

Saša Vujić

Unapređenje elektro-optičkih sistema za ranu detekciju dronova

 Singidunum University

Document Details

Submission ID

trn:oid::3117:608009504

Submission Date

Jul 15, 2026, 12:15 PM GMT+2

Download Date

Aug 26, 2026, 1:41 PM GMT+2

File Name

Sasa Vujic - Disertacija 2026-07-15 v32.docx

File Size

5.7 MB

128 Pages

35,941 Words

231,845 Characters

1% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Filtered from the Report

- Bibliography
- Quoted Text
- Cited Text

Top Sources

- 1%  Internet sources
- 1%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

1 Integrity Flag for Review

-  **Replaced Characters**
552 suspect characters on 56 pages
Letters are swapped with similar characters from another alphabet.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 1%  Internet sources
- 1%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	nardus.mpn.gov.rs	<1%
2	Publication	Lesaignoux, A., S. Fabre, X. Briottet, and A. Olioso. "Estimation of Soil Moisture Co...	<1%
3	Publication	Stanojev, Jovana. "Razvoj nehladenog Infracrvenog Detektora Na Bazi Olovo Sele...	<1%
4	Publication	Dimitrijević, Aleksandar M.. "RINGO-Arhitektura za Trodimenzionalnu Vizuelizacij...	<1%
5	Publication	Dragosavac, Miloš. "Analiza Poslovnih Performansi Bankarskog Sektora u Zemlja...	<1%
6	Internet	docplayer.net	<1%
7	Publication	Zajić, Goran J.. "Detekcija Promena Kadrova u Video Sekvenci Primenom Multifra...	<1%
8	Internet	zir.nsk.hr	<1%
9	Publication	Nosek, Tijana. "ЕКСПРЕСИВНИ ВИШЕЈЕЗИЧНИ СИНТЕТИЗАТОР ГОВОРА", Univer...	<1%
10	Internet	repo.ozs.unist.hr	<1%
11	Internet	www.blic.rs	<1%

12	Internet	www.coursehero.com	<1%
13	Internet	www.it.ac.me	<1%
14	Internet	www.mdpi.com	<1%
15	Publication	Damjanovic, Rade. "Komorbiditet u okviru grupe poremećaja sa nasilničkim ponU...	<1%
16	Publication	Unkašević, Tomislav B.. "Sinteza Jedne Klase Pouzdanih Kriptografskih Algoritam...	<1%
17	Publication	Zahovic, Ida. "Optimizacija Proizvodnje Ksantana Na Sirovom Glicerolu Primenom...	<1%
18	Internet	best.basu.ac.ir	<1%
19	Internet	bs.wikipedia.org	<1%
20	Internet	d21zja6o12zyp0.cloudfront.net	<1%
21	Internet	eteze.bg.ac.rs	<1%
22	Internet	machinery.mas.bg.ac.rs	<1%
23	Internet	megatrend.edu.rs	<1%
24	Internet	www.artf.ni.ac.rs	<1%
25	Internet	www.etf.bg.ac.rs	<1%

26	Internet	www.ictvesti.com	<1%
27	Internet	www.researchgate.net	<1%
28	Internet	www.sbir.gov	<1%
29	Publication	Ćirić, Tomislav I.. "Novi Pristupi u Modelovanju RF MEMS prekidača", University of...	<1%
30	Publication	Zhixi Li, Jun Chen, Jingjun Wu, Feng Tang, Wei Liu, Xin Ye, Liming Yang. "Opto-me...	<1%

1

UNIVERZITET SINGIDUNUM
DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE



DOKTORSKE AKADEMSKE STUDIJE

Studijski program: Inteligentno softversko inženjerstvo

DOKTORSKA DISERTACIJA

**Unapređenje elektro-optičkih sistema
za ranu detekciju dronova**

Mentor:
Prof. Dr Mladen Veinović

Doktorand:
Saša Vujić
Broj indeksa: 480097/2023

Beograd, 2026. godine

SINGIDUNUM UNIVERSITY
DEPARTMENT FOR POSTGRADUATE STUDIES



DOCTORAL ACADEMIC STUDIES

Study program: Intelligent Software Engineering

DOCTORAL DISSERTATION

**Enhancement of Electro-Optical Systems for
Early Drone Detection**

Supervisor:
Prof. Dr Mladen Veinović

PhD Candidate:
Saša Vujić
Student ID: 480097/2023

Belgrade, 2026.

1

PODACI O MENTORU, KOMENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

Mentor:

Prof. dr Mladen Veinović, redovni profesor
Univerzitet Singidunum

Komentor:

Dr Dragana Perić, naučni savetnik
Vlatacom Institut Beograd

1

Članovi komisije:

Prof. dr Mladen Veinović, mentor
Univerzitet Singidunum

Prof. dr Miljan Vučetić, član
Univerzitet Singidunum

Dr Dragana Perić, naučni savetnik, komentor
Vlatacom Institut Beograd

16

Dr Branko Kovačević, profesor emeritus, član
Univerzitet u Beogradu

1

Datum odbrane disertacije:

1

Zahvalnica

Zahvaljujem mentoru, prof. dr Mladenu Veinoviću, kao i komentoru dr Dragani Perić, na pruženoj podršci, strpljenju i usmeravanju tokom izrade ove doktorske disertacije. Njihovi stručni saveti, posvećenost i ohrabrenje bili su od presudnog značaja za moje istraživanje i sagledavanje problematike elektro-optičkih sistema.

Najveću zahvalnost dugujem Institutu Vlatacom, na čelu sa dr Vladimirom Cizeljom, koji me je podstakao, pružio priliku i omogućio resurse neophodne za istraživanja. Posebnu zahvalnost dugujem prof. dr Miloradu Obradoviću, general-potpukovniku u penziji, za savete i neprekidno bodrenje, kao i svim kolegama na izvanrednoj dugogodišnjoj saradnji. Naše konstruktivne diskusije, zajedničko rešavanje inženjerskih izazova i sjajan timski duh predstavljaju vrednost koja prevazilazi okvire ovog rada i kontinuirano doprinosi podizanju kvaliteta naših zajedničkih rešenja. Tu posebno ističem Aleksandra Simića, Branka Tomića, dr Iliju Popadića, Miloša Radisavljevića, Miloša Ninkovića, Nemanju Košanina, Marka Rosića, dr Miloša Pavlovića, dr Miroslava Perića i dr Srećka Nijemčevića.

Iako više nije među nama, neizbrisiv trag i veliki doprinos ovom radu dao je dr Branko Livada, na čemu sam mu beskrajno zahvalan.

25

Na kraju, zahvaljujem svojim roditeljima, bratu i prijateljima na dugogodišnjoj podršci. Najdublju zahvalnost, ipak, dugujem onima sa kojima delim sve životne radosti i izazove – supruzi, a iznad svega deci. Hvala vam na razumevanju i toleranciji za vreme i pažnju koje sam posvetio ovom radu, često na uštrb naših zajedničkih trenutaka. Vaša podrška je bila moj najveći oslonac i motivacija da istrajem i uspešno zaokružim ovo značajno poglavlje na svom profesionalnom putu.

*Posvećeno budućim pokolenjima,
deci Ane, Miloša i Jovane,
i njihovim potomcima*

Apstrakt

Multi-senzorski elektro-optički (EO) sistemi su sve prisutniji u raznim oblastima primene, uključujući nadzor i obezbeđenje granica, obale, važnih infrastrukturnih objekata i vojnu primenu. Jedna od sve važnijih primena je i u okviru sistema za borbu protiv dronova (C-UAV, engl. *Counter Unmanned Aerial Vehicle*) za rano otkrivanje dronova (UAV, engl. *Unmanned Aerial Vehicle*). Ovi sistemi se oslanjaju na prijem i obradu elektromagnetnog zračenja u optičkom delu spektra, uključujući i infracrveni, kako bi detektovali, pratili i identifikovali dronove, ali i odredili njihov tačan položaj u prostoru.

Međutim, performanse EO sistema mogu značajno da zavise od faktora kao što su uslovi okoline, karakteristike samog drona, ali i od dizajna i konfiguracije EO sistema. Da bi se optimizovale performanse EO sistema, neophodan je sveobuhvatan multidisciplinarni pristup dizajnu EO sistema, uključujući i efikasne strategije upravljanja, kao i analizu i eventualna unapređenja u dizajnu zaštitnih optičkih prozora.

Ova disertacija predlaže i implementira unapređenja elektro-optičkih sistema u cilju maksimizacije sposobnosti ranog otkrivanja, praćenja i identifikacije malih, niskoletjećih dronova. U radu je razvijena nova metoda adaptivnog upravljanja koja spaja prediktivno praćenje kretanja cilja sa dinamičkim prilagođavanjem vidnog polja (FOV) i determinističkom kontrolom fokusne ravni. Pored toga, sprovedena je analitička procena uticaja zaštitnih optičkih prozora na funkciju prenosa modulacije (MTF) i primenjen je dizajn koji minimizuje optičke gubitke i termalne efekte.

Sinergijski efekat ovih hardverskih i softverskih rešenja validiran je hibridnim modelovanjem i terenskim ispitivanjima. Simulaciono i eksperimentalno je potvrđeno povećanje efektivnog dometa detekcije za 40%, skraćanje vremena reakcije sistema za 60%, kao i značajno uvećanje verovatnoće ispravne klasifikacije cilja na velikim udaljenostima. Time je postignuta izuzetna robusnost i pouzdanost ovih sistema, čime se nudi direktno i efikasno rešenje za sve ozbiljnije savremene bezbednosne izazove u praksi.

Ključne reči: *elektro-optički sistemi, multisenzorski elektro-optički sistemi, upravljanje elektro-optičkim sistemima, dizajn elektro-optičkih sistema, zaštitni optički prozori, nadzor, detekcija, praćenje, identifikacija, klasifikacija, dronovi, domet, rana detekcija dronova.*

Naučna oblast: Elektrotehnika i računarstvo

Uža naučna oblast: Inteligentno softversko inženjerstvo

Abstract

Multi-sensor electro-optical (EO) systems are becoming increasingly prevalent in various fields of application, including border and coastal surveillance and security, the protection of critical infrastructure, and military applications. One of their increasingly important applications is within Counter-Unmanned Aerial Vehicle (C-UAV) systems for the early detection of drones (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs). These systems rely on receiving and processing electromagnetic radiation in the optical region of the spectrum, including the infrared, to detect, track, and identify drones, as well as to determine their precise spatial position.

However, the performance of EO systems can depend significantly on factors such as environmental conditions, the characteristics of the drone itself, and the overall design and configuration of the EO system. To optimize the performance of EO systems, a comprehensive multidisciplinary approach to EO system design is essential, including effective control strategies, as well as the analysis and potential enhancements in the design of protective optical windows.

This dissertation proposes and implements enhancements to electro-optical systems with the aim of maximizing the capabilities for early detection, tracking, and identification of small, low-altitude drones. The research develops a novel adaptive control method that combines predictive target motion tracking with dynamic field of view (FOV) adjustment and deterministic focal plane control. In addition, an analytical assessment of the impact of protective optical windows on the modulation transfer function (MTF) was conducted, applying a design that minimizes optical losses and thermal effects.

The synergistic effect of these hardware and software solutions was validated through hybrid modeling and field testing. It was confirmed, both through simulation and experimentally, that there is a 40% increase in the effective detection range, a 60% reduction in system reaction time, and a significant increase in the probability of correct target classification at long distances. Consequently, exceptional robustness and reliability of these systems have been achieved, offering a direct and effective solution to increasingly severe contemporary security challenges in practice.

Keywords: *electro-optical systems, multi-sensor electro-optical systems, electro-optical system control, electro-optical system design, protective optical windows, surveillance, detection, tracking, identification, classification, drones, range, early drone detection.*

Scientific Field: Electrical Engineering and Computer Science

Specific Scientific Field: Intelligent Software Engineering

Sadržaj

Zahvalnica	4
Apstrakt	6
Abstract	7
Sadržaj	8
Spisak slika	11
Spisak tabela	13
Spisak skraćenica, simbola i objašnjenje termina	14
1 Uvod	20
1.1 Vrste senzora i optičko zračenje	20
1.2 Identifikacija problema	21
1.3 Hipoteze i cilj	22
1.4 Struktura disertacije	23
2 Pregled oblasti	25
2.1 Elektro-optički senzori i detektori	29
2.2 Optički elementi u elektro-optičkim sistemima	30
2.3 Zaštitni optički prozori	31
2.3.1 Izazovi u dizajnu i selekciji materijala	32
2.3.2 Geometrijski parametri dizajna	36
2.3.3 Optički zahtevi	37
2.3.4 Mehanički i termički zahtevi	37
2.3.5 EMI/EMC zahtevi (Elektromagnetna zaštita)	38
2.3.6 Integracija i montaža	38
2.4 Obrada signala	38
2.5 Stabilizacija optičke ose	39
2.6 Algoritmi za praćenje	40
2.7 Fuzija podataka	41
2.8 Kalibracija i standardizacija	44
2.9 Otpornost na smetnje	45
2.10 Optimizacija sistema	47
2.11 Veštačka inteligencija (mašinsko učenje)	48
3 Predmet istraživanja	50
3.1 Opis problema	51

3.2	Metodologija istraživanja.....	54
3.3	Predloženo rešenje	55
3.4	Očekivani rezultati	56
4	Predlog unapređenja elektro-optičkih sistema.....	57
4.1	Nova metoda upravljanja.....	57
4.1.1	Izvođenje matematičkog modela kinematičke stabilnosti pri naglom pokretanju drona (Cold-Start Scenario)	62
4.1.2	Analiza uticaja visokih vremenskih konstanti na performanse sistema.....	67
4.1.3	Komparativna analiza dinamike upravljanja: Konvencionalni PID regulator nasuprot predloženom stohastičkom estimatoru	71
4.2	Dizajn zaštitnih optičkih prozora.....	73
4.2.1	Metodologija analitičke procene optičkih performansi.	77
4.2.2	Optimizacija propustljivosti prozora primenom antirefleksionih (AR) premaza.....	86
4.2.3	Erozija površine i verifikacija izdržljivosti prozora	90
4.2.4	Termalni efekti, aerodinamičko zagrevanje i mehanizmi degradacije signala	91
4.2.5	Uticaj kvaliteta obrade površine zaštitnog prozora na degradaciju MTF-a.....	94
4.2.6	Optomehanička integracija i uticaj montažnog stresa na performanse sistema	95
4.2.7	Zaključna razmatranja o izboru materijala i dizajnu zaštitnih prozora.....	97
4.2.8	Digitalna kompenzacija optičkih aberacija i obnova Modulacione prenosne funkcije (MTF)	98
4.3	Integracija rešenja.....	99
4.3.1	Analiza toka informacija u integrisanom elektro-optičkom sistemu:.....	100
4.3.2	Primer praktične primene: Presretanje brzog manevarskog cilja	100
4.3.3	Sinergijski efekat unapređenja i procena ukupnih performansi	101
4.3.4	Metodologija hibridne kvantitativne procene performansi.....	101
4.3.5	Analiza rezultata i taktičke implikacije:	102
4.3.6	Diskusija o potencijalnim rizicima implementacije i strategijama ublažavanja	103
4.4	Zaključna razmatranja o predloženim unapređenjima	104
5	Praktičan primer i eksperimentalna verifikacija rezultata	106
5.1	Postavka eksperimenta.....	106
5.2	Metodologija terenskog ispitivanja	108
5.3	Rezultati verifikacije	109
5.4	Diskusija	111
6	Mogućnosti primene.....	114
6.1	Sistemi za obezbeđenje obalskog pojasa i pomorskog saobraćaja	114
6.2	Zaštita kritične infrastrukture	115

6.3	Integracija u mobilne platforme	116
6.4	Navođenje sistema za neutralizaciju (efektora) u vojnim primenama	117
7	Pravci daljeg razvoja	119
7.1	Integracija sa naprednijim AI modelima:	119
7.2	Primena meta-sočiva i novih optičkih materijala:.....	119
7.3	Dalje usavršavanje algoritama fuzije podataka:	119
7.4	Modifikovanje sistema u skladu sa razvojem tehnologije senzora veće rezolucije.....	120
7.5	Modifikovanje sistema u skladu sa razvojem tehnologije upravljanja pan-tilt pozicionerima	120
8	Zaključak.....	121
9	Literatura	124

Spisak slika

Slika 1 - Model EO sistema sa više senzora, zeleni i plavi blokovi - komponente EO sistema na čije karakteristike možemo da utičemo tokom dizajniranja i korišćenja EO sistema.....	25
Slika 2 - Arhitektura glave multisenzorskog EO sistema (engl. MSIS head)	25
Slika 3 - Model EO sistema sa više senzora u kom je naglašena AI komponenta, levo u okviru bloka 'PC with SW App', desno u okviru bloka 'MSIS Head with AI'	26
Slika 4 – Blok shema jednog video kanala glave multisenzorskog EO sistema (MSIS head).....	27
Slika 5 - Primer MTF merenja-a termalnog video kanala EO sistema.....	28
Slika 6 – Primer fuzije slike sa dva video kanala multisenzorskog EO sistema (MSIS head), gore levo kolor video kanal, gore desno termalni video kanal, dole slika posle fuzije.....	43
Slika 7 – Shematski prikaz EO sistema i posmatranog drona u horizontalnoj ravni, v_h - vektor brzine kretanja drona, v_{ho} - projekcija na osu usmerenu ka EO sistemu, v_{hn} – projekcija na normalu na tu osu, i dFR – udaljenost fokusne ravni, udaljenost drona.....	50
Slika 8 – Primeri slika sa termalnog video kanala posmatranja iste scene sa različitim vidnim uglovima, od širokog, gore levo, do uskog, dole desno	53
Slika 9 – Dijagram toka algoritma za adaptivno upravljanje vidnim poljem (FOV) i fokusom	58
Slika 10 – Blok šema arhitekture sistema	58
Slika 11 - Maksimalna linearna brzina drona (V_{max}) za uspešan zahvat drona, pri vrednostima parametara: $\alpha_{gimbal} = 600^\circ/s^2$, $t_{lat} = 250$ ms.	67
Slika 12 – Ciklus iterativne povratne sprege klasičnih autofokus algoritama	70
Slika 13 – Prikaz adaptivne promene parametara, gore - A) Dinamika greške praćenja tokom manevra, i dole - B) Adaptacija vidnog polja	72
Slika 14 – Grafik zavisnosti transmisije od debljine prozora u LWIR opsegu za Germanijum (Ge), ZnS i Safir (Al_2O_3)	76
Slika 15 – Grafik zavisnosti transmisije od debljine prozora u MWIR opsegu za Germanijum (Ge), ZnS i Safir (Al_2O_3)	76
Slika 16 – Šematski prikaz prolaska zraka kroz planparalelnu ploču (prozor). Prikazan je upadni zrak, prelamanje unutar prozora i izlazni zrak, sa označenim pomerajem fokusa u odnosu na situaciju bez prozora.....	77
Slika 17 – Upporedna analiza uticaja debljine plan-paralelnog prozora na optičke performanse sistema, za Germanijum ($n \approx 4$) i ZnS ($n \approx 2.2$).	83
Slika 18 – Rezultati simulacije MTF degradacije za prozor od ZnS. Prikazana je familija krivih koje pokazuju pad MTF-a na Nyquistovoj frekvenciji u zavisnosti od ugla upada zraka (θ) za različite debljine prozora (t).	84
Slika 19 – Grafik spektralne transmisije. Osa X predstavlja talasnu dužinu (u mikrometrima), osa Y procenat transmisije. Krive prikazuju karakteristike odabranih materijala (multispektralni ZnS, standardni ZnS, Safir i Germanijum), sa primenjenim AR premazima , kroz VIS, SWIR, MWIR i LWIR opsege spektra.	88
Slika 20 – Šematski prikaz poprečnog preseka optičkog prozora sa premazima. Prikazana struktura osigurava maksimalnu transmisiju uz visoku mehaničku zaštitu kombinacijom unutrašnjih višeslojnih AR premaza i spoljašnjeg hibridnog DLC sloja koji služi i kao antirefleksni i kao mehanički zaštitni sloj visoke tvrdoće.....	90

