y. Li, H.-W. Chen, C.-M. Ho, M.-T. Cheng, Z.-Y. Yang, and C.-K. Lu, "A 56 Gb/s PAM4 VCSEL-based LiFi transmission with two stage injection-locked technique," IEEE Photonics Journal, vol. 9, no. 1, pp. 1–8, 2016.
[54] H. Haas, "Lifi is a paradigm-shifting 5G technology," Reviews in Physics, vol. 3, pp. 26–31, 2018.
[55] H. Haas, L. Yin, C. Chen, S. Videv, D. Parol, E. Poves, H. Alshaer, and M. S. Islim, "Introduction to indoor networking concepts and challenges in lifi," Journal of Optical Communications and Networking, vol. 12, no. 2, pp. A190–A203, 2020.
[56] F. Zafar, M. Bakaul, and R. Parthiban, "Laser-diode-based visible light communication: Toward gigabit class communication," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 2, pp. 144–151, 2017.
[57] I. F. Akyildiz, A. Kak, and S. Nie, "6G and beyond: The future of wireless communications systems," IEEE Access, vol. 8, pp. 133 995–134 030, 2020.
[58] H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair, and M.-S. Alouini, "Terahertz band: The last piece of rf spectrum puzzle for communication systems," IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 1, pp. 1–32, 2019.
[59] X. Ma, Z. Chen, W. Chen, Y. Chi, Z. Li, C. Han, and Q. Wen, "Intelligent reflecting surface enhanced indoor terahertz communication systems," Nano Communication Networks, vol. 24, p. 100284, 2020.

[60] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, "6G wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions," IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 1, pp. 957–975, 2020.
[61] K. Tekbıyık, A. R. Ekti, G. K. Kurt, and A. Görçin, "Terahertz band communication systems: Challenges, novelties and standardization efforts," Physical Communication, vol. 35, p. 100700, 2019.
[62] N. Rajatheva, I. Atzeni, E. Bjornson, A. Bourdoux, S. Buzzi, J.-B. Dore, S. Erkucuk, M. Fuentes, K. Guan, Y. Hu et al., "White paper on broadband connectivity in 6G," arXiv preprint arXiv:2004.14247, 2020.
[63] S. H. Han and J. H. Lee, "An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission," IEEE wireless communications, vol. 12, no. 2, pp. 56–65, 2005.
[64] J. Abdoli, M. Jia, and J. Ma, "Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems," in 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2015, pp. 66–70.
[65] Y. Cai, Z. Qin, F. Cui, G. Y. Li, and J. A. McCann, "Modulation and multiple access for 5G networks," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 1, pp. 629–646, 2017.
[66] R. Hadani, S. Rakib, M. Tsatsanis, A. Monk, A. J. Goldsmith, A. F. Molisch, and R. Calderbank, "Orthogonal time frequency space modulation," in 2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). IEEE, 2017, pp. 1–6.
[67] P. Yang, Y. Xiao, Y. L. Guan, K. Hari, A. Chockalingam, S. Sugiura, H. Haas, M. Di Renzo, C. Masouros, Z. Liu et al., "Single-carrier smMIMO: A promising design for broadband large-scale antenna systems," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 3, pp. 1687–1716, 2016.
[68] G. Y. Li, Z. Xu, C. Xiong, C. Yang, S. Zhang, Y. Chen, and S. Xu, "Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues," IEEE Wireless communications, vol. 18, no. 6, pp. 28–35, 2011.
[69] D. Feng, C. Jiang, G. Lim, L. J. Cimini, G. Feng, and G. Y. Li, "A survey of energy-efficient wireless communications," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 1, pp. 167–178, 2012.
[70] M. Di Renzo, H. Haas, and P. M. Grant, "Spatial modulation for multipleantenna wireless systems: A survey," IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 12, pp. 182–191, 2011.
[71] P. Yang, M. Di Renzo, Y. Xiao, S. Li, and L. Hanzo, "Design guidelines for spatial modulation," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 1, pp. 6–26, 2014.
[72] C. Kolias, G. Kambourakis, A. Stavrou, and J. Voas, "DDoS in the IoT: Mirai and other botnets," Comput., vol. 50, no. 7, pp. 80–84, 2017.
[73] M. Wazid, A. K. Das, V. Odelu, N. Kumar, M. Conti, and M. Jo, "Design of secure user authenticated key management protocol for generic IoT networks," IEEE Int. of Things, vol. 5, no. 1, pp. 269– 282, 2018.
[74] E. Aras, G. S. Ramachandran, P. Lawrence, and D. Hughes, "Exploring the security vulnerabilities of LoRa," in Proc. IEEE Int. Conf. on Cybern (CYBCONF), 2017, pp. 1–6.