Slika 21 – Grafik spektralne transmisije. Osa X predstavlja talasnu dužinu (u mikrometrima), osa Y procenat transmisije. Krive prikazuju karakteristike odabranih materijala (multispektralni ZnS, standardni ZnS, Safir i Germanijum), bez primenjenih AR premaza , kroz VIS, SWIR, MWIR i LWIR opsege spektra.	93
Slika 22 – Konceptualni dijagram integrisanog sistema. Prikazani su tok signala od cilja kroz zaštitni prozor i elektro-optički (EO) senzor, sekvence digitalnog procesiranja slike i ekstrakcije podataka (Tracker), sve do algoritma upravljanja koji vrši korekciju izvršnih organa (gimbal i objektiv).....	99
Slika 23 – Eksperimentalna postavka multisenzorskog EO sistema tokom stacionarnih terenskih merenja.	107
Slika 24 – Fotografija komercijalne bespilotne letelice (drona) korišćene u eksperimentu – DJI Mini 4 Pro.	107
Slika 25 – Fotografije sa uporednim prikazom drona zabeležene sa VIS i MWIR kanalima.....	110
Slika 26 – Uporedni prikaz teorijskog i empirijskog broja linearnih piksela na meti (POT1D) na različitim referentnim udaljenostima za VIS i MWIR posmatračke kanale (Napomena: Pune linije označavaju teorijske proračune; isprekidane linije predstavljaju empirijska merenja).....	111
Slika 27 – Relativno procentualno odstupanje između teorijskog i empirijskog broja linearnih piksela na meti (POT1D).	112

Spisak tabela

Tabela 1 – Pregled različitih materijala za delove optičkog spektra od VIS do LWIR, kao i širokopojasni	32
Tabela 2 – pregled osobina različitih tipova premaza, i to za standardni AR (engl. BBAR – BroadBand Anti-Reflective), DLC (engl. Diamond-Like Carbon), i visoko-otporni AR (engl. HDAR – High-Durability Anti-Reflective).	35
Tabela 3 – Pregled refleksije i emisivnosti različitih materijala za delove optičkog spektra od VIS do LWIR.....	51
Tabela 4 – Analiza graničnih performansi sistema za $t_{lat} = 250$ ms i $HFOV = 8^\circ$	66
Tabela 5 – Maksimalna linearna brzina drona (V_{max}) za uspešan zahvat drona, pri vrednostima parametara: $\alpha_{gimbal} = 600^\circ/s^2$, $t_{lat} = 250$ ms.	66
Tabela 6 – Pregledno poređenje predloženog determinističkog pristupa sa klasičnim pasivnim pristupom.	69
Tabela 7 – Uticaj debljine prozora od Germanijuma ($n \approx 4$) na MTF i pomeraj fokusne ravni.	80
Tabela 8 – Uticaj debljine prozora od ZnS ($n \approx 2.2$) na MTF i pomeraj fokusne ravni.....	81
Tabela 9 – Uporedni prikaz ključnih optičkih i mehaničkih karakteristika razmatranih materijala	85
Tabela 10 – Procena poboljšanja performansi za cilj površine ~ 0.03 m ²	102
Tabela 11 – Izračunate teorijske vrednosti PoT za VIS i MWIR kanale pri maksimalnoj fokalnoj dužini (za karakterističnu dimenziju drona $W = 0.18$ m).....	109
Tabela 12 – Empirijske PoT vrednosti ekstrahovane za VIS i MWIR kanale pri maksimalnoj fokalnoj dužini.	110

Spisak skraćenica, simbola i objašnjenje termina

1. Antirefleksivni premaz (AR – Anti-Reflective coating):

- **Definicija:** Tanak višeslojni dielektrični film koji se deponuje na granične površine optičkih elemenata (prozora i sočiva) radi poništavanja reflektovanih talasa putem destruktivne interferencije.
- **Značaj:** Tehnološki imperativ za maksimizaciju optičke propustljivosti (transmisije) i eliminaciju Frenelovih gubitaka, naročito kod infracrvenih materijala sa visokim indeksom prelamanja (poput germanijuma i ZnS-a).

2. Bepilotna letelica (UAV – Unmanned Aerial Vehicle):

- **Definicija:** Letelica bez ljudske posade koja se kontroliše daljinski ili leti autonomno na osnovu unapred programirane rute (kolokvijalno: dron).
- **Značaj:** Predstavlja primarni cilj (metu) čija se rana detekcija, stabilno praćenje i uspešna klasifikacija optimizuju razvojem metoda u okviru ovog istraživanja.

3. Borba protiv bespilotnih letelica (C-UAV – Counter Unmanned Aerial Vehicle):

- **Definicija:** Skup taktičkih doktrina, senzorskih mreža i izvršnih sistema (efektora) namenjenih detekciji, praćenju i neutralizaciji neovlašćenih dronova.
- **Značaj:** Širi sistemski okvir i krajnja operativna namena unapređenog EO sistema razvijenog u disertaciji.

4. Dijamantu sličan ugljenik (DLC – Diamond-Like Carbon):

- **Definicija:** Ekstremno tvrd, amorfni sloj ugljenika koji se deponuje na spoljašnju površinu optičkih prozora (npr. ZnS ili Ge).
- **Značaj:** Deluje kao visokoefikasan anti-refleksivni premaz u infracrvenom delu spektra, a istovremeno štiti meke IR materijale od abrazije peskom i kišom pri velikim brzinama.

5. Dugo-talasno infracrveno zračenje (LWIR – Long Wavelength Infrared) [μm]:

- **Definicija:** Deo elektromagnetnog spektra, okvirno od 8 μm do 14 μm , u kojem dominira toplotna emisija objekata na temperaturama bliskim sobnoj.
- **Značaj:** Presudan opseg za noćnu detekciju dronova, otporan na dim i atmosfersku izmaglicu, u kojem rade ne-hlađene i napredne hlađene termovizijske kamere.

6. Elektro-optički sistem (EO sistem):

- **Definicija:** Sistem koji konvertuje optičko zračenje (fotone) u elektronski signal radi formiranja slike (obuhvata VIS, SWIR, MWIR i LWIR kamere, lasere i elektroniku).
- **Značaj:** Predstavlja osnovnu hardversku celinu koja je predmet analize i unapređenja u ovoj disertaciji.

7. Funkcija prenosa modulacije (MTF – Modulation Transfer Function) [% ili lp/mm]:

- **Definicija:** Kvantitativna mera sposobnosti optičkog sistema da verno prenese mikrokontrast sa posmatranog objekta na fokalnu ravan detektora pri različitim prostornim frekvencijama.
- **Značaj:** Glavni indikator oštrote slike. Pad MTF-a usled debljine prozora ili termalnih efekata direktno narušava sposobnost AI algoritama da prepoznaju fine ivice drona.

8. Gimbal (Višeosni pozicioner / Žiroskopski stabilisana platforma):

- **Definicija:** Elektro-mehanički sklop, opremljen preciznim motorima i inercijalnim senzorima, koji omogućava nezavisnu rotaciju integrisanog tereta (senzorske glave) oko dve ili više osa (azimut i elevacija).
- **Značaj:** Predstavlja ključni izvršni organ elektro-optičkog sistema zadužen za izolaciju optičkih senzora od mehaničkih vibracija nosača, prostorno usmeravanje i održavanje kinematičke stabilnosti vidne ose (LoS) prilikom praćenja visoko-manevarskih ciljeva.

9. Indeks prelamanja (n) [bezdimenziona veličina]:

- **Definicija:** Fizičko svojstvo optičkog materijala (npr. germanijum, ZnS, safir) koje opisuje koliko se brzina svetlosti smanjuje, odnosno koliko se zrak prelama pri prolasku kroz njega.
- **Značaj:** Visok indeks prelamanja (npr. kod germanijuma $n \approx 4$) izaziva veliku sfernu aberaciju, veliki pomeraj fokusa i visoke gubitke usled Fresnelove refleksije.

10. Kalmanov filter (KF – Kalman Filter):

- **Definicija:** Matematički algoritam koji koristi seriju merenja tokom vremena (koja sadrže šum i netačnosti) radi kreiranja preciznije procene nepoznatih varijabli (pozicije i brzine cilja).
- **Značaj:** Ključna komponenta predloženog prediktivnog adaptivnog algoritma koja omogućava rano i uspešno sužavanje vidnog polja (FOV) pre naglih manevara drona.

11. Konvolucione neuronske mreže (CNN – Convolutional Neural Networks):

- **Definicija:** Klasa dubokih neuronskih mreža (AI) specifično dizajnirana za analizu i ekstrakciju vizuelnih karakteristika iz digitalnih slika.
- **Značaj:** Algoritmi zaduženi za automatsku detekciju i klasifikaciju drona iz video-strima, čija uspešnost direktno zavisi od kvaliteta slike, odnosno broja piksela na meti (PoT).

12. Kratkotalasno infracrveno zračenje (SWIR – Short Wavelength Infrared) [μm]:

- **Definicija:** Deo elektromagnetnog spektra, okvirno od 1 μm do 3 μm (najčešće od 0.9 μm do 1.7 μm u komercijalnoj primeni), u kojem zračenje primarno potiče od refleksije svetlosti (npr. sjaj noćnog neba), a ne od sopstvene toplotne emisije objekta.

- **Značaj:** Posедуje јединствену sposobnost prolaska kroz dim, maglu i morsku izmaglicu (engl. haze), što ga čini ključnim za identifikaciju ciljeva u otežanim atmosferskim uslovima, uz laku koaksijalnu integraciju sa laserskim daljinomerima.

13. Krug najmanje difuzije (R_c) [mm]:

- **Definicija:** Radijus poprečnog preseka snopa svetlosti u tački duž optičke ose gde je transversalna sferna aberacija svedena na minimum (optimalna fokalna ravan).
- **Značaj:** Predstavlja fizički limit oštine slike. Ukoliko je krug najmanje difuzije veći od dimenzije jednog piksela na FPA senzoru, sistem gubi sposobnost razdvajanja finih detalja.

14. Laserski daljinomer (LRF – Laser Range Finder):

- **Definicija:** Aktivan elektro-optički senzor koji emituje laserske impulse (najčešće u SWIR opsegu) i meri vreme povratka reflektovanog zračenja radi izračunavanja tačne udaljenosti objekta.
- **Značaj:** Daje ključni telemetrijski podatak neophodan za uspešno funkcionisanje predloženog determinističkog algoritma za upravljanje fokusom u otvorenoj petlji.

15. Limit ugaone brzine (ω_{start}) [$^{\circ}/s$]:

- **Definicija:** To je najveća ugaona brzina kojom se dron može kretati u trenutku detekcije, pri kojoj se održava praćenje, za zadati vidni ugao.
- **Značaj:** Predstavlja prag izdržljivosti sistema. Ako dron ima veću ugaonu brzinu (u odnosu na EO sistem) od ove vrednosti, dron će napustiti ivicu ekrana pre nego što gimbal uspe da kompenzuje kašnjenje u obradi slike.

16. Longitudinalna sferna aberacija (LSA) [mm]:

- **Definicija:** Optička aberacija pri kojoj ivični zraci u konvergentnom snopu prolaze kroz prozor pod većim uglom od paraksijalnih zraka, prelamaju se drugačije i seku optičku osu na različitim mestima.
- **Značaj:** Matematički objašnjava zašto umetanje zaštitnog prozora razmazuje fokalnu tačku. Služi kao osnova za izračunavanje pada MTF-a.

17. Longitudinalni pomeraj fokusa (Δf) [mm]:

- **Definicija:** Fizičko pomeranje idealne tačke fokusa duž optičke ose u smeru prostiranja svetlosti, izazvano prelamanjem zraka pri prolasku kroz umetnutu planparalelnu ploču (zaštitni prozor).
- **Značaj:** Parametar koji se u predloženom determinističkom algoritmu mora unapred egzaktno izračunati i mehanički kompenzovati pomeranjem sočiva, kako bi se zadržala oština slike bez upotrebe sporog pasivnog autofokusa.

18. Maks. linearna brzina (V_{max}) [km/h]:

- **Definicija:** Ista vrednost kao prethodna, ali konvertovana u kilometre na čas ($m/s * 3.6$).

- **Značaj:** Koristi se radi lakše korelacije sa komercijalnim specifikacijama dronova. Na primer, ako je limit 36 km/h, to jasno ukazuje da sistem ne može da prati dron koji leti u "Sport" modu na toj udaljenosti.

19. Maks. linearna brzina (V_{max}) [m/s]:

- **Definicija:** Maksimalna stvarna brzina drona u prostoru (npr. očitana sa GPS-a drona) koja odgovara gorepomenutom limitu ω_{start} na određenoj udaljenosti.
- **Značaj:** Govori nam koliko brz dron smemo da očekujemo u zoni operacija. Izražava se u metrima u sekundi što je standard u fizici i kinematici.

20. Maksimalno ugaono ubrzanje gimbala (α_{gimbal}) [$^{\circ}/s^2$]:

- **Definicija:** Najveće ubrzanje koje servo-motori gimbala mogu da primene na optičku osu sistema kako bi savladali sopstvenu inerciju.
- **Značaj:** Ključni parametar za sustizanje drona pri naglim manevrima (tzv. "Cold-Start" scenario). Što je veće ubrzanje, sistem se brže stabilizuje na novoj putanji cilja.

21. Matrica fokalne ravni (FPA – Focal Plane Array):

- **Definicija:** Dvodimenzionalna rešetka fotoosetljivih ili termalno osetljivih piksela smeštena u fokalnoj ravni optičkog sistema (objektiva).
- **Značaj:** Predstavlja osnov savremenih EO senzora na koje se direktno projektuje optička slika cilja, a čije fizičke dimenzije i gustina piksela diktiraju Nyquistovu frekvenciju celog sistema.

22. Numerička apertura (NA) [bezdimeziona veličina]:

- **Definicija:** Mera sposobnosti optičkog sistema da prikuplja svetlost i razdvaja fine detalje, obrnuto proporcionalna f-broju objektiva ($f/\#$).
- **Značaj:** Ključni parametar u proračunu longitudinalne sferne aberacije; veća numerička apertura eksponencijalno povećava osetljivost sistema na aberacije koje unosi zaštitni prozor.

23. Odnos signal-šum (SNR – Signal to Noise Ratio) [dB]:

- **Definicija:** Odnos nivoa snage korisnog toplotnog ili vizuelnog potpisa (drona) i nivoa pozadinskog šuma (atmosfera, termalne emisije samog prozora i elektronike).
- **Značaj:** Presudan parametar za efikasnost softverskih filtera. Nizak SNR generiše lažne alarme u sistemima automatskog praćenja.

24. PID regulator (Proporcionalno-integralno-diferencijalni):

- **Definicija:** Standardni algoritam upravljanja u zatvorenoj petlji (reaktivna paradigma) koji izračunava trenutnu grešku praćenja i primenjuje korekciju na aktuatoru.
- **Značaj:** U disertaciji predstavlja referentni (konvencionalni) industrijski model čija su ograničenja, usled transportnog kašnjenja i oscilacija, prevaziđena implementacijom predloženog prediktivnog stohastičkog estimatora.

25. Píksel na meti (PoT – Pixel on Target) [px]:

- **Definicija:** Broj píksela koji projekcija cilja (drona) zauzima na fokalnoj ravni detektora.
- **Značaj:** Predstavlja osnovni kriterijum (analogno Džonsonovim kriterijumima) za uspešnost sistema. Određuje da li algoritam može samo da detektuje objekat (npr. 3-4 px) ili da ga sa sigurnošću klasifikuje i identifikuje (npr. >10 px).

26. Procesor signala slike (ISP – Image Signal Processor):

- **Definicija:** Namenski hardverski ili softverski modul koji obrađuje sirovu digitalnu sliku sa senzora pre njenog slanja algoritmu za praćenje ili operateru.
- **Značaj:** U ovom modulu se primenjuju algoritmi za dekonvoluciju i pooštavanje ivica koji digitalno kompenzuju optičke degradacije izazvane prozorom (obnova MTF-a).

27. Srednje-talasno infracrveno zračenje (MWIR – Mid Wavelength Infrared) [μm]:

- **Definicija:** Deo elektromagnetnog spektra, okvirno od 3 μm do 5 μm, u kojem se registruje toplotna emisija objekata viših temperatura (poput motora dronova i izduvnih gasova), uz delimično prisustvo reflektovanog zračenja.
- **Značaj:** Obezbeđuje višu prostornu rezoluciju na velikim udaljenostima (usled manje difrakcione mrlje u poređenju sa LWIR opsegom) i predstavlja optimalan izbor za hladene termovizijske senzore visoke osetljivosti.

28. Transverzalna sferna aberacija (TSA) [mm]:

- **Definicija:** Fizički prečnik difuzne mrlje na površini senzora, nastao usled neidealnog prelamanja ivičnih zraka kroz optički element (zaštitni prozor), što predstavlja preslikavanje longitudinalne aberacije (LSA) na fokalnu ravan.
- **Značaj:** Kvantifikuje stepen "razmazanosti" fokalne tačke i direktno je odgovorna za pad MTF-a na visokim prostornim frekvencijama.

29. Trenutno vidno polje (IFOV – Instantaneous Field of View) [μrad]:

- **Definicija:** Ugao koji u prostoru pokriva jedan pojedinačni píksel na matrici fokalne ravni (FPA) kroz dati optički sistem.
- **Značaj:** Direktno određuje graničnu teorijsku prostornu rezoluciju sistema i koristi se kao osnova za izračunavanje očekivanog broja píksela na meti (PoT) na zadatoj udaljenosti u eksperimentalnom delu disertacije.

30. Ukupna latencija sistema (tlat) [ms ili s]:

- **Definicija:** Vreme koje protekne od trenutka pojave u posmatranoj sceni, hvatanja slike na senzoru, preko digitalne obrade i računanja greške u algoritmu, do trenutka fizičke reakcije motora gimbala.
- **Značaj:** Fundamentalno ograničava dinamičke performanse sistema. Veća latencija direktno smanjuje gornju granicu ugaone brzine drona koju sistem može usmereno da prati.

31. Ukupno integrisano rasejanje (TIS – Total Integrated Scatter) [%]:

- **Definicija:** Količina svetlosne energije koja se rasipa izvan glavnog optičkog snopa usled mikroskopskih neravnina i hrapavosti na površini optičkog elementa.
- **Značaj:** Kvantifikuje degradaciju slike usled mikromehaničkih udara i erozije zaštitnog prozora (kiša, pesak), što dovodi do formiranja difuznog "vela" i drastičnog pada MTF-a.

32. Vidljivo zračenje (VIS – Visible) [μm ili nm]:

- **Definicija:** Deo elektromagnetnog spektra, okvirno od $0.4 \mu\text{m}$ do $0.7 \mu\text{m}$, na koji je osetljivo ljudsko oko i koji formira sliku isključivo na osnovu refleksije ambijentalne svetlosti.
- **Značaj:** Referentni optički kanal zadužen za dnevnu detekciju, koji pruža sliku najviše rezolucije i prirodnog kontrasta u uslovima dobre vidljivosti.

33. Vidno polje (FOV – Field of View) [°]:

- **Definicija:** Ugaoni opseg prostora koji elektro-optički senzor u određenom trenutku može da snimi (često se posmatra samo horizontalna komponenta – HFOV).
- **Značaj:** Utiče na inženjerski kompromis sistema. Šire vidno polje olakšava zadržavanje dinamičnog cilja u kadru, ali smanjuje PoT rezoluciju, dok uže vidno polje maksimizuje domet na račun stabilnosti praćenja.

1 Uvod

Upotreba dronova (UAV, engl. *Unmanned Aerial Vehicle*) je u konstantnom porastu za različite primene. Njihova široka rasprostranjenost ne samo u vojnoj, već i u industrijskoj i ličnoj primeni, dovela je do mogućnosti lake zloupotrebe čime su dronovi postali značajne pretnje civilnim objektima, poput važnih infrastrukturnih objekata, ili događajima na kojima se okuplja veliki broj ljudi. Samim tim sve je veća potreba za složenim sistemima koji će uspešno odgovoriti takvim izazovima.

Složeni sistemi za borbu protiv dronova (C-UAV, engl. *Counter UAV*) se sastoje od podсистema za otkrivanje pretnji, odnosno dronova, i podсистema za neutralizaciju pretnji [1, 2]. U okviru ove disertacije neće se posebna pažnja posvetiti načinima za neutralizaciju pretnji, a do sada poznati pristupi za neutralizaciju dronova opisani su u literaturi [1, 2]. Dakle, u ovoj disertaciji pažnja će biti posvećena podсистemu u okviru C-UAV sistema koji se odnosi na otkrivanje pretnji, odnosno dronova, sa akcentom na detekciju, praćenje, identifikaciju i određivanje tačnog položaja u prostoru malih, niskoletućih dronova. Od vrste pretnji zavisice i realizacija ovog podсистema, ali u svakom slučaju osnovni zadatak ovog podсистema je da za što kraće vreme uspešno detektuje i klasifikuje objekat kao pretnju, uz što veću tačnost i robusnost EO sistema.

1.1 Vrste senzora i optičko zračenje

Sistemi za rano otkrivanje dronova obično obuhvataju različite tipove senzora koji rade u sinergiji i gde svaki od različitih tipova senzora koristi drugačije fizičke principe za detekciju dronova. Uglavnom su to aktivni i pasivni senzori na bazi elektromagnetnog zračenja, ali koriste se i senzori na bazi zvučnih talasa, odnosno akustički senzori. Što se tiče senzora koji funkcionišu na bazi elektromagnetnog zračenja, imamo različite tipove aktivnih i pasivnih radara koji rade u različitim frekventnim opsezima, pasivne senzore koji detektuju radio emisiju, takođe u različitim frekventnim opsezima, i pasivne i aktivne elektro-optičke (EO) sisteme koji rade na bazi elektromagnetnog zračenja u optičkom delu spektra [1, 2].

Elektromagnetno zračenje u optičkom delu spektra, ili optičko zračenje, je elektro-magnetno zračenje koje obuhvata spektar talasnih dužina okvirno od 100 nm do 1000 μ m, što odgovara učestanostima elektromagnetnih talasa od 300 GHz do 3000 THz. Optičko zračenje obuhvata ultraljubičasto (UV, engl. *Ultraviolet*) zračenje koje obuhvata spektar talasnih dužina od 100 nm do 400 nm, zatim ljudima vidljivo (VIS, engl. *Visible*) zračenje koje obuhvata spektar talasnih dužina od 400 nm do 700 nm, i infracrveno (IR, engl. *Infrared*) zračenje koje obuhvata spektar talasnih dužina od 700 nm do 1000 μ m. IR zračenje nije vidljivo ljudskom oku i obično se deli na infracrveno zračenje blisko vidljivom (NIR, engl. *Near Infrared*), sa talasnim dužinama

okvirno od 700 nm do 1000 nm, kratko-talasno infracrveno zračenje (SWIR, engl. *Short Wavelength Infrared*), sa talasnim dužinama od okvirno 1000 nm do 2500 nm, srednje-talasno infracrveno zračenje (MWIR, engl. *Mid Wavelength Infrared*), sa talasnim dužinama od okvirno 3 μm do 5 μm , dugo-talasno infracrveno zračenje (LWIR, engl. *Long Wavelength Infrared*), sa talasnim dužinama od okvirno 8 μm do 14 μm , i daleko infracrveno zračenje (FIR, engl. *Far Infrared*), sa većim talasnim dužinama sve do nekih 1000 μm .

U ovoj disertaciji akcenat će biti na VIS, NIR, SWIR, MWIR i LWIR optičkom zračenju, odnosno na EO sistemima koji rade na bazi zračenja u tim delovima elektromagnetnog spektra. Zračenje u VIS, NIR i SWIR opsezima je po prirodi refleksivno, dok je zračenje u MWIR i LWIR opsegu po prirodi dominantno emisiono. Da bi EO sistemi bili efikasni, odnosno da bi njihova performansa bila što bolja, potrebno je njihovom dizajnu pristupiti sveobuhvatno kroz multidisciplinarni pristup u okviru kog svim aspektima treba posvetiti punu pažnju.

1.2 Identifikacija problema

Performanse elektro-optičkih (EO) sistema za detekciju dronova zavise od složene interakcije mnogih faktora, čija sinergija u realnim uslovima eksploatacije često dovodi do značajne degradacije rezultata u odnosu na teoretska predviđanja. Izazovi su višestruki i mogu se grupisati u nekoliko ključnih kategorija.

Prvo, inherentne karakteristike samih dronova predstavljaju ozbiljnu prepreku. Radi se o ciljevima male efektivne veličine, što direktno rezultuje malim brojem piksela na meti (PoT, engl. *Pixel on Target*) kada se posmatraju sa većih udaljenosti. Nedovoljan broj piksela onemogućava primenu naprednih algoritama za klasifikaciju i identifikaciju, svodeći sistem na puku detekciju tačkastog objekta bez mogućnosti procene nivoa pretnje. Dodatno, dronovi poseduju izuzetno promenljivu dinamiku kretanja; sposobni su za lebdenje u mestu, ali i za nagla ubrzanja i promene vektora brzine u tri dimenzije. Ovakvo ponašanje postavlja ekstremne zahteve pred servo-mehanizme gimballa i algoritme za predikciju kretanja. Sve ovo se odvija u uslovima smetnji iz okoline, gde atmosferski uticaji (magla, kiša, termalna isparenja) i kompleksna pozadina (klater) drastično smanjuju kontrast i odnos signal-šum.

Drugo, postoji fundamentalni inženjerski kompromis u dizajnu optike između širine vidnog polja (engl. *FOV – Field of View*) i dometa. Široko vidno polje je neophodno za inicijalnu pretragu prostora i "hvatanje" drona nakon prijema podataka sa eksternih senzora (npr. radara), kako bi se kompenzovale greške u navođenju i latencija sistema. Međutim, široko vidno polje daje malo optičko uvećanje, što znači mali domet detekcije i nedovoljnu rezoluciju za klasifikaciju. Nasuprot tome, usko vidno polje pruža veliki domet i visoku rezoluciju, ali drastično sužava "prozor" u kojem se dron mora nalaziti. Ako sistem ne poseduje adekvatnu strategiju upravljanja promenom vidnog ugla, brzi dron lako izlazi iz vidnog polja pre nego što algoritam za praćenje uspe da ga stabilizuje, što dovodi do gubitka cilja.

Treće, sam način upravljanja fokusnom ravni predstavlja kritičan problem. Kod objektiva sa velikim fokusnim dužinama (koji su neophodni za detekciju objekata na velikim daljinama), dubinska oština postaje izuzetno mala. To znači da i najmanja greška u proceni udaljenosti drona dovodi do zamućenja slike. Tradicionalni algoritmi auto-fokusa često su prespori za praćenje malih, brzih objekata niskog kontrasta, posebno tokom zumiranja (promene FOV-a). Neophodan je sistem upravljanja koji simultano i precizno sinhronizuje promenu vidnog ugla sa promenom pozicije fokusne ravni, osiguravajući da dron ostane oštar i jasno definisan u svakom trenutku tranzicije.

Konačno, značajan, a često zanemaren problem predstavljaju zaštitni optički prozori. Oni predstavljaju primarnu fizičku barijeru koja štiti senzore od spoljašnjih uticaja, ali ujedno i prvu tačku degradacije signala. Neadekvatan dizajn prozora može dovesti do značajnih gubitaka u transmisiji optičkog zračenja, pojave unutrašnjih refleksija koje dovode senzor do zasićenja, kao i do termalnih izobličenja slike usled nejednakog zagrevanja. Izbor materijala i premaza mora pomiriti suprotstavljene zahteve: visoku mehaničku otpornost na udare i eroziju, i visoku spektralnu propusnost u širokom opsegu talasnih dužina (od VIS do LWIR spektra), kako bi se omogućio nesmetan rad multi-senzorskog sistema.

Zbog svega navedenog, postoji jasna potreba za razvojem sistema koji integriše napredne metode upravljanja usmeravanjem EO sistema i optičkim parametrima (FOV i fokus) sa optimizovanim dizajnom optičkih komponenata (uključujući zaštitne prozore), kako bi se omogućila brza i pouzdana detekcija na većim udaljenostima uz zadržavanje stabilnog praćenja [3, 4, 5].

1.3 Hipoteze i cilj

Primarni cilj istraživanja je koncipiranje unapređenja elektro-optičkih (EO) sistema namenjenih za ranu detekciju dronova, kao i provera postavljenih naučnih i tehničkih pretpostavki kroz rigoroznu analizu i eksperimente. Istraživanje teži ka kreiranju naprednog rešenja za praktičnu implementaciju multi-senzorskog sistema koje će omogućiti detekciju na većim udaljenostima, uz veću verovatnoću ispravne klasifikacije i manju verovatnoću lažnih alarma. Pored toga, cilj je definisanje metodologije testiranja i verifikacija kroz simulacije i eksperimente u realnim terenskim uslovima, kako bi se potvrdila efikasnost predloženih metoda upravljanja i dizajna.

Na osnovu definisanog problema i ciljeva istraživanja, postavljene su sledeće hipoteze:

- 1. Moguće je koncipirati unapređenje EO sistema za ranu detekciju dronova kako bi se postigli efektivno veći dometi uspešne detekcije, praćenja i klasifikacije drona, uz zadržavanje postojećih senzora i gimballa.** Ova hipoteza polazi od pretpostavke da se optimizacijom upravljanja, specifično adaptivnom promenom vidnog ugla i sinhronizovanim fokusiranjem, mogu prevazići ograničenja postojećeg hardvera,

omogućavajući efikasnije iskorišćenje dostupnih resursa za detekciju malih i brzih ciljeva.

2. **Moguće je postići povećanu robusnost i pouzdanost sistema.** Ova hipoteza se zasniva na očekivanju da će analiza i unapređenje dizajna zaštitnih optičkih prozora (izbor materijala, premaza i geometrije) značajno smanjiti degradaciju performansi usled uticaja okoline, čime se produžava radni vek sistema i osigurava stabilan rad u teškim uslovima eksploatacije.
3. **Moguće je razviti metodologiju za objektivno poređenje performansi različitih sistema na bazi modeliranja i simulacije.** Pretpostavlja se da se definisanjem jasnih kriterijuma, kao što je "broj piksela na meti" (PoT) u korelaciji sa verovatnoćom detekcije, može uspostaviti robustan model za kvantitativno poređenje različitih arhitektura i strategija upravljanja pre same fizičke realizacije.
4. **Moguće je eksperimentalno potvrditi očekivane performanse na primeru dostupnog EO sistema sa termalnom kamerom.** Ova hipoteza implicira da će rezultati dobijeni teorijskom analizom i simulacijama biti potvrđeni u praksi, korišćenjem multisenzorskog sistema sa termalnim detektorom u srednje-talasnom infracrvenom (MWIR) opsegu, čime se dokazuje primenljivost predloženog rešenja u realnom okruženju.

1.4 Struktura disertacije

Ova disertacija je strukturirana u nekoliko logički povezanih poglavlja koja prate tok istraživanja.

Nakon Uvoda, u drugom poglavlju dat je sveobuhvatan pregled oblasti potkrepljen relevantnim naučnim radovima. U ovom delu se analiziraju ključne komponente EO sistema, od senzora i optike do algoritama za obradu signala i veštačke inteligencije, pružajući teorijsku osnovu za dalje istraživanje.

Zatim je u trećem poglavlju detaljno razrađen predmet istraživanja. Poglavlje počinje opisom specifičnog problema ranog otkrivanja niskoletućih dronova, nastavlja se predloženim pristupom za utvrđivanje pogodne metode upravljanja multi-senzorskim sistemom, a završava opisom očekivanih rezultata i definisanjem metodologije koja uključuje teorijsko razmatranje, modeliranje i simulaciju.

U četvrtom poglavlju dat je konkretan predlog unapređenja elektro-optičkih sistema. Fokus je na definisanju nove, adaptivne metode upravljanja vidnim poljem i fokusom, kao i na analizi i optimizaciji dizajna zaštitnih optičkih prozora radi poboljšanja optičkih performansi i robusnosti.

U petom poglavlju izložen je praktičan primer i eksperimentalna verifikacija rezultata. Prikazana je postavka eksperimenta sa multisenzorskim sistemom koji sadrži termalnu i kolor kameru, a dobijeni rezultati se porede sa postavljenim hipotezama kako bi se potvrdila efikasnost rešenja.

U šestom poglavlju date su mogućnosti primene rezultata istraživanja, kako u sistemima za borbu protiv dronova, tako i u drugim srodnim oblastima nadzora.

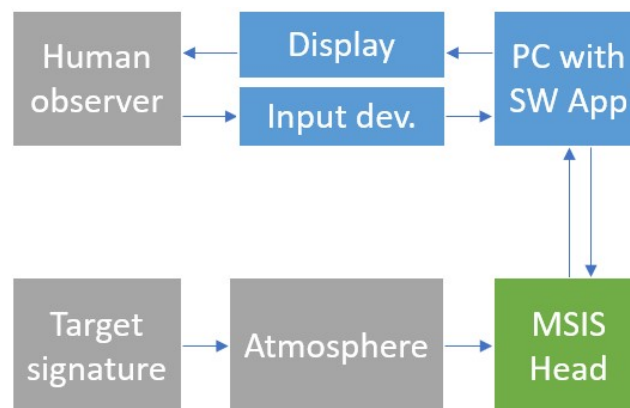
U sedmom poglavlju navedeni su pravci daljeg razvoja, ukazujući na potencijalna poboljšanja kroz primenu novih tehnologija i algoritama.

Na kraju, u osmom poglavlju je dat zaključak koji sumira ključne doprinose disertacije, a u devetom poglavlju navedena je korišćena literatura.

2 Pregled oblasti

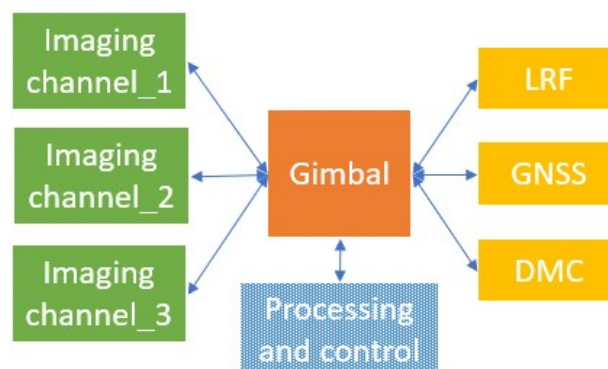
Upravljanje elektro-optičkim (EO) sistemima za rano otkrivanje dronova predstavlja multidisciplinarno područje koje obuhvata niz tehnologija i specifičnih znanja. Ovo područje je od ključnog značaja za mnoge primene, od vojne i bezbednosne do civilne.

Na Slika 1 dat je uprošćen model EO sistema sa više senzora, gde su zelenom i plavom bojom prikazani blokovi koji sadrže komponente EO sistema na čije karakteristike možemo da utičemo prilikom dizajniranja i korišćenja EO sistema, dok su sivom bojom prikazani blokovi koji sadrže komponente na koje teško možemo da utičemo tokom dizajniranja i korišćenja EO sistema, kao što su karakteristike posmatrača, posmatranog drona ili atmosferskih uslova, ali te komponente i te kako utiču na celokupan dizajn EO sistema.



Slika 1 - Model EO sistema sa više senzora, zeleni i plavi blokovi - komponente EO sistema na čije karakteristike možemo da utičemo tokom dizajniranja i korišćenja EO sistema

Dakle, iako na samog posmatranog drona i atmosferu kroz koju se prostiru optički elektro-magnetni talasi nemamo uticaj, dizajniramo sistem koji će biti u stanju da se izbori sa različitim izazovima, pa tako umesto da imamo samo jedan kanal za prikupljanje slike (video kanal), koristimo više kanala koje kombinujemo u zavisnosti od doba dana ili noći, uslova osvetljenja ili karakteristika samog drona, i vremenskih prilika. Na Slika 2 prikazana je Arhitektura glave multisenzorskog EO sistema (engl. *MSIS head*).

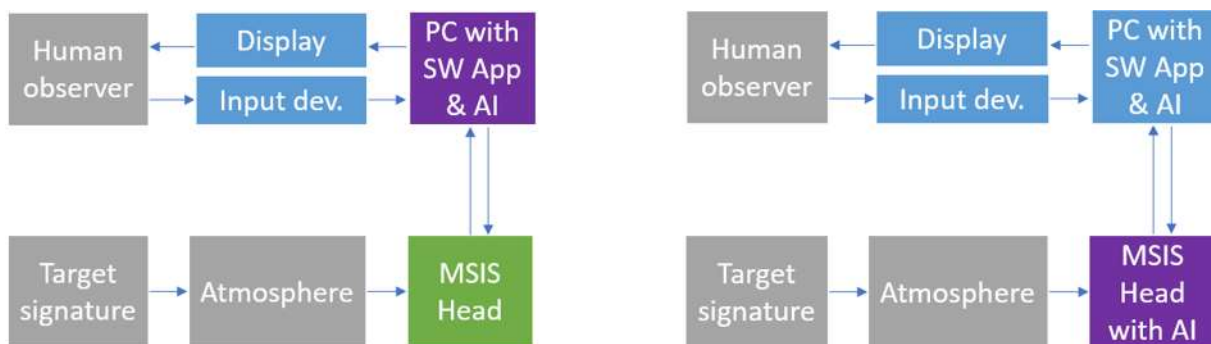


Slika 2 - Arhitektura glave multisenzorskog EO sistema (engl. MSIS head)

Glava multisenzorskog EO sistema se sastoji od dva ili više kanala za prikupljanje slike (engl. *Imaging Channel*), odnosno video kanala, dodatnih senzora, gimbala na kom su mehanički integrisani senzori i jedinice za obradu signala i upravljanje. Pomenuti dodatni senzori su obično laserski daljinomer, senzor za određivanje sopstvene lokacije, kao što je globalni satelitski navigacioni sistem (GNSS - engl. *Global Navigation Satellite System*) i senzor usmerenja, na bazi digitalnog magnetnog kompasa sa inklinometrima, ili na bazi inercijalnih senzora.

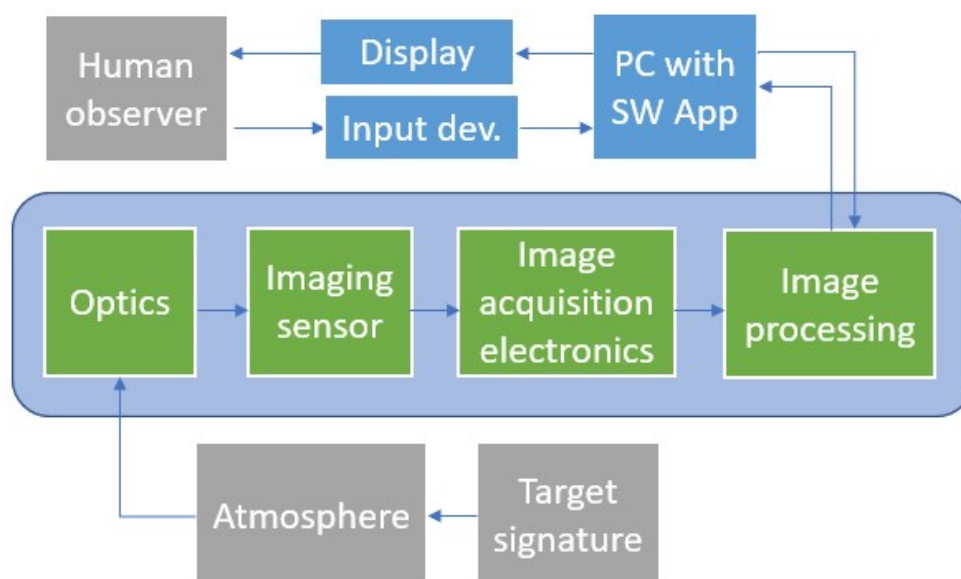
Osim što kombinujemo kanale koji rade u različitim spektralnim opsezima, u okviru svakog kanala se trudimo da izvučemo maksimum, pa tako primera radi uvodimo dodatne optičke ili softverske filtre, uvodimo automatiku i predefinisana ponašanja kako bi performansa sistema što manje zavisila od konkretnog posmatrača, odnosno operatera EO sistema.

Ključna područja istraživanja u okviru EO sistema su optičke komponente, EO senzori i detektori, obrada signala, stabilizacija optičke ose, algoritmi za praćenje, fuzija podataka, kalibracija i standardizacija, otpornost na smetnje, optimizacija sistema i veštačka inteligencija (mašinsko učenje). Na Slika 3 prikazan je model EO sistema sa više senzora u kom je sa leve strane ljubičastom bojom naglašena AI komponenta u okviru bloka 'PC with SW App', dok je sa desne strane ljubičastom bojom naglašena AI komponenta u okviru bloka 'MSIS Head with AI'.



Slika 3 - Model EO sistema sa više senzora u kom je naglašena AI komponenta, levo u okviru bloka 'PC with SW App', desno u okviru bloka 'MSIS Head with AI'

Za uspešnost rada EO sistema vrlo je važan kvalitet slike svakog od video kanala, a važna metrika koja se koristi za procenu kvaliteta slike je funkcija prenosa modulacije (engl. *MTF – Modulation Transfer Function*). MTF kvantifikuje sposobnost sistema da verno reprodukuje detalje na slici posmatrano u prostornom domenu, odnosno meri koliko dobro sistem prenosi informacije o kontrastu sa objekta na ravan slike. EO sistem se sastoji od nekoliko ključnih komponenti, od kojih svaka doprinosi celokupnom MTF sistema. Ključne komponente su optički elementi, detektori i elektronika za prikupljanje i obradu signala. Na Slika 4 prikazana je blok shema jednog video kanala glave multisenzorskog EO sistema (MSIS head).