[75] Y. Gao, Y. Su, W. Yang, S. Chen, S. Nepal, and D. C. Ranasinghe, "Building secure SRAM PUF key generators on resource constrained devices," in Proc. IEEE Int. Conf. on Perv. Comput. and Commun. Wksp. (PerCom Workshops), 2019, pp. 912–917.
[76] B. Xu, W. Wang, Q. Hao, Z. Zhang, P. Du, T. Xia, H. Li, and X. Wang, "A security design for the detecting of buffer overflow attacks in IoT device," IEEE Access, vol. PP, pp. 1–1, 11 2018.
[77] S. Shen, K. Zhang, Y. Zhou, and S. Ci, "Security in edgeassisted Internet of things: challenges and solutions," Sci. China Inf. Sci., vol. 63, no. 12, p. 220302, 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11432-019-2906-y.
[78] H. A. Abdul-Ghani, D. Konstantas, and M. Mahyoub, "A comprehensive IoT attacks survey based on a building-blocked reference model," Int. J. of Adv. Comput. Sci. and Appl., vol. 9, 2018.
[79] Qadir, Z.; Munawar, H.S.; Saeed, N.; Le, K. Towards 6G Internet of Things: Recent Advances, Use Cases, and Open Challenges. arXiv 2021, arXiv:2111.06596.
[80] Shahraki, A.; Abbasi, M.; Piran, M.J.; Taherkordi, A. A Comprehensive Survey on 6G Networks: Applications, Core Services, Enabling Technologies, and Future Challenges. arXiv 2021, arXiv:2101.12475.
[81] A. S. Cacciapuoti, K. Sankhe, M. Caleffi, and K. R. Chowdhury, "Beyond 5G: Thz-based medium access protocol for mobile heterogeneous networks," IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 6, pp. 110–115, 2018.
[82] G. Mandlburger, M. Pfennigbauer, R. Schwarz, S. Flöry, and L. Nussbaumer, "Concept and performance evaluation of a novel UAV-borne topo-bathymetric LiDAR sensor," Remote Sensing, vol. 12, no. 6, p. 986, 2020.
[83] P. Amon, U. Riegl, P. Rieger, M. Pfennigbauer et al., "UAV-based laser scanning to meet special challenges in lidar surveying," Proceedings of the Geomatics Indaba, 2015.
[84] I. Stefan, H. Burchardt, and H. Haas, "Area spectral efficiency performance comparison between VLC and RF femtocell networks," in 2013 IEEE international conference on communications (ICC). IEEE, 2013, pp. 3825–3829.
[85] Z. Hajjarian, J. M. Fadlullah, M. Kavehrad et al., "MIMO free space optical communications in turbid and turbulent atmosphere," JCM, vol. 4, no. 8, pp. 524–532, 2009.
[86] M. Sarajlic, L. Liu, and O. Edfors, "When are low resolution ADCs ´ energy efficient in massive MIMO?" IEEE Access, vol. 5, pp. 14 837– 14 853, 2017.
[87] J. Hoydis, M. Kobayashi, and M. Debbah, "Green small-cell networks," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 6, no. 1, pp. 37–43, 2011.
[88] I. Chih-Lin, J. Huang, R. Duan, C. Cui, J. Jiang, and L. Li, "Recent progress on C-RAN centralization and cloudification," IEEE Access, vol. 2, pp. 1030–1039, 2014.
[89] S. Kosta, A. Aucinas, P. Hui, R. Mortier, and X. Zhang, "Thinkair: Dynamic resource allocation and parallel execution in the cloud for mobile code offloading," in 2012 Proceedings IEEE Infocom. IEEE, 2012, pp. 945–953.

[90] J. Tang, W. P. Tay, and T. Q. Quek, "Cross-layer resource allocation with elastic service scaling in cloud radio access network," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 9, pp. 5068–5081, 2015.
[91] I. Krikidis, S. Timotheou, S. Nikolaou, G. Zheng, D. W. K. Ng, and R. Schober, "Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems," IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 11, pp. 104–110, 2014.
[92] Z. Zhang, T. He, M. Zhu, Z. Sun, Q. Shi, J. Zhu, B. Dong, M. R. Yuce, and C. Lee, "Deep learning-enabled triboelectric smart socks for IoT based gait analysis and vr applications," npj Flexible Electronics, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 2020.
[93] S. Ulukus, A. Yener, E. Erkip, O. Simeone, M. Zorzi, P. Grover, and K. Huang, "Energy harvesting wireless communications: A review of recent advances," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 3, pp. 360–381, 2015.
[94] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 12, no. 5, pp. 1989–2001, 2013.
[95] H. Zhao, Y. Shuang, M. Wei, T. J. Cui, P. Del Hougne, and L. Li, "Metasurface-assisted massive backscatter wireless communication with commodity wi-fi signals," Nature communications, vol. 11, no. 1, pp. 1– 10, 2020.
[96] U. Karthaus and M. Fischer, "Fully integrated passive UHF RFID transponder IC with 16.7-µw minimum rf input power," IEEE Journal of solid-state circuits, vol. 38, no. 10, pp. 1602–1608, 2003.
[97] C. Boyer and S. Roy, "Backscatter communication and RFID: coding, energy, and MIMO analysis," IEEE Transactions on communications, 2014.
[98] A. Yastrebova, R. Kirichek, Y. Koucheryavy, A. Borodin, and A. Koucheryavy, "Future networks 2030: Architecture & requirements," in 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). IEEE, 2018, pp. 1–8.
[99] M. C. Domingo, "An overview of the internet of underwater things," Journal of Network and Computer Applications, vol. 35, no. 6, pp. 1879 – 1890, 2012. [Online]. Available: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804512001646
[100] A. Vanelli-Coralli, A. Guidotti, T. Foggi, G. Colavolpe, and G. Montorsi, "5g and beyond 5g non-terrestrial networks: trends and research challenges," in 2020 IEEE 3rd 5G World Forum (5GWF), 2020, pp. 163–169.
[101] J.-H. Lee, J. Park, M. Bennis, and Y.-C. Ko, "Integrating leo satellite and uav relaying via reinforcement learning for non-terrestrial networks," in GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference, 2020, pp. 1–6.
[102] M. Erdelj, M. Król, and E. Natalizio, "Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management," Computer Networks, vol. 124, pp. 72–86, 2017.