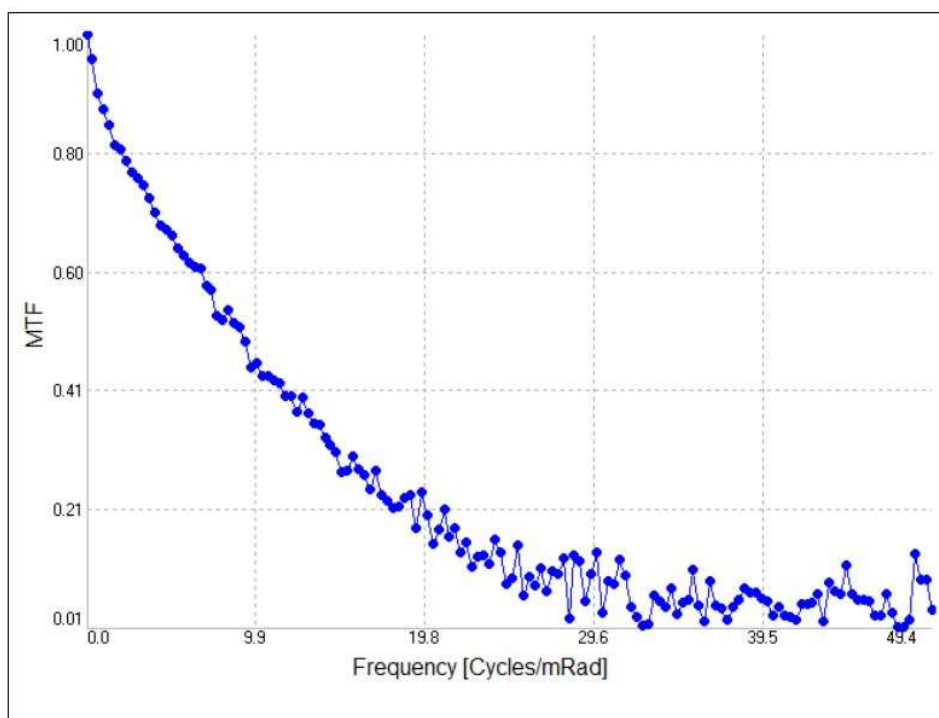
Slika 4 – Blok shema jednog video kanala glave multisenzorskog EO sistema (MSIS head)

Optika EO sistema po pravilu sadrži objektivne, odnosno grupe sočiva, ali često i druge optičke elemente poput zaštitnih prozora, optičkih filtara i ogledala. Optički elementi usled svojih nesavršenosti onemogućavaju da se slika prenese u potpunosti bez degradacije. Sočiva unose razne aberacije koje degradiraju sliku, poput sferne aberacije, kome, astigmatizma i drugih aberacija koje degradiraju kvalitet slike i smanjuju MTF. Neizbežna difrakcija ograničava rezoluciju bilo kog optičkog sistema, posebno na višim prostornim učestanostima. Kvalitet optičkih površina u vidu nesavršenosti na površinama sočiva, filtara i ogledala, poput ogrebotina i udubljenja, mogu raspršiti svetlost i smanjiti MTF. Od kvaliteta optičkih površina, ali i samih optičkih materijala i premaza koji se koriste na njihovim površinama, umnogome zavisi i transmisivnost tih elemenata, a samim tim i čitavog EO sistema.

Karakteristike detektora poput veličine i razmaka piksela su ključne za MTF samog detektora. Manji pikseli generalno poboljšavaju rezoluciju, ali takođe mogu da unesu aliasing artefakte. Takođe kvantna efikasnost detektora u pretvaranju fotona u električne signale utiče na kvalitet slike, a šum u detektoru može da pogorša kontrast slike i smanji MTF.

Signal sa detektora je potrebno pojačati, preneti i pretvoriti iz analognog domena u digitalni, što dovodi do sledećih razloga za dodatnu degradaciju slike. Naime, pojačanje signala može da unese šum i izobličenje, a analogno-digitalna konverzija (ADC, engl. *Analog-to-Digital Conversion*) može uneti šum kvantizacije i ograničiti dinamički opseg sistema, utičući na celokupni MTF sistema.

Ukupan MTF sistema je određen kombinovanim dejstvom MTF-ova svih pojedinačnih komponenti. Dakle, EO sistem se može smatrati kaskadom komponenti, gde je ukupni MTF proizvod pojedinačnih MTF-ova svake komponente, a analiza MTF-a svake komponente omogućava optimizaciju EO sistema i identifikaciju ograničavajućih faktora u kvalitetu slike. Na Slika 5 dat je primer MTF merenja termalnog video kanala EO sistema.



Slika 5 - Primer MTF merenja-a termalnog video kanala EO sistema

MTF analiza je ključna u fazi projektovanja EO sistema kako bi se osigurala optimalne performanse slike. Na taj način performanse slike mogu da se procene i da nam daju kvantitativnu meru za poređenje različitih sistema. Analizom MTF-a pojedinačnih komponenti, moguće je identifikovati i rešiti probleme sa performansama slike. MTF informacije se mogu koristiti i za razvoj algoritama za obradu slike kako bi se poboljšao kvalitet slike, a na kraju i poboljšale performanse celog EO sistema i uspešnost otkrivanja ciljeva. MTF analiza može da bude i složenija ako se uključe i drugi faktori, uključujući atmosferske efekte, karakteristike cilja i uslove rada.

Ceo spektralni opseg se ne može efikasno pokriti jednim video kanalom za snimanje slike, pa se obično koriste dva ili tri video kanala. Izbor opsega spektralne osetljivosti je važan i utiče na domete detekcije i prepoznavanja zbog razlika u karakteristikama drona i cele posmatrane scene, kao i razlikama u atmosferskim uslovima, kao što je dato u [3]. Bez obzira na izabrani spektralni opseg, postoji nekoliko važnih karakteristika svakog video kanala multisenzorskog EO sistema, i to su trenutno vidno polje (IFOV – engl. *Instantaneous Field of View*), ugao gledanja (FOV – engl. *Field of View*), spektralna osetljivost (SS - engl. *Spectral Sensitivity*), učestanost slikanja (FR – engl. *Frame Rate*), vreme integracije (IT – engl. *Integration Time*), odnos veličine difrakcionog razmazivanja i veličine piksela (engl. *Diffraction blur size vs pixel size*), rezolucija slike (engl. *Imager resolution*), obrada slike (engl. *Image Processing*) radi postizanja što boljeg odnosa signal šum (SNR – engl. *Signal to Noise Ratio*), a u naprednijim EO sistemima koriste se i veštačka inteligencija (AI – engl. *Artificial Intelligence*) i fuzija slike (engl. *Image Fusion*).

U narednim potpoglavljima biće opisana navedena područja istraživanja.

2.1 Elektro-optički senzori i detektori

Pojam elektro-optičkog (EO) senzora može imati dvojako značenje i može da se odnosi na integrisano kolo koje sadrži mikroskopske elemente osjetljive na elektromagnetno zračenje, ali isto tako pod pojmom EO senzora i detektora ponekad se podrazumeva ceo sklop koji sadrži i optičke elemente za fokusiranje zračenja, optičke prozore za zaštitu od spoljne sredine, kao i optičke filtre, ali i osnovna elektronska kola koja omogućavaju dalju integraciju sa ostatkom sistema. EO senzori i detektori se istražuju i razvijaju za različite opsege optičkih talasnih dužina zračenja. Optičko zračenje obuhvata ultraljubičasto (UV, engl. *Ultraviolet*) zračenje koje obuhvata spektar talasnih dužina od 100 nm do 400 nm, zatim ljudima vidljivo (VIS, engl. *Visible*) zračenje koje obuhvata spektar talasnih dužina od 400 nm do 700 nm, i infracrveno (IR, engl. *Infrared*) zračenje koje obuhvata spektar talasnih dužina od 700 nm do 1000 μ m. IR zračenje nije vidljivo ljudskom oku i obično se deli na infracrveno zračenje blisko vidljivom (NIR, engl. *Near Infrared*), sa talasnim dužinama okvirno od 700 nm do 1000 nm, kratko-talasno infracrveno zračenje (SWIR, engl. *Short Wavelength Infrared*), sa talasnim dužinama od okvirno 1000 nm do 2500 nm, srednje-talasno infracrveno zračenje (MWIR, engl. *Mid Wavelength Infrared*), sa talasnim dužinama od okvirno 3 μ m do 5 μ m, dugo-talasno infracrveno zračenje (LWIR, engl. *Long Wavelength Infrared*), sa talasnim dužinama od okvirno 8 μ m do 14 μ m, i daleko infracrveno zračenje (FIR, engl. *Far Infrared*), sa većim talasnim dužinama sve do nekih 1000 μ m.

Kada su u pitanju EO sistemi za rano otkrivanje dronova, uglavnom se koriste pasivni EO senzori, a kada su u pitanju refleksivna zračenja u VIS, NIR i SWIR opsezima mogu biti i aktivni uz primenu izvora zračenja u odgovarajućim opsezima talasnih dužina. EO senzor koji je uvek aktivnog tipa je laserski daljinomer, koji se u ovim sistemima koristi za precizno merenje udaljenosti posmatranog objekta, a radi u SWIR opsegu, dok su MWIR i LWIR EO senzori po pravilu uvek pasivni, jer se oslanjaju na emisiju toplotnog zračenja. Osim što pokrivaju različite delove spektra, ovi EO senzori mogu da budu i polarizovani, odnosno da sadrže polarizujuće filtre koji propuštaju samo one elektromagnetne talase koji su polarizovani u ravni koju optički polarizacioni filter propušta.

EO senzori u UV delu spektra imaju vrlo specifične primene, i za sada se ne koriste u EO sistemima za detekciju dronova, te se ovde neće dalje razmatrati. Senzori u vidljivom delu spektra su generalno najdostupniji i najrasprostranjeniji, sa mogućnošću da daju najveći nivo detalja, uključujući i boju, ali samo u uslovima dobre osvetljenosti i vidljivosti. S obzirom da EO sistemi za rano otkrivanje dronova moraju da rade u svako doba dana i noći, i u uslovima slabije vidljivosti, veći značaj u EO sistemima za rano otkrivanje dronova imaju IR senzori, s tim da se najčešće koriste u sinergiji sa EO sensorima u vidljivom delu spektra, a ponekada i sa EO sensorima u SWIR delu spektra, i zajedno čine multi-senzorske EO sisteme. IR senzori u takvim sistemima se biraju na osnovu očekivanih potreba, klimatskog područja u kom treba da rade, kao i budžeta koji je na raspolaganju. IR senzori sa najboljom performansom su hladjeni senzori

kod kojih se detektorski elementi hlade kako bi se postigla bolja performansa. Za ovakve primene EO senzora trend je razvoj detektora sve veće površine, sa sve većim brojem piksela. Trenutno stanje tehnike je MWIR matrični detektor sa 4000 puta 4000 pojedinačnih elemenata (piksela), dok je kod LWIR-a to na oko 2000 puta 2000 elemenata. ARGUS-IS sistem razvijen u okviru DARPA programa koji pokriva 39 km², sadrži EO senzore sa preko 2 milijarde piksela [6]. Trend je takođe i smanjivanje veličine piksela; na tržištu su dostupni EO senzori čiji pojedinačni piksel iznosi 5µm x 5µm za MWIR [7], dok se za LWIR opseg granica uspešno spušta na dimenzije od 8.5µm primenom naprednih tehnologija nehladenih bolometara [8]. Dalji razvoj tehnologije i integracije na silikonskim vaferima od 300 mm omogućava dodatnu minijaturizaciju i širu dostupnost ovih senzora [9].

Kao što je pomenuto, multi-senzorski EO sistemi sadrže EO senzore koji pokrivaju različite delove spektra, gde se njihovim kombinovanjem koristi ono najbolje što svaki od pojedinačnih EO senzora može da da. Konkretno, u uslovima potpune tame i odsustva izvora vidljive svetlosti, VIS senzori ne mogu da daju upotrebljivu sliku, dok su termovizijske kamere u MWIR i LWIR opsegu i te kako upotrebljive. Takođe, korisni domet ovih EO senzora, osim od veličine i karakteristika samog drona, umnogome zavisi od atmosferskih prilika, odnosno klimatskog područja, količine i vrste aerosola u vazduhu [10].

Da bi EO sistem bio efikasan, ali istovremeno robustan i upotrebljiv na duže staze, potrebno je voditi računa o tome kako su EO senzori zaštićeni od okruženja spoljne sredine u kojoj se eksploatišu. U tu svrhu koriste se optički transparentni zaštitni prozori, čiji dizajn i izbor materijala predstavlja izazov za sebe [4].

2.2 Optički elementi u elektro-optičkim sistemima

Optički elementi u EO sistemima su objektiv, odnosno grupe sočiva, zatim optički zaštitni prozori, optički filtri i ogledala. Svi navedeni optički elementi unose određene nesavršenosti i dovode do manje ili veće degradacije u prenosu slike. Objektiv su grupa sočiva koja se koriste da bi sliku fokusirala u ravni detektora, uz što manja izobličenja. Optički zaštitni prozori se koriste kao optički interfejs koji povezuje senzor slike i predmet od interesa koji se posmatra i istovremeno pružaju zaštitu unutrašnjosti EO sistema od prašine i drugih nečistoća. Svi optički elementi moraju da budu prilagođeni detektoru prema talasnim dužinama koje propuštaju. U tu svrhu, a radi dobijanja što bolje performanse koriste se dodatni anti-refleksivni (AR) premazi na površinama sočiva i optičkih zaštitnih prozora, a ponekad se koriste i dodatni filtri, posebno u situacijama kada se želi postići određena fleksibilnost, odnosno mogućnost prilagođavanja EO sistema uslovima okoline.

Objektiv su najčešće refraktivnog tipa, što znači da se optičko elektromagnetno zračenje prelama kroz materijal sočiva od kojih je sačinjen objektiv, ali mogu biti i reflektivnog tipa kada se koriste zakrivljene ogledalske površine. Objektiv mogu da budu monofokalni, što znači da

na ravan detektora fokusiraju zrake sa fiksne udaljenosti, dvo-fokalni, ili tro-fokalni, sa mogućnošću izbora dve ili tri udaljenosti objekta koji će biti u fokusu, ili pak objektivu sa kontinualno promenljivom fokalnom dužinom, kod kojih je moguće menjati fokalnu dužinu u određenom opsegu. Izbor fokalne dužine kod dvo-fokalnih i tro-fokalnih objektivu, kao i menjanje fokalne dužine kod objektivu sa kontinualno promenljivim fokalnim dužinama, vrši se softverski, i to na zahtev operatera EO sistema, ili automatski na osnovu predefinisanih pravila. EO sistemi u multisenzorskim sistemima o kojima je reč sadrže detektore u VIS i IR delu spektra sa prilagođenim objektivima koji imaju kontinualno promenljive fokalne dužine, dizajnirani specifično za senzore visoke rezolucije u MWIR opsegu [11], i SWIR emiter i detektor sa monofokalnom optikom u laserskom daljinomeru. Izbor fokalnih dužina je ključan za postizanje performanse EO sistema. Pored fokalnih dužina i spektralnih karakteristika objektivu, ključna karakteristika je i prečnik otvora objektivu, odnosno češće korišćena izvedena veličina F broj, koja predstavlja odnos fokalne dužine i prečnika otvora objektivu, od čega direktno zavisi količina energije koja dolazi do detektora, a samim tim i ukupna performansa optičkog podsistema, odnosno pripadajućeg video kanala.

Razvoj tehnologija detektora je poslednjih decenija doživela ogroman napredak, dok sa druge strane optičke komponente koje se koriste sa njima u sprezi i dalje se baziraju na istim principima kao pre više decenija. Napredak je usmeren ka izradi sočiva veće površine, kako bi se primilo više energije i smanjila difrakcija, veće preciznosti kako bi se smanjile aberacije, uz kvalitetnije anti-refleksivne premaze, a sve sa ciljem da bi se postigli veći dometi. Uobičajena metrika koja se koristi za procenu kvaliteta optike nekog EO sistema je već opisana funkcija prenosa modulacije (engl. *MTF – Modulation Transfer Function*). Dodatni napredak je postignut u pravcu atermalizacije objektivu, odnosno njihove sposobnosti da prilikom promene temperature okruženja zadrže visoku performansu. Postoje radovi sa novim pristupima što se tiče optičkih sočiva, kao što je restauracija slike zasnovana na dubokim konvolucionim neuronskim mrežama koje se primenjuju uz meta-sočiva velike površine pogodna za masovnu proizvodnju [12], koja se zahvaljujući dubokom učenju uspešno optimizuju čak i za širokougaone primene u vidljivom delu spektra [13, 14], ali su i tu još uvek daleko od komercijalne primene.

2.3 Zaštitni optički prozori

Zaštitni optički prozor je kritična komponenta svakog elektro-optičkog (EO) sistema, čija je primarna funkcija da obezbedi fizičku barijeru između osetljivih senzora i spoljašnjeg okruženja. Njegov zadatak je da štiti unutrašnjost sistema od prašine, vlage, soli, mehaničkih udara i drugih nečistoća. Pored zaštitne uloge, prozor deluje kao transparentan interfejs koji mora da obezbedi minimalnu degradaciju prolaznog optičkog signala.

Kao i svaki optički element, prozor unosi određene nesavršenosti koje mogu degradirati kvalitet slike. Da bi se maksimizovale performanse, svi optički elementi, uključujući i prozore, moraju biti prilagođeni spektralnoj osetljivosti detektora. Transmisivnost se poboljšava nanošenjem specijalizovanih anti-refleksivnih (AR) premaza, a u određenim konfiguracijama se mogu koristiti i integrirani ili dodatni optički filtri radi veće fleksibilnosti.

2.3.1 Izazovi u dizajnu i selekciji materijala

Dizajn i izbor materijala predstavljaju značajan inženjerski izazov, posebno kod multisenzorskih sistema koji pokrivaju širok spektralni opseg (od vidljivog - VIS do dugotalasnog infracrvenog - LWIR). Kreiranje jedinstvenog prozora transparentnog za ceo spektar, a da pritom zadovolji stroge mehaničke i termičke zahteve, često je neizvodljivo.

- Materijalna ograničenja: Većina materijala transparentnih u VIS delu spektra (npr. standardno staklo) ne propušta infracrveno zračenje. S druge strane, IR transparentni materijali (npr. germanijum) često su neprovidni za vidljivu svetlost. Čak i materijali šireg opsega transmisije (poput safira ili ZnS) često ne mogu zadovoljiti sve optičke i mehaničke zahteve istovremeno.
- Multisenzorski sistemi: Zbog navedenih ograničenja, multisenzorski EO sistemi se najčešće dizajniraju sa odvojenim optičkim kanalima i zasebnim zaštitnim prozorima. Ovakav pristup omogućava optimizaciju izbora materijala i premaza za svaki spektralni podopseg zasebno, čime se postižu maksimalne performanse za svaki senzor.