[103] B. Alzahrani, O. S. Oubbati, A. Barnawi, M. Atiquzzaman, and D. Alghazzawi, "UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges," Journal of Network and Computer Applications, p. 102706, 2020.
[104] S. H. Abdulhussain and B. M. Mahmmod, "Fast and efficient recursive algorithm of meixner polynomials," Journal of Real-Time Image Processing, pp. 1–13, 2021.
[105] Y. Zeng, J. Lyu, and R. Zhang, "Cellular-connected UAV: Potential, challenges, and promising technologies," IEEE Wireless Communications, vol. 26, no. 1, pp. 120–127, 2018.
[106] A. Mohammed, A. Mehmood, F.-N. Pavlidou, and M. Mohorcic, "The role of high-altitude platforms (haps) in the global wireless connectivity," Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 11, pp. 1939–1953, 2011.
[107] X. Cao, P. Yang, M. Alzenad, X. Xi, D. Wu, and H. Yanikomeroglu, "Airborne communication networks: A survey," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 36, no. 9, pp. 1907–1926, 2018.
[108] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," IEEE network, vol. 34, no. 3, pp. 134–142, 2019.
[109] M. Giordani and M. Zorzi, "Non-terrestrial networks in the 6G era: challenges and opportunities," IEEE Network, 2020.
[110] S. Nayak and R. Patgiri, "6G: Envisioning the key issues and challenges," arXiv preprint arXiv:2004.04024, 2020.
[111] S. Zhou, M. Zhao, X. Xu, J. Wang, and Y. Yao, "Distributed wireless communication system: a new architecture for future public wireless access," IEEE Communications Magazine, vol. 41, no. 3, pp. 108–113, 2003.
[112] D. Gesbert, S. Hanly, H. Huang, S. S. Shitz, O. Simeone, and W. Yu, "Multi-cell MIMO cooperative networks: A new look at interference," IEEE journal on selected areas in communications, vol. 28, no. 9, pp. 1380–1408, 2010.
[113] E. Bjornson, R. Zakhour, D. Gesbert, and B. Ottersten, "Cooperative multicell precoding: Rate region characterization and distributed strategies with instantaneous and statistical csi," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 58, no. 8, pp. 4298–4310, 2010.
[114] W. Viriyasitavat, L. Da Xu, Z. Bi, D. Hoonsopon, and N. Charoenruk, "Managing QoS of internet-of-things services using blockchain," IEEE Transactions on Computational Social Systems, vol. 6, no. 6, pp. 1357– 1368, 2019.
[115] D. E. Kouicem, A. Bouabdallah, and H. Lakhlef, "Internet of things security: A top-down survey," Computer Networks, vol. 141, pp. 199– 221, 2018.
[116] W. Viriyasitavat, L. Da Xu, Z. Bi, D. Hoonsopon, and N. Charoenruk, "Managing QoS of internet-of-things services using blockchain," IEEE Transactions on Computational Social Systems, vol. 6, no. 6, pp. 1357– 1368, 2019.
[117] P. Botsinis, D. Alanis, Z. Babar, H. V. Nguyen, D. Chandra, S. X. Ng, and L. Hanzo, "Quantum search algorithms for wireless communications," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 2, pp. 1209– 1242, 2018.

[118] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, and J. Wang, "6G technologies: Key drivers, core requirements, system architectures, and enabling technologies," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 14, no. 3, pp. 18–27, 2019.
[119] Z. Ma, M. Xiao, Y. Xiao, Z. Pang, H. V. Poor, and B. Vucetic, "Highreliability and low-latency wireless communication for internet of things: challenges, fundamentals, and enabling technologies," IEEE Internet of Things Journal, vol. 6, no. 5, pp. 7946–7970, 2019.
[120] S. Nayak and R. Patgiri, "6G: Envisioning the key issues and challenges," arXiv preprint arXiv:2004.04024, 2020.
[121] X. Xu, Y. Pan, P. P. M. Y. Lwin, and X. Liang, "3D holographic display and its data transmission requirement," in 2011 International Conference on Information Photonics and Optical Communications. IEEE, 2011, pp. 1–4.
[122] O. Holland, E. Steinbach, R. V. Prasad, Q. Liu, Z. Dawy, A. Aijaz, N. Pappas, K. Chandra, V. S. Rao, S. Oteafy et al., "The IEEE 1918.1 tactile internet standards working group and its standards," Proceedings of the IEEE, vol. 107, no. 2, pp. 256–279, 2019.
[123] G. P. Fettweis, "The tactile internet: Applications and challenges," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 9, no. 1, pp. 64–70, 2014.
[124] M. Erdelj, M. Król, and E. Natalizio, "Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management," Computer Networks, vol. 124, pp. 72–86, 2017.
[125] M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs, and G. Fettweis, "5G-enabled tactile internet," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 34, no. 3, pp. 460–473, 2016.
[126] I. F. Akyildiz, M. Pierobon, S. Balasubramaniam, and Y. Koucheryavy, "The internet of bio-nano things," IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 3, pp. 32–40, 2015.
[127] C. Wang, C. Liang, F. R. Yu, Q. Chen, and L. Tang, "Computation offloading and resource allocation in wireless cellular networks with mobile edge computing," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 8, pp. 4924–4938, 2017.
[128] Y. Mao, J. Zhang, S. Song, and K. B. Letaief, "Stochastic joint radio and computational resource management for multi-user mobile-edge computing systems," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 9, pp. 5994–6009, 2017.
[129] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, "Internet of things for smart cities," IEEE Internet of Things journal, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, 2014.
[130] N. Kaina, M. Dupré, G. Lerosey, and M. Fink, "Shaping complex microwave fields in reverberating media with binary tunable metasurfaces," Scientific reports, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2014.
[131] Y.-C. Liang, R. Long, Q. Zhang, J. Chen, H. V. Cheng, and H. Guo, "Large intelligent surface/antennas: Making reflective radios smart," Journal of Communications and Information Networks, vol. 4, no. 2, pp. 40–50, 2019.
[132] S. Hausman and Ł. Januszkiewicz, "Impact of indoor environment on path loss in body area networks," Sensors, vol. 14, no. 10, pp. 19 551– 19 560, 2014.