2.3.1.1 Selekcija materijala prema spektralnim opsezima

Kada su optički kanali fizički razdvojeni, izbor materijala se vrši prema optimalnim performansama za specifičnu talasnu dužinu, kao što je dato u Tabela 1:

Tabela 1 – Pregled različitih materijala za delove optičkog spektra od VIS do LWIR, kao i širokopojasni (prilagođeno prema [16, 39])

Spektralni Opseg	Primarni Materijal	Opseg Transmisije (μm)	Mehanička Izdržljivost	Ključne Prednosti	Ograničenja i Mane
VIS / NIR / SWIR (0.4 – 1.7 μm)	Safir (Al_2O_3)	0.15 – 5.5	Izuzetna (Tvrdoca: ~2000 Knoop)	Ekstremna otpornost na grebanje i eroziju Hemijska inertnost	Birefringencija (zahteva C-plane sečenje) Visoka cena obrade

Spektral ni Opseg	Primarni Materijal	Opseg Transmisi je (μm)	Mehanič ka Izdržljivo st	Ključne Prednosti	Ograničenja i Mane
				Visoka tačka topljenja	Težak za poliranje
	Stopljeni Silicijum (Fused Silica)	0.18 – 3.5	Dobra (Tvrdća: ~600 Knoop)	Odličan termalni šok Niska fluorescencija Nema birefringencije	Mekši od safira (osetljiv na udarce) Nije pogodan za MWIR/LWIR
MWIR (3 – 5 μm)	Silicijum (Si)	1.2 – 9.0	Visoka (Tvrdća: ~1150 Knoop)	Mala gustina (lagan) Niska cena Prirodno blokira VIS (filtar za Sunce) Visoka toplotna provodljivost	Neproziran u vidljivom delu Jaka apsorpcija oko 9 μm (nije za LWIR)
	Safir (Al_2O_3)	0.15 – 5.5	Izuzetna	Omogućava standardizacij u materijala sa VIS prozorom Robustniji od silicijuma	Skuplji od silicijuma Emisivnost raste na krajevima MWIR opsega (iznad 5 μm)

Spektralni Opseg	Primarni Materijal	Opseg Transmisije (μm)	Mehanička Izdržljivost	Ključne Prednosti	Ograničenja i Mane
LWIR (8 – 12 μm)	Germanijum (Ge)	1.8 – 23	Srednja (Tvrdoca: ~800 Knoop)	Visok indeks prelamanja (idealno za sočiva, ok za prozor) Niska disperzija	Termalno zamračenje (>70°C) Mekan (zahteva DLC premaz) Skup sirov materijal
	Cink Sulfid (ZnS - Standard)	0.4 – 12	Niska (Tvrdoca: ~250 Knoop)	Stabilniji na visokim temperaturama od Ge Jeftiniji od multispektralnog ZnS	Meka površina (lako se grebe) Značajno rasipanje u VIS/NIR (nije problem za LWIR)
Širokopojasni (VIS do LWIR)	ZnS Multi-spectralni (Cleartran)	0.4 – 12	Niska (Tvrdoca: ~250 Knoop)	Jedini materijal koji efikasno pokriva ceo spektar od 0.4 do 12 μm	Visoka cena (HIP proces) Slaba otpornost na eroziju kišom (zahteva zaštitni premaz)

2.3.1.2 Tankoslojni premazi (Coatings)

Za maksimizacijo transmisije i izdržljivosti koriste se premazi:

- Spoljašnja strana: Tvrdi AR premazi (*Hard Carbon/DLC – Diamond Like Carbon*), optimizovani za izdržljivost i specifičan spektralni opseg (npr. samo 8-12 μm za LWIR prozor).
- Unutrašnja strana: Visokoefikasni AR premazi (V-coat) za maksimizaciju transmisije (>99% po površini).

U Tabela 2 dat je pregled osobina različitih tipova premaza, i to za standardni AR (engl. *BBAR – BroadBand Anti-Reflective*), DLC (engl. *Diamond-Like Carbon*), i visoko-otporni AR (engl. *HDAR – High-Durability Anti-Reflective*).

Tabela 2 – pregled osobina različitih tipova premaza, i to za standardni AR (engl. BBAR – BroadBand Anti-Reflective), DLC (engl. Diamond-Like Carbon), i visoko-otporni AR (engl. HDAR – High-Durability Anti-Reflective) (prilagođeno prema [16]).

Karakteristika	Standardni AR (BBAR)	DLC (Diamond-Like Carbon)	Visoko-otporni AR (HDAR)
Primarni materijal	Meki fluoridi / oksidi	Tvrda ugljenična matrica	Tvrđi oksidi / fosfidi
Transparentnost u vidljivom delu spektra	Odlična (proziran)	Loša (taman/crn)	Dobra (proziran)
Izdržljivost	Niska (podložno grebanju)	Ekstremna (otporno na pesak/kišu)	Visoka (otporno na brisanje/kišu)
Adhezija	Dobra	Otežana na mekim supstratima	Odlična
Cena	Niska	Visoka	Srednje-visoka
Tipična primena	Unutrašnja sočiva	Spoljašnja zaštita (samo za LWIR)	Spoljašnji multispektralni prozori

2.3.2 Geometrijski parametri dizajna

2.3.2.1 2.3.2.1 Debljina prozora (t_{min})

Minimalna potrebna debljina prozora (t_{min}) nije proizvoljna veličina, već se određuje na osnovu maksimalne očekivane razlike pritiska (ΔP) i slobodnog prečnika prozora (D), koristeći standardne opto-mehaničke jednačine za kružne ploče pod pritiskom oslonjene na ivicama [15, 16]:

$$t_{min} = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{K \cdot \Delta P \cdot SF}{M}} \quad (1)$$

U jednačini (1) figurišu sledeći parametri:

D - slobodan prečnik prozora,

K - predstavlja faktor oslanjanja,

ΔP - razlika pritiska,

SF – sigurnosni faktor,

M - dozvoljeni napon materijala (engl. *modulus of rupture*) uz odgovarajući faktor sigurnosti.

Za slučaj pravougaone ploče minimalna debljina je određena jednačinom (2):

$$t_{min} = l \cdot w \cdot \sqrt{\frac{K \cdot \Delta P \cdot SF}{2 \cdot M \cdot \left(1 + \frac{l^2}{w^2}\right)}} \quad (2)$$

Gde su:

l - slobodna dužina otvora,

w – slobodna širina otvora.

Detaljnija razrada i primena ove metodologije na specifične zahteve multisenzorskih sistema data je u istraživanju [8].

- Kompromis: Povećanje debljine prozora povećava mehaničku otpornost, ali neminovno dovodi do smanjenja optičke transmisije usled apsorpcije [17], što je posebno izraženo u infracrvenom delu spektra. Takođe, deblji prozor unosi sfernu aberaciju i pomeraj fokusne ravni, što negativno utiče na MTF sistema (Funkcija prenosa modulacije) [4, 18].

2.3.2.2 Nagib prozora i „Narcis efekat“

Geometrijska orijentacija prozora, odnosno njegov nagib (najčešće nekoliko stepeni) u odnosu na normalu na optičku osu, ključan je za eliminaciju "Narcis efekta" (*Narcissus effect*).

- Pojava Narcis efekta: Javlja se u infracrvenim sistemima (posebno hlađenim termovizijskim kamerama) kada detektor "vidi" sopstveni odraz (koji je na kriogenoj temperaturi) reflektovan od površine prozora. Ovo se manifestuje kao tamna mrlja u centru slike (hladni Narcis).
- Rešenje: Naginjanjem prozora, reflektovani zraci sa površine prozora se usmeravaju van vidnog polja detektora, čime se eliminiše ovaj nepoželjni artefakt i čuva uniformnost slike [4, 18].
- Dodatni faktori: Nagib prozora može biti diktiran i aerodinamičkim zahtevima (smanjenje otpora vazduha) ili potrebom za smanjenjem radarskog odraza (RCS), što dodatno komplikuje optički dizajn zbog uvođenja asimetričnih aberacija koje moraju biti kompenzovane [4]. Detaljna analiza uticaja nagiba zaštitnog prozora na performanse multisenzorskih sistema data je u [4].

2.3.3 Optički zahtevi

Primarni cilj je maksimizacija odnosa signal-šum (SNR) i očuvanje kvaliteta talasnog fronta.

- Spektralna transmisija: Materijal mora posedovati visok koeficijent transmisije (>90% pre premaza, >98% nakon nanošenja AR premaza) u radnom opsegu senzora.
- Distorzija transmitovanog talasnog fronta (TWD): Prozor ne sme unositi aberacije koje bi degradirale MTF. Standardni zahtev za precizne sisteme je da TWD bude manji od $\lambda/4$ na radnoj talasnoj dužini. Nehomogenosti u indeksu prelamanja ili varijacije u debljini (klinavost) direktno utiču na rezoluciju i zadržavanje usaglašenosti optičkih osa (*boresight retention*).
- Rasipanje svetlosti (Scatter): Površinska hrapavost i unutrašnje nečistoće uzrokuju rasipanje koje smanjuje kontrast slike. Za VIS i SWIR opsege zahteva se nizak nivo rasipanja (*low scatter*) kako bi se izbegao efekat "vela" (*veiling glare*) pri jakom pozadinskom osvetljenju.

2.3.4 Mehanički i termički zahtevi

Prozor mora zadržati integritet pod uticajem ekstremnih mehaničkih i termičkih opterećenja.

- Tvrdća i otpornost na eroziju: Materijal mora posedovati visoku Knoop tvrdću radi otpornosti na abraziju česticama peska i eroziju kišnim kapima pri velikim brzinama. Spoljašnje površine mekših materijala (poput Ge ili ZnS) zahtevaju zaštitne prevlake (npr. *Hard Carbon/DLC* ili bor-fosfid).
- Čvrstoća loma (engl. *Fracture Toughness*): Otpornost na širenje pukotina usled udara stranih objekata je kritična za preživljavanje sistema.
- Termička stabilnost i šok: Prozor mora biti otporan na termalne šokove (nagle promene temperature). Nizak koeficijent termo-optičke osetljivosti (dn/dT) je poželjan kako bi se izbeglo termalno defokusiranje usled aerodinamičkog zagrevanja (kod brzih platformi).

Materijali poput Germanijuma, koji doživljavaju nagli pad transmisije pri temperaturama iznad 70°C, ograničeni su u primeni pri ovim uslovima.

2.3.5 EMI/EMC zahtevi (Elektromagnetna zaštita)

Za vojne i moderne C-UAV primene, prozor ne sme predstavljati "rupu" u Faradejevom kavezu kućišta. Ovo se postiže integracijom provodnih svojstava:

1. Transparentni provodni premazi: Nanošenje tankih, transparentnih provodnih premaza (npr. Indijum-kalaj-oksidi - ITO za VIS/NIR, ili specifičnih poluprovodničkih slojeva za IR).
2. Metalne mikro-mrežice (engl. *grids*): Integracija finih metalnih rešetki u strukturu prozora, uz obavezno uzemljenje na ram prozora. Iako efikasne, rešetke mogu izazvati difrakcione efekte.

2.3.6 Integracija i montaža

Pravilna montaža je ključna, posebno zbog razlike u koeficijentima termičkog širenja (CTE) između optičkog materijala i metalnog kućišta.

- Izolacija od naprezanja: Direktni kontakt staklo-metal je nedozvoljen. Koriste se elastomerni zaptivači (RTV silikoni) ili O-prstenovi koji apsorbiraju termičke dilatacije. Dizajn ležišta mora sprečiti prenos mehaničkih naprezanja sa kućišta na optički element, kako bi se izbegla pojava naponskog dvojnog prelamanja (*stress birefringence*) ili loma.

Hermetičnost: Montaža mora obezbediti hermetičnost (najmanje IP67/IP68 standard) da bi se sprečio prodor vlage i prašine.

2.4 Obrada signala

Oblast obrade signala je prilično zrela, ali se i dalje razvija. Ova oblast obuhvata filtriranje i pojačavanje signala, što uključuje uklanjanje šuma i poboljšanje odnosa signal-šum, zatim detekciju ivica i segmentaciju, što uključuje prepoznavanje objekata na slikama i video zapisima.

Kod IR detektora osnovni algoritmi koji se koriste za korekciju fiksnog šuma su korekcija neuniformnosti (engl. *NUC - non-uniformity correction*) i uklanjanje loših piksela. Bez tih algoritama ne može se u potpunosti postići maksimalna performansa raspoloživih infracrvenih detektora. Obično se koristi metoda kalibracije u dve tačke. Pikseli koji se ne mogu ispraviti ovim procesom, su loši pikseli, i oni se u procesu obrade zamenjuju kombinacijom susednih piksela.

Kako bi se postigao veći kontrast u slici koriste se algoritmi, odnosno filtri za ujednačavanje histograma (engl. *HEF - Histogram Equalization Filter*). Nakon ovog filtriranja intenziteti piksela se bolje raspodele na histogramu, tako što ravnomerno koriste ceo opseg intenziteta, što omogućava oblastima nižeg lokalnog kontrasta da dobiju veći kontrast. Koriste se i napredniji algoritmi poput filtra za lokalno ujednačavanje histograma (engl. *LHEF - local histogram equalization filter*), koji imaju sposobnost da poboljšaju detalje u slici uzimajući različite transformacije istog nivoa sive na različitim mestima u originalnoj slici.

Kako bi se postigle bolje prostorne učestanosti koriste se dodatni algoritmi kao što je filter dizajniran da poboljša visoke prostorne frekvencije (npr. oštrije ivice) što rezultira sa povišenom funkcijom prenosa modulacije objektiva (engl. *MTF – Modulation Transfer Function*). Ovakvi filtri prigušuju signale velike amplitude, čineći veći deo ukupnog dinamičkog opsega dostupnim za prikaz bledih objekata i detalja. Količina slabljenja se automatski određuje analizom statistike scene [19].

2.5 Stabilizacija optičke ose

Stabilizacija optičke ose (LoS – engl. *Line of Sight*) predstavlja ključni faktor za efikasan rad elektro-optičkih (EO) sistema, naročito u dinamičkim uslovima eksploatacije. Ovi sistemi se često integrišu na pokretne platforme, poput aviona, vozila ili plovila, koje su izložene različitim vrstama vibracija, udara i ugaonih pomeranja. Međutim, čak i kod stacionarnih instalacija, spoljašnji poremećaji mogu značajno degradirati kvalitet slike, čime se otežava proces pronalaženja i praćenja cilja.

Ključni izazovi koji utiču na stabilnost sistema uključuju kretanje platforme na kojoj je EO sistem postavljen, atmosferske turbulencije, kao i samo kretanje drona. Vibracije, udari i ugaona kretanja platforme unose značajne smetnje u položaj optičke ose, dok atmosferske turbulencije, manifestovane kroz udare vetra i temperaturne varijacije, mogu dovesti do zamućenja i geometrijskih izobličenja slike. Pored toga, kretanje drona zahteva visoku preciznost sistema kako bi se održala stabilna slika cilja, što predstavlja složen inženjerski zadatak.

U praksi se primenjuju različite tehnike stabilizacije, uključujući aktivnu elektro-mehaničku stabilizaciju, pasivnu mehaničku izolaciju, elektronsku stabilizaciju zasnovanu na povratnoj sprezi sa žiroskopskih senzora, kao i elektronsku video stabilizaciju na osnovu analize sadržaja slike.

Aktivna elektro-mehanička stabilizacija podrazumeva upotrebu žiroskopskih senzora i različitih tipova aktuatora koji omogućavaju stabilizaciju optičke ose određenog podsistema ili celokupnog EO sistema. Kao dopuna, koristi se pasivna mehanička izolacija vibracija putem namenskih nosača (amortizera), čime se senzori fizički odvajaju od vibracija platforme.

Elektronska stabilizacija zasnovana na informacijama sa žiroskopskih senzora oslanja se na algoritme za obradu slike kako bi se elektronskim putem kompenzovala pomeranja. Ovaj proces može uključivati transformaciju 3D kretanja registrovanog žiroskopom u 2D ravan slike, uz preciznu kalibraciju parametara transformacije [20].

Sa druge strane, elektronska video stabilizacija koristi algoritme za obradu slike kako bi se postigla stabilnost prikaza. Ova metoda često uključuje primenu mikro-elektro-mehaničkih senzora (MEMS – engl. *Micro Electro-Mechanical Sensor*) i tehnika kao što su registracija slike (od frejma do frejma) i procena vektora pomeraja [19].

Prednosti stabilizacije optičke ose su višestruke: poboljšan kvalitet slike usled smanjenja zamućenja i podrhtavanja, što direktno doprinosi boljoj detekciji i prepoznavanju cilja; povećana preciznost praćenja, koja omogućava pouzdano praćenje pokretnih ciljeva; kao i povećan domet, čime se obezbeđuje stabilan rad u zahtevnijim uslovima. Takođe, značajan benefit je smanjen zamor operatera, jer se minimiziranjem uticaja kretanja platforme olakšava vizuelni nadzor i poboljšava svest o situaciji.

Za praćenje drona u pokretu koriste se napredni algoritmi upravljanja, poput Kalmanovog filtriranja i upravljanja modelom sa predviđanjem, čime se dodatno unapređuju performanse stabilizacije. Zaključno, stabilizacija optičke ose je kritična za uspešan rad EO sistema, jer efikasnim ublažavanjem efekata kretanja platforme i spoljašnjih poremećaja značajno poboljšava kvalitet slike, detekciju i praćenje ciljeva, omogućavajući optimalne performanse sistema [5].

2.6 Algoritmi za praćenje

4
4
Praćenje drona podrazumeva da EO sistem upravlja optičkom osom na takav način da dron sve vreme bude u okviru vidnog polja, a u nekim primenama je poželjno i da dron bude što bliže sredini slike. Da bi se to ostvarilo potrebno je integrisati upravljački mehanizam usmeravanja stabilizovane platforme pomoću gimbala na kom su integrisani senzori i mehanizam praćenja drona u okviru video signala, iliti video praćenje (engl. *video tracking*).

8
Za video praćenje dronova u okviru EO sistema koriste se različiti algoritmi, kao što su korelacioni filtri (CFTs - engl. *Correlation Filter Trackers*), kernelizovani korelacioni filtri (KCF – engl. *Kernel Correlation Filter*), Kalmanov filtar (KF – engl. *Kalman Filter*), prošireni Kalmanov filter (EKF – engl. *Extended Kalman Filter*), neosetljiv Kalmanov filtar (UKF – engl. *Unscented Kalman Filter*), filtar čestica (engl. *Particle Filter*), praćenje više hipoteza (MHT – engl. *Multiple Hypothesis Tracking*), praćenje zasnovano na dubokom učenju, praćenje pre detekcije (TBD – engl. *Track-Before-Detect*).

Često se koristi KCF uz Kalmanov filter, uz određene modifikacije i dodatke, zbog računarske efikasnosti, pa je primenljiv u realnim uslovima [21, 22, 23]. Ovakva rešenja omogućavaju uspešno praćenje i pored promene veličine, orijentacije i izgleda drona, uključujući i delimične i potpune okluzije.

Izbor odgovarajućeg algoritma zavisi od više stvari, kao što su karakteristike drona (npr. veličina, brzina, promena vektora brzine), karakteristike video kanala (npr. uglovi gledanja, rezolucija, procesorska snaga, dostupna memorija) i faktori okoline (pozadina drona, atmosferski uslovi, moguće okluzije). Svi ovi faktori mogu značajno da utiču na performanse praćenja. Pažljivim razmatranjem ovih faktora i odabirom odgovarajućeg algoritma za praćenje, EO sistemi mogu postići robusno i precizno praćenje cilja u širokom spektru operativnih scenarija.

Algoritmi za video praćenje praćenja rade u kombinaciji sa sistemima za kontrolu gimnala kako bi održali optičku osu stabilnu na dronu. Neki od uobičajenih algoritama upravljanja mehaničkim sistemima poput gimnala su PID (proporcionalno-integralno-diferencijalno dejstvo), LQG (engl. *Linear-Quadratic Gaussian*), adaptivna kontrola i upravljanje fazi logikom.

PID algoritam, odnosno adaptivna kontrola na bazi PID algoritma je široko korišćen i robusan kontrolni algoritam. Relativno je jednostavan za implementaciju i podešavanje, a generalno pruža dobre performanse. Doduše može biti osetljiv na šum, spoljne poremećaje i podešavanje parametara. Za postizanje optimalne performanse i otpornost na šum senzora, vibracije i druge smetnje, dinamika samog gimnala (npr. inercija, trenje) i karakteristike senzora moraju se uzeti u obzir u dizajnu upravljanja.

Kombinovanjem naprednih algoritama za praćenje sa sofisticiranim sistemima upravljanja gimbalom, EO sistemi mogu da postignu visoko precizno praćenje i održavaju stabilnu liniju gledanja na drona čak i u izazovnim okruženjima.

Postoje i mnogi drugi algoritmi i tehnike praćenja. Oblast praćenja ciljeva se konstantno razvija, uz istraživanje i razvoj posebno u oblastima kao što su fuzija više senzora, mašinsko učenje i distribuirano praćenje, a sa napretkom tehnologije postojeći zahtevniji algoritmi dobijaju šansu za uspešnu primenu u aplikacijama u realnom vremenu.

2.7 Fuzija podataka

Fuzija podataka podrazumeva integraciju podataka sa različitih senzora gde se kombinovanjem informacija iz različitih senzora poboljšava preciznosti i robusnost celog sistema. U okviru EO sistema fuzija podataka može da se odnosi na sjedinjavanje signala slike i video signala iz različitih video kanala istog EO sistema, a može da se odnosi i na sjedinjavanje podataka sa više EO sistema, ili EO sistema i drugih senzora koji rade u sinergiji na detekciji i praćenju dronova.

Integracijom podataka iz različitih izvora, sistem može prevazići ograničenja pojedinačnih senzora i obezbediti robusnije i preciznije rezultate u realnim operativnim uslovima. Kombinovanje podataka sa više senzora sa komplementarnim karakteristikama (npr. različiti spektralni opsezi, uglovi gledanja) može značajno poboljšati verovatnoću otkrivanja ciljeva, posebno u izazovnim uslovima. Analizom podataka sa više senzora, sistem može preciznije klasifikovati dronove na osnovu njihovih jedinstvenih karakteristika (npr. oblik, veličina, svojstva materijala). Kombinovanje podataka sa više senzora može poboljšati tačnost i robusnost algoritama za praćenje ciljeva, posebno u prisustvu šuma, atmosferskih uticaja i ciljeva koji dinamično manevrišu. Integracijom informacija iz više izvora, sistem može smanjiti nesigurnost u inicijalnoj detekciji, određivanju lokacije i brzine cilja, i drugim relevantnim parametrima. Generalno možemo reći da fuzija podataka pruža sveobuhvatniju i tačniju sliku operativnog okruženja, poboljšavajući svest o situaciji za donosiocje odluka.