[133] D. Kurup, W. Joseph, G. Vermeeren, and L. Martens, "In-body path loss model for homogeneous human tissues," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 54, no. 3, pp. 556–564, 2011.
[134] C. Krittanawong, A. J. Rogers, K. W. Johnson, Z. Wang, M. P. Turakhia, J. L. Halperin, and S. M. Narayan, "Integration of novel monitoring devices with machine learning technology for scalable cardiovascular management," Nature Reviews Cardiology, pp. 1–17, 2020.
[135] J. Liu, Y. Xiao, S. Li, W. Liang, and C. P. Chen, "Cyber security and privacy issues in smart grids," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 4, pp. 981–997, 2012.
[136] F. Dalipi and S. Y. Yayilgan, "Security and privacy considerations for IoT application on smart grids: Survey and research challenges," in 2016 IEEE 4th International Conference on Future Internet of Things and Cloud Workshops (FiCloudW). IEEE, 2016, pp. 63–68.
[137] N. Cheng, F. Lyu, J. Chen, W. Xu, H. Zhou, S. Zhang, and X. Shen, "Big data driven vehicular networks," IEEE Network, vol. 32, no. 6, pp. 160– 167, 2018.
[138] H. Zhou, W. Xu, J. Chen, and W. Wang, "Evolutionary V2X technologies toward the internet of vehicles: Challenges and opportunities," Proceedings of the IEEE, vol. 108, no. 2, pp. 308–323, 2020.
[139] L. D. Xu, "The contribution of systems science to industry 4.0," Systems Research and Behavioral Science, vol. 37, no. 4, pp. 618–631, 2020.
[140] G. Berardinelli, N. H. Mahmood, I. Rodriguez, and P. Mogensen, "Beyond 5G wireless irt for industry 4.0: Design principles and spectrum aspects," in 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2018, pp. 1–6.
[141] S. Wolfert, L. Ge, C. Verdouw, and M.-J. Bogaardt, "Big data in smart farming–a review," Agricultural Systems, vol. 153, pp. 69–80, 2017.
[142] V. Saiz-Rubio and F. Rovira-Más, "From smart farming towards agriculture 5.0: a review on crop data management," Agronomy, vol. 10, no. 2, p. 207, 2020.
[143] P. Tripicchio, M. Satler, G. Dabisias, E. Ruffaldi, and C. A. Avizzano, "Towards smart farming and sustainable agriculture with drones," in 2015 International Conference on Intelligent Environments. IEEE, 2015, pp. 140–143.
[144] M. R. Alam, M. B. I. Reaz, and M. A. M. Ali, "A review of smart homes-past, present, and future," IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part C (applications and reviews), vol. 42, no. 6, pp. 1190– 1203, 2012.
[145] N. Hassan, S. Gillani, E. Ahmed, I. Yaqoob, and M. Imran, "The role of edge computing in internet of things," IEEE communications magazine, vol. 56, no. 11, pp. 110–115, 2018. [146]
[146] I. M. Ali and M. I. Salman, "Sdn-assisted service placement for the iot based systems in multiple edge servers environment," Iraqi Journal of Science, pp. 1525–1540, 2020.
[147] S. Bi, R. Zhang, Z. Ding, and S. Cui, "Wireless communications in the era of big data," IEEE communications magazine, vol. 53, no. 10, pp. 190–199, 2015.
[148] W. Xu, H. Zhou, H. Wu, F. Lyu, N. Cheng, and X. Shen, "Intelligent link adaptation in 802.11 vehicular networks: Challenges and solutions," IEEE Communications Standards Magazine, vol. 3, no. 1, pp. 12–18, 2019.