Na Slika 6 prikazan je primer fuzije slike sa dva video kanala multisenzorskog EO sistema (engl. *MSIS head*), korišćenjem metode Laplasovih piramida. Gore levo vidi se slika restorana dobijena sa kolor video kanala, gore desno je slika sa termalnog video kanala, a dole je slika posle fuzije.



Slika 6 – Primer fuzije slike sa dva video kanala multisenzorskog EO sistema (MSIS head), gore levo kolor video kanal, gore desno termalni video kanal, dole slika posle fuzije

Postoje različite tehnike fuzije podataka, poput fuzije na nivou senzora (na najnižem nivou, npr. pojedinačna slika), fuzija na nivou karakteristika, i fuzija na nivou odlučivanja.

Fuzija slike može uključivati tehnike kao što su registracija slike, kalibracija senzora i poravnanje podataka. Fuzija na nivou karakteristika kombinuje izdvojene karakteristike iz različitih senzora (npr. ivice, uglovi, vektori kretanja), često primenom naprednih mehanizama višeslojne fuzije sa unakrsnom pažnjom (engl. *cross-attention*) [24]. Ovo može uključivati tehnike kao što su podudaranje karakteristika, povezivanje podataka i klasifikacija na nivou obeležja. Fuzija na nivou odlučivanja kombinuje odluke ili klasifikacije sa pojedinačnih senzora. Ovo može uključivati tehnike kao što su većinsko glasanje, Bajesov zaključak i Dempster-Šaferova teorija.

Primetno je da se na kolor slici ne uočavaju jasno detalji jer je slikano u sumrak kada su uslovi osvetljenja nepovoljni, dok se na slici sa termalnog kanala ne vidi ništa iza staklenih prozora, jer je prolaz termalnog zračenja kroz staklo zanemarivo malo, dok na slici dobijenoj fuzijom uočavamo detalje sa oba video kanala.

Svaka od ovih metoda ima svoje izazove poput preciznog usaglašavanja podataka sa različitih senzora sa različitim prostornim i vremenskim karakteristikama, ispravno povezivanja podataka sa različitih senzora o istom dronu, računarska složenost obrade podataka sa više senzora i integracije, ili obezbeđivanje tačne kalibracije svih senzora, koje je ključno za efektivnu fuziju podataka.

U današnje vreme napredne tehnike fuzije uključuju algoritme veštačke inteligencije (AI – engl. *Artificial Intelligence*) i mašinskog učenja (ML – engl. *Machine Learning*), kao i Bajesove mreže.

AI/ML algoritmi se mogu koristiti za učenje složenih odnosa između podataka sa različitih senzora i poboljšanje efikasnosti fuzije podataka, dok Bajesove mreže na osnovu probabilističkih grafičkih modela koji mogu predstavljati i rezonovati o nesigurnosti u složenim sistemima, čineći ih veoma pogodnim za aplikacije fuzije podataka.

Fuzija podataka je značajna tehnologija za poboljšanje performansi EO sistema u otkrivanju i praćenju ciljeva. Efikasnim kombinovanjem informacija sa više senzora, ovi sistemi mogu postići poboljšanu svest o situaciji, poboljšanu identifikaciju cilja i robusnije mogućnosti praćenja. Kontinuirano istraživanje i razvoj tehnika fuzije podataka, zajedno sa napretkom u tehnologiji senzora i računarske snage, nastaviće da dovode do značajnih poboljšanja u performansama EO sistema.

2.8 Kalibracija i standardizacija

Kalibracija i standardizacija su od velike važnosti za obezbeđivanje tačnosti, pouzdanosti i interoperabilnosti EO sistema koji se koriste za detekciju i zaštitu protiv bespilotnih letelica u okviru C-UAV sistema. Svrha kalibracija je postizanje što bolje tačnosti, osetljivosti i ponovljivosti, dok je svrha standardizacije postizanje interoperabilnosti, razmene podataka i poređenja performansi.

Kada je reč o kalibraciji, preciznost je bitna da bi se osiguralo da EO sistem dosledno obezbeđuje tačna merenja udaljenosti drona, lokacije, veličine i drugih relevantnih parametara. Osetljivost je bitna da bi EO sistem bio sposoban da detektuje slabo vidljive ili udaljene dronove. Ponovljivost je neophodna da bi EO sistem imao konzistentno ponašanje tokom vremena i pod različitim uslovima okoline.

Koriste se različite metode kalibracije koje se vrše ili prilikom pripreme EO sistema, i eventualno održavanja, ili tokom rada EO sistema. Za kalibraciju u toku pripreme EO sistema koriste se kontrolisana okruženja ili poznati ciljevi za verifikaciju i prilagođavanje performansi EO sistema prema utvrđenim procedurama i standardima. Za kalibraciju tokom rada EO sistema izvršavaju se ugrađena samotestiranja i podešavanja za korekcije unutrašnjih odstupanja i varijacija senzora.

Kalibracija u toku pripreme EO sistema može da obuhvati geometrijske kalibracije i kalibracije vremenske sinhronizacije radi ispravljanja izobličenja u podacima slike ili senzora, kalibracije upravljanja gimbalom, kalibraciju končanica radi usaglašavanja paralelnosti optičkih osa video kanala i laserskog daljinomera, kalibracije dometa uz korišćenje ciljeva na poznatim udaljenostima za kalibraciju daljinomera i drugih sistema za merenje udaljenosti. Ove kalibracije treba obavljati prilikom pripreme EO sistema da bi se obezbedila početna tačnost i pouzdanost, ali i posle svakog velikog održavanja, da bi se proverila performansa EO sistema nakon popravke ili nadogradnje.

Kalibracija tokom rada EO sistema može da obuhvati mnoge od već navedenih kalibracija koje se obavljaju tokom pripreme EO sistema, i često obuhvata kalibraciju magnetnog kompasa za ispravnu orijentaciju sistema u prostoru, kalibraciju fokusa svakog od video kanala i kalibraciju končanica radi usaglašavanja paralelnosti optičkih osa video kanala i laserskog daljinomera. Ove kalibracije se obavljaju periodično tokom upotrebe EO sistema da bi se održala tačnost tokom vremena.

Kada je reč o standardizaciji, interoperabilnost je bitna da bi se omogućilo da različiti EO sistemi različitih proizvođača mogu efikasno da komuniciraju i dele podatke, odnosno da bi se olakšala razmena podataka između različitih sistema i platformi, kao što su zemaljske stanice, komandni centri i drugi senzori. Ne manje bitno je i poređenje performansi, za šta je potrebno uspostavljanje zajedničkih metrika za procenu performansi sistema i poređenje različitih tehnologija.

U okviru standardizacije bitno je definisanje formata podataka, odnosno definisanje standardizovanih formata podataka za izlaze senzora, kao što su koordinate cilja, podaci za praćenje i status senzora, ali i definisanje komunikacionih protokola, radi razmene podataka između različitih sistema. Pored toga definišu se standardizovane metrike performansi, kao što su opseg detekcije, stope lažnih alarma i tačnost praćenja, i standardizovane procedure testiranja za procenu performansi sistema u kontrolisanim uslovima.

Poznati izazovi su dinamička okruženja, mali dronovi velike dinamike, i brz tehnološki napredak. C-UAV detekcija se često dešava u dinamičnim i izazovnim okruženjima, kao što su urbana područja sa složenom pozadinom i promenljivim vremenskim uslovima. Ovo može otežati kalibraciju i standardizaciju. Dronovi su često male fizičke veličine i slabog odraza, uz veliku dinamiku kretanja, što ih čini teškim za otkrivanje i praćenje. Ovo zahteva visoko osetljive i precizne senzore. Brza evolucija C-UAV tehnologije zahteva kontinuirano ažuriranje procedura kalibracije i standardizacije kako bi se održao korak sa novim pretnjama.

Važnost kalibracije i standardizacije kod EO sistema je u postizanju boljih rezultata detekcije, praćenja, klasifikacije i određivanja tačne lokacije drona, čak i u izazovnim uslovima okoline, i u smanjivanju broja lažnih alarma, što podiže efikasnost celog C-UAV sistema.

2.9 Otpornost na smetnje

Otpornost na smetnje predstavlja kritičan faktor za pouzdan i stabilan rad EO sistema koji se koriste u okviru C-UAV arhitektura za detekciju i zaštitu od dronova. Ovi sistemi mogu biti izloženi širokom spektru smetnji, čiji uticaj varira od privremenog smanjenja performansi i generisanja lažnih alarma, pa sve do potpunog otkaza ili kvara sistema. Razumevanje prirode ovih smetnji i implementacija adekvatnih mera zaštite neophodni su za osiguranje operativne spremnosti.

Generalno, smetnje se mogu kategorisati kao elektromagnetne i optičke. Elektromagnetne smetnje se manifestuju u vidu radiofrekventnih interferencija ili kao elektromagnetni impulsi (EMP). Snažni radio signali iz okruženja mogu ometati rad osetljive elektronike unutar EO sistema, uzrokujući pojavu šuma u signalu, narušavanje integriteta podataka ili čak trajna oštećenja hardvera. S druge strane, elektromagnetni impuls predstavlja iznenadni nalet velike količine energije, karakterističan za nuklearne eksplozije ili namerna dejstva EMP oružjem, koji može trenutno uništiti nezaštićene elektronske komponente.

Optičke smetnje, koje obuhvataju i one u termalnom delu spektra, predstavljaju poseban izazov za senzore slike. Odsjaji uzrokovani direktnim ili reflektovanim jarkim svetlom, poput sunčeve svetlosti ili intenzivnog veštačkog osvetljenja, mogu dovesti do zasićenja (saturacije) senzora, čime se onemogućava detekcija ciljeva u delu vidnog polja u kom je došlo do zasićenja senzora. Atmosferski uslovi, kao što su magla, dim, izmaglica, kiša i sneg, deluju kao prirodni

izvori smetnji koji rasipaju i apsorbuju optičko zračenje, drastično smanjujući vidljivost i degradirajući kontrast slike. Pored prirodnih, postoje i veštačke optičke smetnje, namerno izazvane radi obmane (tzv. *jamming* i *spoofing*), gde protivnici koriste laserske zaslepljivače, pirotehničke mamce (baklje) ili dimne zavese kako bi zbunili EO sistem i prekinuli praćenje cilja. Takođe, složena pozadina scene, koja sadrži objekte sa termalnim potpisom sličnim dronu (npr. zagrejane stene, dimnjaci), može maskirati pravi cilj ili generisati lažne detekcije. Promene temperature okoline dodatno utiču na stabilnost parametara senzora, menjajući njihovu osetljivost i tačnost merenja.

U cilju eliminacije ili ublažavanja uticaja navedenih smetnji, primenjuju se različite tehnike zaštite, filtriranja i adaptacije. Elektromagnetna zaštita se realizuje korišćenjem oklopljenih kućišta od provodnih materijala (Faradejev kavez), kao i ugradnjom zaštitnih kola na ulazima napajanja i signala. Zaštita od optičkih smetnji podrazumeva upotrebu mehaničkih pregrada (suncobrana), specijalizovanih optičkih filtara koji propuštaju samo željeni deo spektra, kao i primenu naprednih premaza na optičkim elementima za smanjenje unutrašnjih refleksija.

Filtriranje signala predstavlja ključnu tehniku u digitalnom domenu. Korišćenjem sofisticiranih algoritama za obradu slike i signala, moguće je efikasno izdvojiti korisnu informaciju o cilju iz šuma i pozadinskih smetnji. Filtriranje se vrši u vremenskom, prostornom i spektralnom domenu, pri čemu se, na primer, koriste uskopojasni filtri za izolovanje specifičnih talasnih dužina karakterističnih za drona, čime se potiskuje uticaj sunčeve svetlosti ili drugih izvora zračenja.

Za stabilizaciju radnih parametara senzora, posebno u termalnom opsegu, koriste se sistemi za aktivno hlađenje (npr. termoelektrični hladnjaci ili Stirling mašine). Ovi sistemi održavaju detektor na konstantnoj, niskoj temperaturi, čime se minimizira termalni šum i eliminiše uticaj temperaturnih varijacija okoline na osetljivost sistema.

Pored navedenog, primenjuju se i sistemske mere poput redundantnosti, gde se istovremeno koristi više senzora koji rade u različitim spektralnim opsezima (npr. VIS i LWIR). Ovakav pristup značajno povećava verovatnoću detekcije, jer smetnja koja utiče na jedan deo spektra (npr. magla na VIS kameru) ne mora nužno uticati na drugi (termalna kamera). Takođe, adaptivne tehnike upravljanja, kao što su automatska kontrola pojačanja (AGC – engl. *Automatic Gain Control*) i adaptivno filtriranje, omogućavaju sistemu da u realnom vremenu prilagođava svoje parametre trenutnim uslovima okoline, optimizujući kontrast i dinamički opseg slike.

Zaključno, otpornost na smetnje nije samo poželjna karakteristika, već kritičan zahtev u dizajnu i eksploataciji EO sistema za detekciju i zaštitu od dronova. Samo sinergijom hardverske zaštite, naprednog procesiranja signala, termalne stabilizacije i multisenzorske fuzije moguće je obezbediti pouzdan rad sistema, minimizirati pojavu lažnih alarma i garantovati efikasnu detekciju pretnji u složenim realnim uslovima.

2.10 Optimizacija sistema

Optimizacija EO sistema ima za cilj da maksimizira performanse uz minimiziranje veličine, težine, potrošnje energije i troškova (SWaP-C, engl. *Size, Weight, Power and Cost*). Ključne oblasti fokusa uključuju optički dizajn, optimizaciju detektora i sistema za njihovo hlađenje, algoritme za obradu signala, dizajn gimbala, integraciju sistema, i analizu troškova životnog ciklusa proizvoda.

U okviru optičkog dizajna, radi se o minimiziranju aberacija (sferna aberacija, koma, astigmatizam) za poboljšanje oštrote i rezolucije slike, uz optimizaciju materijala i premaza sočiva za maksimalan prenos u željenom spektralnom opsegu, kao i o projektovanju lakih i kompaktnih optičkih sistema.

Optimizacija detektora podrazumeva izbor odgovarajuće detektorske tehnologije, odnosno tipa detektora (npr. CCD, CMOS, InGaAs, MCT, InSb, T2SL, VOx and amorphous silicon microbolometers) koji najbolje odgovara specifičnoj primeni i zahtevima za performanse. Osim izbora materijala važna je i optimizacija parametara detektora, kao što su veličina piksela, faktor ispunjenja i radna temperatura da bi se maksimizirala osetljivost i smanjio šum.

Za postizanje najviših performansi neophodno je primeniti i tehnike hlađenja, čime se postižu bolje performanse detektora. Efikasni sistemi hlađenja minimiziraju potrošnju energije uz smanjenje šuma detektora, uz održavanje optimalne temperature detektora. Uz sve to mora da se vodi računa i o smanjenju težine i veličine, kako bi se realizovali kompaktni i lagani sistemi za hlađenje.

Optimizacija algoritama za obradu slike ima za cilj poboljšanje kvaliteta slike pomoću tehnika kao što su smanjenje šuma, poboljšanje kontrasta i detekcija ivica. Pored toga razvijaju se i efikasni algoritmi za otkrivanje, praćenje i klasifikaciju ciljeva. Za sve ove algoritme izuzetno je važno da se izvršavaju u realnom vremenu, uz unošenje što manjeg dodatnog kašnjenja u prenosu pokretne slike.

Za dizajn gimbala važno je sa mehaničke strane da se obezbedi minimizacija inercije i trenja kako bi se postigao što bolji odziv i smanjenje vremena zauzimanja zadatog položaja, a sa strane algoritama upravljanja gimbalom implementacija naprednih algoritama upravljanja obezbeđuje tačno i stabilno kretanje.

U okviru integracije sistema uzimaju se u obzir sve navedene stavke i dodatno vodi računa o smanjenju broja interfejsa između podsistema radi poboljšanja pouzdanosti i smanjenja složenosti. Optimizuje se fizički raspored i uklapanje komponenti radi postizanja kompaktnih i laganih rešenja, kako bi se smanjila veličina i težina sistema.

Uzimajući u obzir pojedinačne faktore kao što su troškovi proizvodnje, troškovi održavanja i operativni troškovi tokom životnog veka sistema, optimizuju se ukupni troškovi u toku životnog veka proizvoda.

Koriste se različite tehnike optimizacije, kao što su alati za projektovanje pomoću računara (CAD engl. – *Computer Aided Design*), za optički dizajn, mehanički dizajn i termičku analizu, zatim simulacije i modeliranja, koji se koriste za predviđanje performansi sistema i identifikovanje oblasti za poboljšanje, i različiti algoritmi za optimizaciju, npr. genetski algoritmi, Bajesova optimizacija, optimizacija rojeva čestica, metode gradijentnog spuštanja, simulirano kaljenje, da bi se pronašli optimalni parametri dizajna EO sistema.

Izbor algoritma optimizacije zavisi od specifičnog problema, složenosti sistema i raspoloživih računarskih resursa. Problemi optimizacije često uključuju ograničenja (npr. veličina, težina, ograničenja snage). Odabrani algoritam mora biti u stanju da se efikasno nosi sa ovim ograničenjima. Definisanje odgovarajuće funkcije koja tačno odražava željene performanse sistema je ključno za uspešnu optimizaciju. Optimizacija je kritičan aspekt dizajna EO sistema. Pažljivim razmatranjem svih aspekata sistema i primenom naprednih tehnika optimizacije, moguće je razviti visoko efikasne i efektivne sisteme koji ispunjavaju složene zahteve savremenih aplikacija.

2.11 Veštačka inteligencija (mašinsko učenje)

Veštačka inteligencija (AI, engl. *Artificial Intelligence*) uvodi potpuno novu paradigmu u oblast detekcije i praćenja ciljeva u okviru elektro-optičkih (EO) sistema, nudeći značajan kvalitativni napredak u odnosu na tradicionalne metode obrade signala. U kontekstu EO sistema, oblasti u kojima primena AI ostvaruje najznačajniji uticaj obuhvataju detekciju i prepoznavanje objekata, praćenje ciljeva, otkrivanje anomalija, kao i adaptaciju sistema u realnom vremenu na promenljive uslove okruženja.

Konvolucione neuronske mreže (CNN – engl. *Convolutional Neural Networks*) predstavljaju kamen temeljac savremenih rešenja za detekciju objekata zasnovanih na veštačkoj inteligenciji u slikama dobijenim sa EO senzora. CNN arhitekture su izuzetno efikasne u identifikaciji složenih obrazaca i karakteristika unutar digitalnih slika, omogućavajući precizno otkrivanje i klasifikaciju širokog spektra ciljeva. Ovo uključuje vozila (automobili, kamioni, tenkovi), letelice (avioni, helikopteri, dronovi, projektili), plovila, kao i osobe. Pored bazične detekcije prisustva objekta, CNN modeli su sposobni da klasifikuju objekte u specifične potkategorije (npr. identifikacija tipa drona, marke vozila ili modela letelice), čime se značajno povećava svest o situaciji i omogućava informisanije donošenje odluka u kritičnim trenucima. Ovo uključuje arhitekture za detekciju u realnom vremenu poput najnovijih iteracija YOLO modela [25], kao i RT-DETR arhitekture zasnovane na transformatorima, koje prevazilaze ograničenja CNN-a u brzini i tačnosti [26].

Pored detekcije, CNN se sve više koriste i za unapređenje algoritama za praćenje ciljeva. Jedan od istaknutih primera je algoritam *DeepSORT* [27], koji kombinuje ekstrakciju vizuelnih karakteristika izgleda cilja pomoću CNN-a sa klasičnim Kalmanovim filtriranjem, a u novije vreme i pristupi bazirani na vizuelnim promptovima za višemodalno praćenje [28]. Ovakav hibridni pristup omogućava robusno praćenje, jer koristi CNN za izdvajanje jedinstvenih vizuelnih potpisa (deskriptora) koji omogućavaju tačnu ponovnu identifikaciju (re-identifikaciju) drona čak i nakon privremenog gubitka vizuelnog kontakta ili okluzije.