[149] S. K. Sharma and X. Wang, “Toward massive machine type communications in ultra-dense cellular IoT networks: Current issues and machine learning-assisted solutions,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 1, pp. 426–471, 2019.
[150] M. Elsayed and M. Erol-Kantarci, “AI-enabled future wireless networks: Challenges, opportunities, and open issues,” IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 14, no. 3, pp. 70–77, 2019.
[151] L. Mohjazi, A. Zoha, L. Bariah, S. Muhaidat, P. C. Sofotasios, M. A. Imran, and O. A. Dobre, “An outlook on the interplay of artificial intelligence and software-defined metasurfaces: An overview of opportunities and limitations,” IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 15, no. 4, pp. 62–73, 2020.
[152] C. Liaskos, A. Tsioliaridou, S. Nie, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, “An interpretable neural network for configuring programmable wireless environments,” in 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). IEEE, 2019, pp. 1–5.
[153] M. A. Alsheikh, S. Lin, D. Niyato, and H.-P. Tan, “Machine learning in wireless sensor networks: Algorithms, strategies, and applications,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 1996– 2018, 2014.
[154] N. Kato, Z. M. Fadlullah, B. Mao, F. Tang, O. Akashi, T. Inoue, and K. Mizutani, “The deep learning vision for heterogeneous network traffic control: Proposal, challenges, and future perspective,” IEEE wireless communications, vol. 24, no. 3, pp. 146–153, 2016.
[155] T. Park, N. Abuzainab, and W. Saad, “Learning how to communicate in the internet of things: Finite resources and heterogeneity,” IEEE Access, vol. 4, pp. 7063–7073, 2016.
[156] N. C. Luong, D. T. Hoang, S. Gong, D. Niyato, P. Wang, Y.-C. Liang, and D. I. Kim, “Applications of deep reinforcement learning in communications and networking: A survey,” IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 4, pp. 3133–3174, 2019.
[157] A. Zappone, M. Di Renzo, and M. Debbah, “Wireless networks design in the era of deep learning: Model-based, ai-based, or both?” IEEE Transactions on Communications, vol. 67, no. 10, pp. 7331–7376, 2019.
[158] W. C. Y. Lee, (2001). Mobile communications engineering. New York, Mc-Graw-Hill.
[159] G. Fraidenraich and M. D. Yacoub, (2006). “The and fading distributions,” in Proc. IEEE Ninth International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications, 28-31 Aug. 2006, Manaus-Amazon, Brasil, pp. 16-20.
[160] P. C. Sofotasios, S. Freear, (2010). ”The Composite Fading Model”, IEEE International Conference in Wireless Information Technology and Systems (ICWITS ’10), Aug. 28 2010-Sept. 3 2010, Honolulu, HI, USA, vol. 2, pp. 872-877.
[161] P. C. Sofotasios, S. Freear,(2011). ”The Extreme Composite Distribution: A Physical Composite Fading Model”, IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC ’11), Cancun, Mexico, 28-31 March, 2011.
[162] A. Abdi and M. Kaveh, (1998). ” distribution: an appropriate substitute for Rayleigh-lognormal distribution in fading-shadowing wireless channels,” Electronics Letters, vol. 34, no. 9, pp. 851-852.

[163] P. S. Bithas, N. C. Sagias, P. T. Mathiopoulos, G. K. Karagiannidis, and A. A. Rontogiannis,(2006). "On the performance analysis of digital communications over Generalized-K fading channels," IEEE Communications Letters, vol. 5, no. 10, pp. 353-355.
[164] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik,, (2000). Table of Integrals, Series, and Products, 6th ed. New York: Academic Press.
[165] I. Trigui et.al.(2009). "Performance Analysis of Mobile Radio Systems over Composite Fading/Shadowing Channels with Co-located Interferences", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 8, no. 7 pp. 3449-3453.
[166] M. Stefanovic, et al, (2012). "The CCI Effect on System Performance in $k-\mu$ fading channels", Technics technologies education management, Vol. 7, no. 1, pp. 88-92.
[167] A. Abdi and M. Kaveh, (1999). "On the utility of the gamma PDF in modeling shadow fading (slow fading)," in Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC'99), 16-20 May 1999, Houston, USA vol. 3, pp. 2308-2312.
[168] The Wolfram Functions Site, 2012. [Online]. Available: http://functions.wolfram.com.
[169] V. S. Adamchik and O. I. Marichev,(1990). "The algorithm for calculating integrals of hypergeometric type functions and its realization in REDUCE system," in Proc. Intern. Conf. Symbolic Algebraic Computation, Tokyo, Japan, pp. 212-224.
[170] M. Stefanovic, D. Milovic, A. Mitic and M. Jakovljevic, (2008). "Performance analysis of system with selection combining over correlated Weibull fading channels in the presence of cochannel interference", AEU - International Journal of Electronics and Communications, Vol. 62, Issue 9, pp. 695-700.
[171] A. Panajotovic, M. Stefanovic, D. Draca, (2009). "Performance Analysis of System with Selection Combining over Correlated Rician Fading Channels in the Presence of Cochannel Interference", AEU – International Journal of Electronics and Communications, vol. 63, no. 12, pp. 1061-1066.
[172] I. Petrovic, M. Stefanovic, P. Spalevic, S. R. Panic, D. Stefanovic, (2011). "Outage Analysis Of Selection Diversity Over Rayleigh Fading Channels With Multiple Co-Channel Interferers", Telecommunication Systems, accepted for publication., DOI: 10.1007/s11235-011-9438-z.
[173] N. Sekulovic, M. Stefanovic, D. Denic, D. Aleksic,(2011). "Performance Analysis of SINR-Based Selection Diversity Over Correlated Rayleigh Fading Channels", IET Communications, , vol. 5, no. 2, pp. 127-134.
[174] Nadeem F., Kvicera V., Awan M., Leitgeb E., Muhammad S., Kandus G., *Weather effects on hybrid FSO/RF communication link,* IEEE J. Sel. Areas Commun. **27**(9), Dec., 2009, pp. 1687–1697.
[175] Wu H., Kavehrad M., *Availability evaluation of ground-to-air hybrid FSO/RF links*, Int. J. of Wir. Inf. Networks **14**(1), Mar., 2007, pp. 33–45.
[176] Nadeem F., Leitgeb E., Awan M., Kandus M., *FSO/RF hybrid network availability analysis under different weather condition*, Proc. 3rd Int. Conf. on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, Wales, UK, September, 2009, pp. 239–244.
[177] Shakir W.M.R., *On performance analysis of hybrid FSO/RF systems*, IET Communications 13(11), jun, 2019, pp. 1677-1684.
[178] Vishwakarma N., Swaminathan R., *Performance analysis of hybrid FSO/RF communication over generalized fading models*, Optics Communications 487, 2021, 126719.
[179] https://mathworld.wolfram.com