9 Za modeliranje vremenske dinamike kretanja cilja, posebno su pogodne rekurzivne neuronske mreže (RNN – engl. *Recurrent Neural Networks*), a naročito njihova potklasa – mreže sa dugom kratkotrajnom memorijom (LSTM – engl. *Long Short-Term Memory*). LSTM mreže su u stanju da efikasno uče i predviđaju putanje kretanja na osnovu sekvenci prethodnih položaja, omogućavajući preciznije praćenje ciljeva koji izvode složene manevre i nagle promene pravca, što je karakteristično za moderne dronove.

U scenarijima gde je prisutno više ciljeva, primenjuju se specijalizovani AI algoritmi za praćenje više objekata istovremeno (MOT – engl. *Multi-Object Tracking*). Ovi algoritmi uspešno rešavaju izazove kao što su asocijacija podataka (povezivanje detekcija istog objekta kroz niz frejmova) i okluzija, obezbeđujući konzistentno praćenje svakog pojedinačnog drona u roju.

Značajna primena AI ogleda se i u mogućnosti učenja bez nadzora (engl. *Unsupervised Learning*), gde se algoritmi obučavaju da identifikuju neobične ili anomalne događaje u video strimu sa EO sistema, uključujući i temporalne anomalije za efikasnu detekciju dronova [29]. Ovo može uključivati detekciju neovlašćenih upada u štićene zone, prepoznavanje sumnjivih obrazaca ponašanja (kao što su lutanje ili neuobičajeno brzi pokreti), ili čak detekciju neispravnosti same opreme prepoznavanjem anomalija u radu senzora.

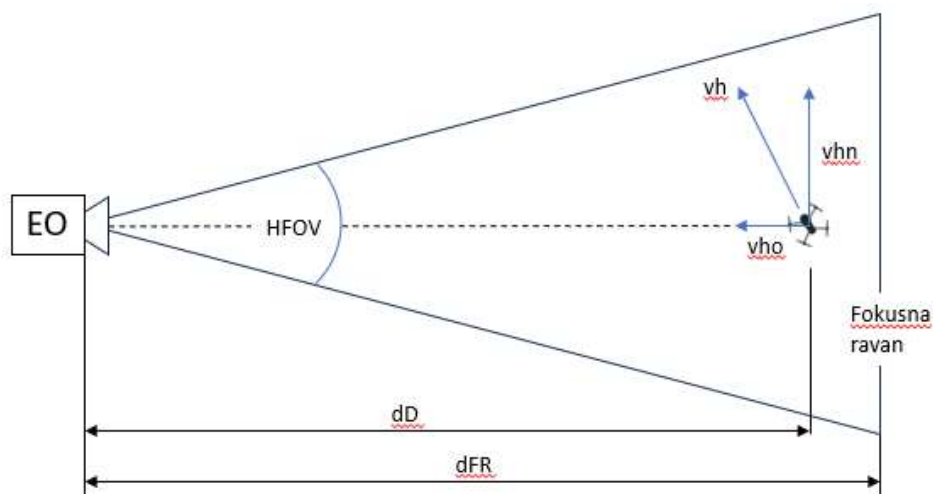
Jedna od ključnih prednosti AI algoritama je njihova sposobnost adaptacije. Oni se mogu prilagoditi promenljivim uslovima okoline, kao što su varijacije u osvetljenju, vremenske neprilike ili promene u pozadini scene. Takođe, primenom koncepta učenja iz iskustva (engl. *Learning from Experience*), algoritmi veštačke inteligencije mogu kontinuirano da uče iz prošlih događaja (npr. analizom uspešnih i neuspešnih detekcija), čime se vremenom poboljšavaju njihove performanse i smanjuje stopa lažnih alarma.

Iako primena veštačke inteligencije donosi brojne benefite, ona nije bez izazova. Najveće prepreke predstavljaju potreba za značajnom procesorskom snagom za izvršavanje kompleksnih modela u realnom vremenu, generalni izazovi u detekciji malih objekata [30], kao i potreba za velikim, kvalitetnim i raznovrsnim skupovima podataka sa anotiranim dronom (poput *VisDrone* i *VisioDECT* baza) za obučavanje algoritama [31, 32]. Ipak, kada se uspešno implementira, veštačka inteligencija omogućava znatno viši nivo autonomije u otkrivanju i praćenju ciljeva korišćenjem EO sistema, uz postizanje superiorne preciznosti i robusnosti u odnosu na konvencionalna rešenja.

3 Predmet istraživanja

U prethodnom poglavlju opisane su karakteristike multi-senzorskih EO sistema koji se koriste za rano otkrivanje dronova, s osvrtom na relevantna područja istraživanja i uticaje okoline. Cilj ovog istraživanja je kreiranje naprednog rešenja za praktičnu implementaciju multi-senzorskog EO sistema za rano otkrivanje dronova, koje sadrži izmene u dizajnu sistema, uključujući realizaciju nove metode upravljanja ovim sistemom, kao i analizu i eventualna unapređenja u dizajnu zaštitnih optičkih prozora. Kao rezultat ovog rada ostvariće se mogućnost detekcije dronova na većoj udaljenosti, uz veću uspešnost detekcije, što podrazumeva veću verovatnoću ispravne detekcije, uz manju verovatnoću lažne detekcije. Takođe, cilj je da se postigne veća robusnost i duži životni vek celog sistema, odnosno bolja i dugovečnija performansa sistema, uz sporiju degradaciju performansi u uslovima nepovoljnih uticaja sredine.

U okviru ovog istraživanja biće reči o nekim od izazova koji postoje u realizaciji EO sistema za rano otkrivanje dronova, zbog kojih se postižu efektivno nedovoljno veliki dometi uspešne detekcije, praćenja i klasifikacije drona. Tu se pre svega misli na adekvatno usmeravanje EO sistema ka dronu na osnovu inputa sa drugih senzora, zatim podešavanje adekvatnih vidnih uglova i fokusne ravni pri tom usmeravanju, kako bi se ostvarilo uspešno praćenje drona, uspešno merenje udaljenosti radi određivanja tačnog položaja u prostoru i uspešna klasifikacija tipa drona. Pored toga analiziraće se neka postojeća rešenja EO sistema sa stanovišta korišćenja zaštitnih optičkih prozora, u svrhu unapređenja efektivnih dometa i robusnosti. Na Slika 7 dat je pojednostavljen shematski prikaz EO sistema i posmatranog drona u horizontalnoj ravni, gde je naglašen vektor brzine kretanja drona (v_h) sa projekcijama na osu usmerenu ka EO sistemu (v_{ho}) i na normalu na tu osu (v_{hn}). Naznačeni su i horizontalni vidni ugao (HFOV), položaj fokusne ravni i njena udaljenost od EO sistema (d_{FR}), kao i udaljenost drona od EO sistema (d_D).



Slika 7 – Shematski prikaz EO sistema i posmatranog drona u horizontalnoj ravni, v_h - vektor brzine kretanja drona, v_{ho} - projekcija na osu usmerenu ka EO sistemu, v_{hn} – projekcija na normalu na tu osu, i d_{FR} – udaljenost fokusne ravni, udaljenost drona

3.1 Opis problema

Iako su multi-senzorski EO sistemi značajno napredovali, izazovi u postizanju optimalnih performansi, posebno u kompleksnim i dinamičnim okruženjima, i dalje postoje. Neki od primarnih problema uključuju malu efektivnu veličina dronova, njihovu izuzetno promenljivu dinamiku kretanja, smetnje iz okoline i ograničen pristup skupovima podataka za treniranje AI algoritama, što sve zajedno dovodi do nedovoljno velikih dometa uspešne detekcije, praćenja i klasifikacije drona.

Dronovi o kojima je reč su male fizičke veličine, ali ovde treba imati u vidu i njihov različit odraz u različitim delovima spektra, i u različitim uslovima okoline, poput atmosferskih prilika, osvetljenja (bilo prirodnog ili veštačkog), ili pozadine. U infracrvenom opsegu njihova emisija zračenja zavisi od konstrukcije, materijala, vrste pogona, brzine kretanja. Dinamika im je veoma promenljiva, od toga da mogu da lebde u vazduhu bez kretanja, preko toga da mogu da se kreću velikim brzinama, do toga da mogu izuzetno brzo da promene vektor brzine kretanja. Smetnje iz okruženja se ogledaju u nepovoljnim vremenskim uslovima, kao što su magla, kiša i atmosferska turbulencija, koji dodatno smanjuju performanse detekcije. Sve to ih čini veoma teškim za detekciju.

Razumevanje interakcije optičkog elektromagnetnog zračenja sa različitim materijalima je ključno za efikasan dizajn i rad EO sistema. U okviru problematike detekcije drona neophodno je pomenuti značaj studija koje su obavljene u svrhu izučavanja potpisa scene [17, 33, 34], u okviru kojih su opisani različiti vidovi interakcije elektromagnetnog zračenja sa materijom, kao što su refleksija, refrakcija, rasipanje, difrakcija, interferencija, emisija, transmisija i polarizacija. Od navedenih vidova interakcije elektromagnetnog zračenja sa materijom od najvećeg značaja sa stanovišta materijala od kojih je sačinjen dron su refleksivnost i emisivnost.

Karakteristike refleksivnosti i emisivnosti značajno variraju u elektromagnetnom spektru, i direktno utiču na uspešno otkrivanje, praćenje i klasifikaciju drona. Spektralni potpis drona opisuje njenu refleksivnost i emisivnost na različitim talasnim dužinama. Ovaj potpis je jedinstven za svaki materijal i pruža vredne informacije za identifikaciju cilja. Refleksivnost predstavlja odnos odbijenog zračenja od površine materijala, i upadnog zračenja, dok je emisivnost odnos zračenja koje emituje materijal i zračenja koje emituje crno telo na istoj temperaturi. Crno telo je idealan objekat koji apsorbuje svu upadnu radijaciju i emituje maksimalno moguće zračenje za datu temperaturu.

U Tabela 3 je dat pregled refleksije i emisivnosti različitih materijala za delove optičkog spektra od VIS do LWIR, odnosno VIS (0.4-0.7 μm), SWIR (0.7-2.5 μm), MWIR (3-5 μm), LWIR (8-14 μm).

Tabela 3 – Pregled refleksije i emisivnosti različitih materijala za delove optičkog spektra od VIS do LWIR (prilagođeno prema [33, 34])

2

Materijal	VIS (0.4-0.7 μm)	SWIR (0.7-2.5 μm)	MWIR (3-5 μm)	LWIR (8-14 μm)	Napomene
Metali	Visoka refleksivnost	Visoka refleksivnost	Niska emisivnost	Niska emisivnost	Visoka refleksivnost u vidljivom i bliskom IR spektru. Niska emisivnost u srednj. i dalekom IR.
Vegetacija	Promenljiva refleksivnost (zelena, zelena, braon)	Jaki apsorpcioni pojasevi (npr. voda, hlorofil)	Niska emisivnost	Niska emisivnost	Karakteristični apsorpcioni pojasevi u SWIR oblasti.
Zemljište	Promenljiva refleksivnost (braon, bež)	Umerena refleksivnost	Niska emisivnost	Niska emisivnost	Refleksivnost zavisi od vrste zemljišta (pesak, glina), vlažnosti i drugih faktora.
Voda	Visoka refleksivnost (plava, zelena)	Jaki apsorpcioni pojasevi	Niska emisivnost	Niska emisivnost	Visoka refleksivnost u vidljivom delu spektra, jaka apsorpcija u SWIR oblasti.
Ljudska koža	Promenljiva refleksivnost (puten, braon)	Umerena refleksivnost	Umerena emisivnost	Umerena emisivnost	Emisivnost varira u zavisnosti od temperature kože.
Klastične (terigene) stene	Varijabilna refleksivnost (siva, braon)	Umerena refleksivnost	Niska emisivnost	Niska emisivnost	Refleksivnost zavisi od mineralogije i veličine zrna.
Karbon	Niska refleksivnost	Niska refleksivnost	Niska emisivnost	Niska emisivnost	Visoka apsorpcija u širokom spektralnom opsegu.
Plastika	Varijabilna refleksivnost (ovisno o pigmentu)	Umerena refleksivnost	Niska emisivnost	Niska emisivnost	Refleksivnost i emisivnost ovise o vrsti plastike i dodacima.

Osim samog materijala na refleksivnost i emisivnost značajno utiče i njegova tekstura, pa tako glatke površine imaju veću refleksivnost, a grube površine imaju manju refleksivnost, dok je kod emisivnosti situacija obrnuta, pa glatke površine imaju nižu emisivnost, a grube površine usled veće površine koja emituje zračenje imaju višu emisivnost.

Napredni multi-senzorski EO sistemi sadrže objektivne sa kontinualno promenljivim uglovima posmatranja scene, te pružaju mogućnost da se posmatra širok prostor, kada se koriste široki uglovi posmatranja, da se posmatra uzak prostor, kada se koriste uski uglovi posmatranja, ili nešto između, ali ne u isto vreme. Izbor odgovarajućeg ugla u odgovarajućem trenutku je od velikog značaja za uspešno funkcionisanje EO sistema.

Upravo ta činjenica je ograničavajući faktor koji pored navedene fleksibilnosti otežava uspešnu ranu detekciju dronova, jer kada se posmatra scena sa širokim uglom, efektivan broj piksela na dronu je mali, i samim tim domet detekcije je mali, dok sa druge strane kada se scena posmatra sa uskim uglom, efektivan broj piksela na dronu je veliki, i samim tim domet detekcije je veliki, ali uzak ugao posmatranja omogućava taj veliki domet samo u uskom području koje se trenutno posmatra sa tim uskim uglom.

Na Slika 8 prikazani su primeri slika sa termalnog video kanala sa različitim vidnim uglovima, od širokog, gore levo, do uskog, dole desno.



Slika 8 – Primeri slika sa termalnog video kanala posmatranja iste scene sa različitim vidnim uglovima, od širokog, gore levo, do uskog, dole desno

Zbog navedenog, uobičajeno je da se multi-senzorski EO sistemi koriste u sprezi sa drugim senzorima, kao što su radari, ili panoramske kamere kao primarni detektori koji daju inicijalne koordinate za usmeravanje multi-senzorskog EO sistema. To inicijalno usmeravanje obično ima određenu grešku, a dodatno potrebno je neko vreme da se sistem usmeri ka zadatim inicijalnim koordinatama, dok za to vreme dron može značajno da promeni položaj u prostoru. Postoji izazov da se multi-senzorski EO sistem usmeri sa što manjim uglom posmatranja, kako bi domet detekcije bio što veći, ali u što kraćem vremenu, i sa što manjom greškom, kako bi dron i dalje bila u vidnom polju. Izazov je tim veći što se dron kreće većom brzinom, ali zavisi i od relativnog ugla kretanja u odnosu na osu posmatranja. Posmatra se najgori slučaj, odnosno

ukoliko je kretanje drona po pravcu normalno u odnosu na osu posmatranja, dron će preći put od centra scene do ivice scene i izaći iz ugla posmatranja za vreme t dato jednačinom (3):

$$t = dD \cdot \frac{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{vhn} \quad (3)$$

gde je:

dD - rastojanje drona,

vhn - brzina kretanja drona u horizontalnoj ravni normalno na pravac posmatranja, i

α – horizontalni ugao posmatranja HFOV.

Gledajući Slika 7 to bi značilo da je $v_{ho} = 0$, i $v_h = v_{hn}$. Dakle, što je ugao posmatranja HFOV manji to će dron pre izaći iz scene na koju je sistem usmeren i koja se posmatra, pa samim tim detekcija i praćenje tog drona neće biti moguće.

Sa druge strane, ukoliko se EO sistem usmeri na drona sa širim uglom posmatranja HFOV, u tom slučaju dron je u slici efektivno manji, odnosno broj piksela na dronu (PoT – engl. *Pixel on Target*) će biti manji, kao što može da se vidi na Slika 8. U svakom slučaju težnja je ka tome da se EO sistem usmeri na drona u što kraćem mogućem vremenu i time se omogući izbor užeg ugla HFOV.

Osim što je za uspešnu detekciju, praćenje i klasifikaciju dronova povoljnije da broj piksela na dronu bude što veći, bitno je i da ti pikseli budu u fokusu, u suprotnom drona će teško biti razaznati u odnosu na okolinu, odnosno pozadinu. Ako posmatramo neki EO sistem koji ima već definisane ključne komponente poput detektora, optike i algoritama obrade signala, parametar čijim izborom možemo značajno da utičemo na jasnoću slike, odnosno da dron bude u fokusu, jeste izbor udaljenosti fokusne ravni dFR .

3.2 Metodologija istraživanja

U okviru ovog istraživanja predviđeno je da se prvo izvrši teoretsko razmatranje problema uvidom u literaturu iz oblasti specijalizovanih elektro-optičkih sistema i potencijalnih rešenja. Zatim bi se definisao model u kome bi se obuhvatile ključne komponente sistema i odredili parametri kojima možemo da utičemo na performanse sistema za rano otkrivanje nisko letećih dronova. Za simulaciju termalnih performansi korišćen je NVThermIP/NV-IPM, za atmosfersku transmisiju MODTRAN, a za modelovanje upravljačkih petlji MATLAB/Simulink. Kroz ove simulacije prati se uticaj parametara sistema i okruženja u kome je sistem implementiran na domete otkrivanja cilja. Na kraju je predviđeno da se dobijeni rezultati potvrde kroz eksperimentalni pristup. U ovoj fazi biće korišćen multisenzorski sistem sa više kamera osetljivim u različitim spektralnim opsezima, sa primenjenim algoritmima praćenja nisko

letećih dronova i klasifikacije cilja kao i primenjenom novom metodom za upravljanje EO sistemom.

Teoretsko razmatranje će uključiti analizu uticaja pojedinih komponenti na ukupnu performansu sistema, kroz analizu MTF (engl. *Modulation Transfer Function*), i kriterijuma za određivanje dometa korišćenjem vrednosti PoT (engl. *Pixel on Target*). U ovoj analizi će se odrediti optimalna arhitektura sistema, izbor detektora i karakteristike optičkog sistema koji će biti upotrebljeni za dalje faze istraživanja. Takođe, biće razmatrana teorijska ograničenja koja se postavljaju prilikom ispunjenja očekivanog zadatka, detekcije nisko letećih dronova, a koje ne potiču od EO sistema, već od drugih uticaja, kao što su uticaj propagacije kroz atmosferu i karakteristike posmatranog objekta.

Modeliranje sistema mora da obuhvati kompletan lanac koji uključuje komponente EO sistema i drugih uticaja, ali i način upravljanja EO sistemom i izbor odgovarajućih parametara. Bitno je definisati kriterijum za određivanje detekcije nisko letećih dronova, koji predstavlja poseban izazov u EO sistemima koji koriste napredne algoritme za automatsku detekciju koji su bazirani na primeni neuralnih mreža. Potrebno je obratiti pažnju na selekciju podataka za obučavanje ovakvih algoritama kako bi kriterijum mogao da se primeni sa velikom verovatnoćom detekcije /klasifikacije. Kroz simulaciju doći će se do određenih rezultata koji treba da dovedu do robusnog i efikasnog rešenja za upravljanje EO sistemom radi rane detekcije malih, niskoletećih dronova.

Rezultate dobijene kroz prethodne korake teorijske analize, modeliranje i simulacije eksperimentalno će biti potvrđeni u terenskim uslovima korišćenjem dostupne opreme.

3.3 Predloženo rešenje

Predloženo rešenje opisanog problema ranog otkrivanja dronova zasniva se na definisanju nove metode za upravljanje EO sistemom, kao i na implementaciji unapređenja u dizajnu zaštitnih optičkih prozora. Cilj je poboljšanje sposobnosti ranog otkrivanja, sa posebnim fokusom na detekciju, praćenje i identifikaciju malih, niskoletećih dronova.

Ukupna performansa EO sistema zavisi i od primenjenog AI algoritma za klasifikaciju dronova, ali s obzirom da je ovde reč o malim dronovima, AI algoritmi će biti uspešniji u slučajevima kada je broj piksela na dronu veći, tako da će se za poređenje performansi EO sistema koristiti PoT kriterijum.

Analiza će se sprovesti na VIS video kanalu (kolor slika, Full HD format) i na termalnom video kanalu (MWIR spektralni opseg). Oba kanala su montirana na istom gimbalu radi zajedničkog usmeravanja, a svaki poseduje upravljivi objektiv sa promenljivim vidnim uglom i upravljivim rastojanjem fokusne ravni. S obzirom na to da ukupna performansa sistema zavisi i od

primenjenog AI algoritma, a da su AI algoritmi efikasniji kada je broj piksela na meti (dronu) veći, za poređenje performansi EO sistema koristiće se PoT (Pixel on Target) kriterijum, što je u savremenoj literaturi prepoznato kao adekvatnija metrika za algoritamsku akviziciju ciljeva u poređenju sa tradicionalnim frekvencijskim NV-IPM modelima [35].