[180] Stanojević N., Banđur Đ., Mosurović L., P. Spalević P, S. Panić, *Exploring a novel turbulence model: the Chi-square/inverse Gamma approach for enhanced Free Space Optics (FSO) communication,* Optica Applicata 54(3), 2024, pp. 337-351.
[181] Amirabadi M.A., Vakili V.T., *Performance comparison of two novel relay-assisted hybrid FSO/RF communication systems*, 2019, IET Commun, pp.1551–1556.
[182] Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.A., Flannery B.P., *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
[183] Guillaume Larue, *AL Models for Digital Signal Processing in Future 6G-IoT Networks*, Institut Polytechnique de Paris, 2023.
[184] Aneeta Christopher, R. Hari Kishan, and P.V. Sudeep, *Image Reconstruction Using Deep Learning*, Department of Electronics and Communication Engineering, National Institute of Technology Calicut, Calicut, Kerala, India 2018.
[185] Liu Y., Wang Y., Shi H., A Convolutional Recurrent Neural Network-Based Machine Learning for Scene Text Recognition Application, Symmetry, 15 (2023), No. 4, 849:1-17.
[186] Droby A., Kurar Barakat B., Alaasam R., Madi B., Rabaev I., El Sana J., Text Line Extraction in Historical Documents Using Mask R-CNN, Signals, 3 (2022), No. 3, 535-549.
[187] Otsu N., A threshold selection method from gray-level histograms, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 9 (1979), No. 1, 62-66.
[188] Lombardi F., Marinai S., Deep Learning for Historical Document Analysis and Recognition—A Survey, Journal of Imaging. 6 (2020), No.10,110:1-30.
[189] Zuo H., Fan H., Blasch E, Ling H., Combining Convolutional and Recurrent Neural Networks for Human Skin Detection, IEEE Signal Processing Letters, 34 (2017), No. 3, 289-293.
[190] Vinotheni C., Lakshmana Pandian S., End-To-End Deep Learning-Based Tamil Handwritten Document Recognition and Classification Model, IEEE Access, 11 (2023), No. 1, 43195 – 43204.
[191] Jia W., Ma C., Sun L., Huo Q., Detecting Text Baselines in Historical Documents with Baseline Primitives, IEEE Access, 9 (2021), No. 1, 93672 – 93683.
[192] Droby A., Kurar Barakat B., Saabni R., Alaasam R., Madi B., El-Sana J., Understanding Unsupervised Deep Learning for Text Line Segmentation, Applied Sciences, 12 (2022), No. 19, 9528:1-24.

ZAHTEVI, TEHNOLOGIJE, APLIKACIJE, IZAZOVI I PRAVCI ISTRAŽIVANJA 6G BEŽIČNIH KOMUNIKACIONIH SISTEMA

ORIGINALITY REPORT

1 %
SIMILARITY INDEX

PRIMARY SOURCES

1	sites.google.com Internet	193 words — < 1%
2	fedorani.ni.ac.rs Internet	63 words — < 1%
3	infoteh.etf.ues.rs.ba Internet	27 words — < 1%
4	Dhinesh Kumar R., Suresh Chavhan. "Shift to 6G: Exploration on trends, vision, requirements, technologies, research, and standardization efforts", Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022 Crossref	22 words — < 1%
5	cn.chinausfocus.com Internet	13 words — < 1%
6	fedorabg.bg.ac.rs Internet	12 words — < 1%
7	www.ucalgary.ca Internet	10 words — < 1%
8	nardus.mpn.gov.rs Internet	9 words — < 1%

9	"6G Mobile Wireless Networks", Springer Science and Business Media LLC, 2021 Crossref	8 words — < 1%
10	Pooja Singh, Akash Agarwal, Preetam Kumar. "Navigating the 6G landscape: A systematic review of technology integration, implementation challenges, and strategic solutions", Computer Networks, 2025 Crossref	8 words — < 1%
11	dk.um.si Internet	8 words — < 1%
12	docplayer.net Internet	8 words — < 1%
13	docslib.org Internet	8 words — < 1%
14	fdocuments.us Internet	8 words — < 1%
15	repositorium.sdum.uminho.pt Internet	8 words — < 1%
16	www.mosaic-lab.org Internet	8 words — < 1%
17	"Machine Learning Algorithms for Signal and Image Processing", Wiley, 2022 Crossref	7 words — < 1%
18	Qusay F. Hassan. "Advances in the Internet of Things - Challenges, Solutions, and Emerging Technologies", CRC Press, 2025 Publications	7 words — < 1%

EXCLUDE QUOTES	ON	EXCLUDE SOURCES	OFF
EXCLUDE BIBLIOGRAPHY	ON	EXCLUDE MATCHES	OFF