Na osnovu nove metode, EO sistem će biti osposobljen da se automatski usmeri ka dronu na najbrži mogući način, uzimajući u obzir predikciju kretanja cilja. Sistem će odabrati najpovoljnije uglove posmatranja uz odgovarajući izbor rastojanja fokusne ravni i dinamički ih menjati kako bi se postigla bolja pouzdanost klasifikacije. Adaptivna promena vidnog ugla realizovaće se na osnovu podataka sa slike tako da se maksimizuje PoT, a da se istovremeno ne naruši uspešnost praćenja drona. Paralelno sa promenama vidnih uglova, vršiće se precizno podešavanje rastojanja fokusne ravni kako bi slika ostala oštra.

3.4 Očekivani rezultati

Kao rezultat rada u okviru ovog istraživanja, očekuje se postizanje nekoliko ključnih rezultata, pre svega poboljšanje performansi detekcije, praćenja i identifikacije malih dronova, kao i povećana robusnost i pouzdanost celokupnog EO sistema.

U domenu poboljšanja performansi, očekuje se da će EO sistem, zahvaljujući primenjenoj metodi upravljanja i optimizovanim zaštitnim prozorima, biti u mogućnosti da sa znatno većom verovatnoćom uspešno detektuje, prati i identifikuje dron ka kojem je inicijalno usmeren (na osnovu podataka sa eksternog senzora). Predviđa se da će sistem omogućiti stabilno praćenje i klasifikaciju na većim udaljenostima nego što je to slučaj kod postojećih rešenja. Dodatno, zahvaljujući pažljivom izboru materijala i dizajna zaštitnih prozora, očekuje se povećanje pouzdanosti i raspoloživosti sistema u različitim vremenskim uslovima i okruženjima.

4 Predlog unapređenja elektro-optičkih sistema

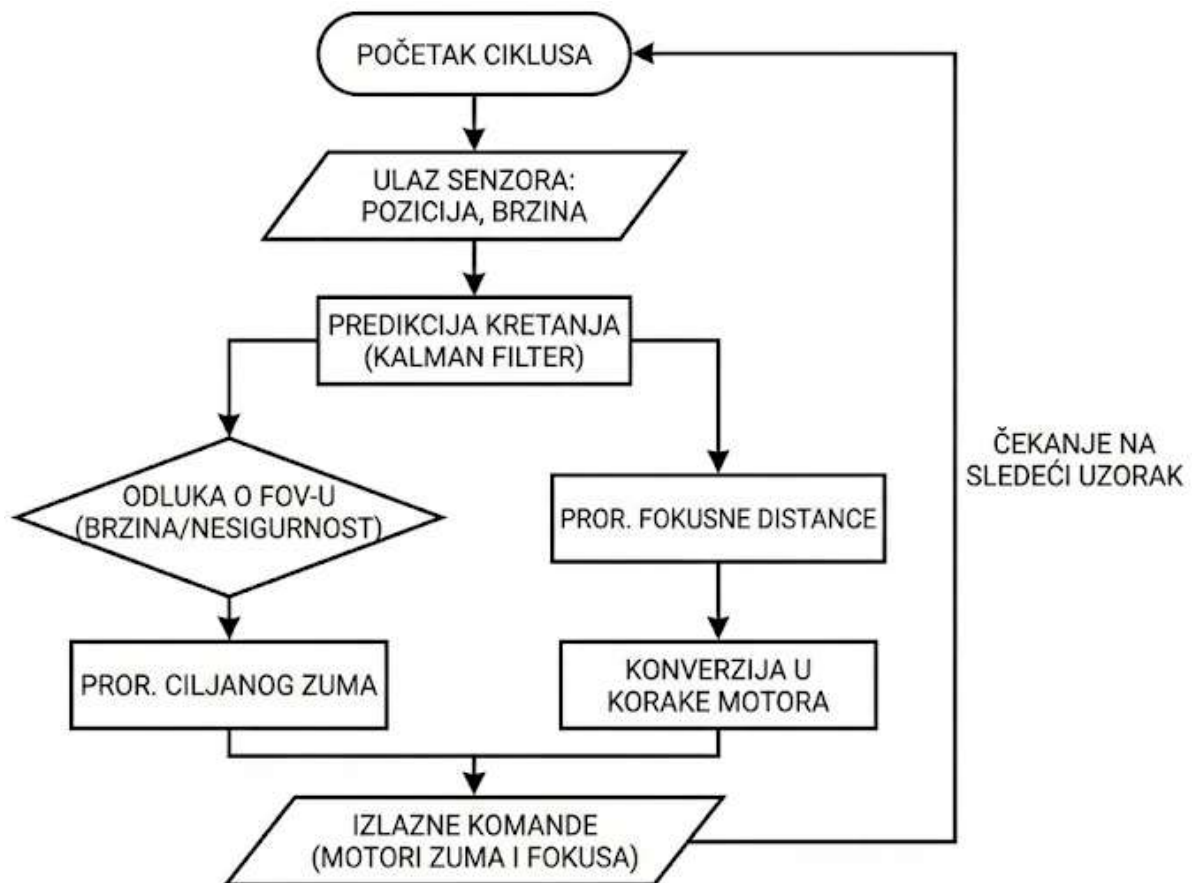
Ovo poglavlje detaljno razrađuje predlog unapređenja elektro-optičkih sistema fokusirajući se na dva kritična aspekta identifikovana u prethodnoj analizi: aktivno upravljanje optičkim parametrima i pasivnu zaštitu senzora. Predloženo rešenje integriše novi algoritam za adaptivno upravljanje vidnim poljem i fokusom sa optimizovanim dizajnom zaštitnih optičkih prozora, čime se direktno adresiraju izazovi detekcije malih, brzih ciljeva u realnim eksploatacionim uslovima.

4.1 Nova metoda upravljanja

Predložena metoda upravljanja predstavlja suštinsku inovaciju koja teži prevazilaženju ograničenja statičnih ili manuelnih režima rada. Algoritam za adaptivno upravljanje zasniva se na dinamičkoj promeni vidnog ugla (FOV) koja je direktno spregnuta sa algoritmima za praćenje (tracking). Za razliku od jednostavnog prebacivanja između "širokog" i "uskog" polja, predviđa se kontinualna ili višestepena adaptacija. Ključni mehanizam oslanja se na prediktivne podatke o kretanju drona dobijene iz algoritama kao što je Kalmanov filter. U situacijama kada se predvidi nagla promena vektora brzine ili nestabilno praćenje, sistem automatski širi vidno polje kako bi zadržao dron u vidnom polju senzora. Čim se praćenje stabilizuje, FOV se progresivno sužava kako bi se maksimizovao broj piksela na meti (PoT), čime se omogućava efikasnija klasifikacija i identifikacija. Sa većim brojem piksela na meti maksimalni domet detekcije se povećava.

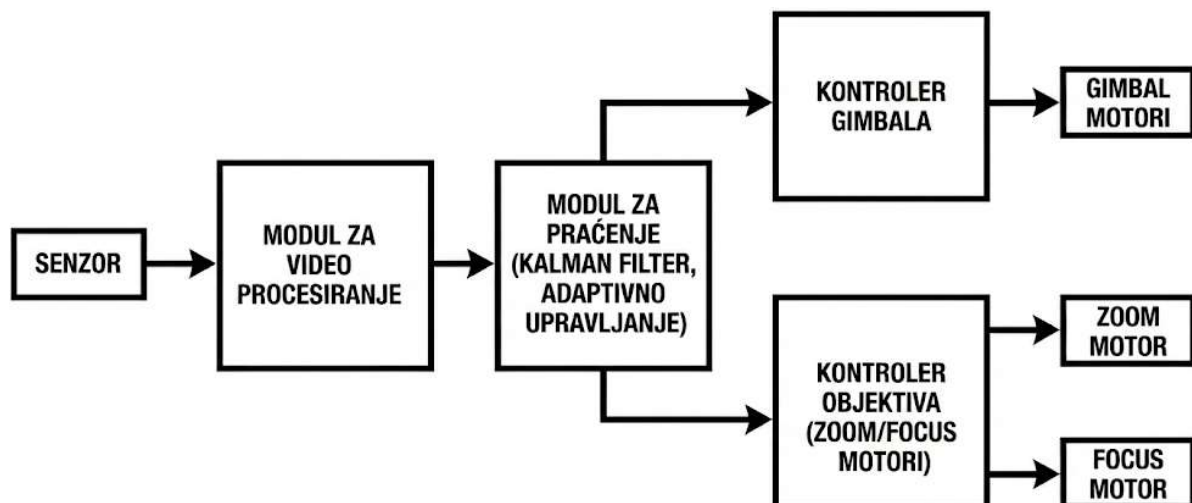
Paralelno sa promenom vidnog ugla, ključno je rešiti problem plitke dubinske oštine karakteristične za velike fokusne dužine. Metoda podrazumeva sinhronizovanu promenu položaja fokusne ravni u realnom vremenu. Umesto oslanjanja na spore, pasivne autofokusne sisteme koji analiziraju kontrast slike, predlaže se korišćenje determinističkog pristupa. Na osnovu preciznih podataka o udaljenosti drona (dobijenih od laserskog daljinomera ili radara) i trenutne pozicije zum motora objektiva, sistem proračunava i momentalno postavlja fokus motor objektiva u optimalan položaj, osiguravajući oštrinu slike drona tokom celog procesa zumiranja.

Struktura i tok odvijanja predložene metode vizuelno su prikazani na sledećem dijagramu na Slika 9:



Slika 9 – Dijagram toka algoritma za adaptivno upravljanje vidnim poljem (FOV) i fokusom

Arhitektura sistema koja omogućava implementaciju ove metode prikazana je na blok šemi ispod na Slika 10. Jasno su naznačene veze između modula za praćenje, kontrolera gimbala i kontrolera objektiva, čime se obezbeđuje niska latencija u zatvorenoj petlji upravljanja.



Slika 10 – Blok šema arhitekture sistema

Matematički model koji povezuje brzinu drona, udaljenost i optimalni FOV definisan je skupom jednačina, koje omogućavaju proračun graničnih vrednosti vidnog ugla pri kojima je moguće

održati stabilno praćenje. Model je dizajniran da balansira između kinematičke stabilnosti (da dron ne "pobegne" iz kadra) i optičke rezolucije (da dron bude prepoznatljiv), i pojednostavljen je na horizontalnu ravan u kojoj se nalaze EO sistem i dron.

- Nejednačina (4): Uslov dinamičke stabilnosti (Kinematički limit):

Nejednačina (4) egzaktno definiše maksimalnu dozvoljenu ugaonu brzinu bespilotne letelice (ω_{max}) pri kojoj elektro-optički sistem zadržava sposobnost kontinualnog i stabilnog praćenja. Kvantitativno, navedeni kinematički uslov predstavlja superpoziciju maksimalne ugaone brzine koju aktuatori pozicionera (gimbala) mogu hardverski da kompenzuju i geometrijske margine stabilnosti. Pomenuta margina je direktno determinisana trenutnom širinom vidnog polja (FOV) i ima kritičnu ulogu u tolerisanju prostornog odstupanja cilja tokom vremena odziva celokupne upravljačke petlje.

$$\omega_{max} \leq \omega_{gimbal} + \frac{\theta_{FOV} \cdot (1 - \sigma)}{2 \cdot t_{lat}} \quad (4)$$

Definicija promenljivih:

- ω_{max} [°/s]: Maksimalna dozvoljena ugaona brzina drona (ili relativna ugaona brzina drona) pri kojoj se ne gubi praćenje.
- ω_{gimbal} [°/s]: Maksimalna brzina odziva (slew rate) gimbala.
- θ_{FOV} [°]: Trenutni horizontalni vidni ugao (Field of View).
- t_{lat} [s]: Ukupna latencija sistema (vreme obrade slike + kašnjenje kontrolne petlje).
- σ [0 – 1]: Faktor sigurnosne margine (npr. 0.2 znači da se koristi efektivno 80% širine kadra pre nego što se sistem smatra nestabilnim).
 - *Napomena:* Delilac 2 se koristi jer se pretpostavlja da je dron centriran, pa je dozvoljeno pomeranje samo do ivice (polovina FOV-a).

- Jednačina (5): Optimalni FOV za klasifikaciju (Optički zahtev):

Ova jednačina (5) uspostavlja analitički model za proračun optimalnog vidnog ugla (θ_{opt}). Njena primena obezbeđuje neophodnu prostornu rezoluciju projekcije cilja na senzorskoj matrici, izraženu kroz zahtevani broj piksela po meti (engl. *Pixels on Target - PoT*), za bilo koju definisanu operativnu udaljenost. Ispunjenje ovog optičkog kriterijuma predstavlja osnovni preduslov za pouzdano izdvajanje obeležja i uspešno funkcionisanje algoritama za automatsku klasifikaciju bespilotnih letelica. Sam model je matematički utemeljen na principima perspektivne projekcije, primenom standardne aproksimacije kamere sa otvorom (engl. *pinhole camera model*).

$$\theta_{opt} = 2 \cdot \arctan \left(\frac{W_{dron}}{2 \cdot N_{POT} \cdot D} \cdot R_{senzor} \right) \quad (5)$$

Definicija promenljivih:

- θ_{opt} [°]: Optimalni vidni ugao koji treba postaviti (zoom nivo).
- W_{dron} [m]: Karakteristična fizička dimenzija drona.
- R_{senzor} [px]: Horizontalna rezolucija senzora kamere (ukupan broj piksela po širini).
- D [m]: Trenutna udaljenost do drona.
- N_{POT} [px]: Zahtevani broj piksela na meti (Pixels on Target).
 - *Kontekst:* Za detekciju je obično potrebno 3-4 px, dok je za klasifikaciju potrebno 10-13 px ili više (prema Johnsonovim kriterijumima [36]).

Zaključak matematičkog modela: Sistem ograničenja i optimizacioni kriterijumi

Prezentovani sistem relacija ukazuje na inženjerski kompromis (engl. *trade-off*) pri projektovanju sistema za praćenje ciljeva u vazдушnom prostoru:

- Kinematički uslov (nejednačina (4)) favorizuje primenu šireg vidnog ugla (veće vrednosti parametra θ). Ovakva optička konfiguracija maksimizuje marginu stabilnosti i povećava robusnost sistema na visokodinamičke manevre i nagle promene putanje bespilotne letelice.
- Optički zahtev (jednačina (5)) nameće potrebu za užim vidnim poljem (manje vrednosti parametra θ). Cilj ovog ograničenja je obezbeđivanje adekvatne prostorne rezolucije projekcije cilja (zahtevani broj piksela po meti), što je neophodno za uspešnu ekstrakciju obeležja i klasifikaciju na većim operativnim udaljenostima.

Shodno navedenom, primarni zadatak predloženog algoritma adaptivnog upravljanja jeste kontinuirano rešavanje ovog optimizacionog problema. Kontrolna logika mora u realnom vremenu odrediti onu vrednost vidnog ugla (θ) koja striktno ispunjava optički kriterijum definisan jednačinom (5), uz imperativni uslov da se ne naruši granica dinamičke stabilnosti propisana nejednačinom (4).

- Maksimalna tangencijalna brzina cilja u stacionarnom stanju (engl. *Steady-state*) - jednačina (6):

Da bi se uspostavila direktna korelacija između ugaonih ograničenja elektro-optičkog sistema i linearnih kinematičkih karakteristika cilja, neophodno je prevesti maksimalnu ugaonu brzinu praćenja u linearni domen.

Matematičko izvođenje ove jednačine oslanja se na osnovni kinematički zakon kružnog kretanja, prema kojem je linearna (tangencijalna) brzina objekta jednaka proizvodu njegove

ugaone brzine (izražene u radijanima po sekundi) i radijusa rotacije. U kontekstu praćenja bespilotnih letelica, radijus rotacije predstavlja trenutnu udaljenost od senzora do cilja.

S obzirom na to da je maksimalna tolerisana ugaona brzina sistema ($\omega_{\max}$) prethodno izvedena i definisana u stepenima u sekundi [$^{\circ}/s$], njeno uvođenje u linearnu jednačinu zahteva primenu faktora konverzije u radijane (množenje sa $\pi/180$). Integraljenjem ovih parametara, dobija se konačni analitički izraz za maksimalnu tangencijalnu brzinu pri kojoj sistem zadržava sposobnost stabilnog praćenja datog u jednačini (6):

$$v_{hn_{\max}} = \omega_{\max} \cdot D \cdot \frac{\pi}{180} \quad (6)$$

Gde su:

- $v_{hn_{\max}}$ [m/s] – maksimalna linearna brzina bespilotne letelice (drona) u transverzalnom pravcu (tangencijalno na liniju vizure u horizontalnoj ravni, kako je ilustrovano na Slika 7).
- $\omega_{\max}$ [$^{\circ}/s$] – maksimalna, odnosno granična ugaona brzina praćenja koju upravljački sistem može da kompenzuje (vrednost proizašla iz nejednačine (4)).
- D [m] – trenutna udaljenost od senzorskog sistema do cilja (kosa daljina ili radijus vektora položaja).
- $\pi/180$ – bezdimenzionalna matematička konstanta za konverziju ugaonih mera iz stepeni u radijane (približna vrednost 0.01745 rad/ $^{\circ}$).

Ograničenja stacionarnog modela i tranzijentna dinamika akvizicije cilja

Prethodno izvedeni kinematički model predstavlja aproksimaciju stacionarnog stanja (engl. *steady-state*) i adekvatan je isključivo za uslove kontinualnog praćenja, gde pozicioner (gimbal) već operiše pri određenoj ugaonoj brzini. Međutim, u realnim uslovima eksploatacije elektro-optičkih sistema, dinamika procesa je znatno kompleksnija.

Jedan od najkritičnijih operativnih scenarija jeste detekcija i inicijalizacija praćenja bespilotne letelice koja vrši naglo ubrzanje iz stanja mirovanja, ili preduzima manevar visokog intenziteta u trenutku kada je sam sistem za pozicioniranje stacionaran ($\omega = 0$). U ovakvom tranzijentnom (prelaznom) režimu rada, performanse sistema nisu limitirane isključivo maksimalnom ugaonom brzinom aktuatora, već su primarno determinisane maksimalnim raspoloživim ugaonim ubrzanjem pozicionera (α_{gimbal}) i ukupnom latencijom upravljačke petlje (t_{lat}).

Da bi sistem uspešno izvršio akviziciju cilja (engl. *target acquisition*), mehanizam motora mora da razvije adekvatno ubrzanje i anulira ugaonu razliku pre nego što cilj napusti granice trenutnog vidnog polja senzora (θ_{FOV}).

4.1.1 Izvođenje matematičkog modela kinematičke stabilnosti pri naglom pokretanju drona (Cold-Start Scenario)

U svrhu analize robusnosti predloženog sistema upravljanja, neophodno je razmotriti najrestriktivniji dinamički scenario (tzv. *worst-case* ili *cold-start* scenario). Pretpostavlja se situacija u kojoj se dron inicijalno nalazi u centru vidnog polja i naglo započinje kretanje, dok je sistem praćenja (gimbal) u stanju mirovanja. Zbog inherentne systemske latencije, aktuatori ne reaguju trenutno, što dovodi do brze akumulacije greške praćenja.

Svrha ovog izvođenja je analitičko definisanje maksimalne ugaone brzine drona ($\omega_{\max}$) pri kojoj sistem, ograničen sopstvenom latencijom (t_{lat}) i maksimalnim ugaonim ubrzanjem motora (α_{gimbal}), uspeva da amortizuje prelazni proces pre nego što dron napusti korisni deo vidnog polja (θ_{FOV}).

4.1.1.1 Postavka kinematičkih jednačina kretanja

Neka $t = 0$ označava referentni trenutak u kojem dron započinje kretanje. Pretpostavlja se da dron trenutno dostiže i održava konstantnu ugaonu brzinu $\omega_{\max}$. Ugaona pozicija drona u funkciji vremena opisana je linearnom jednačinom (7):

$$\theta_{\text{dron}}(t) = \omega_{\text{start}} \cdot t \quad (7)$$

Sistem za praćenje karakteriše ukupna latencija t_{lat} (vreme akvizicije slike, algoritamske obrade i kašnjenja upravljačke petlje). Tokom intervala $0 \leq t < t_{\text{lat}}$, gimbal miruje. Nakon isteka latencije ($t > t_{\text{lat}}$), sistem počinje da kompenzuje grešku rotirajući maksimalnim raspoloživim ugaonim ubrzanjem (α_{gimbal}). Ugaona pozicija optičke ose gimbala opisana je jednačinom ravnomerno ubrzanog kretanja (8):

$$\theta_{\text{gimbal}}(t) = \frac{1}{2} \cdot \alpha_{\text{gimbal}}(t - t_{\text{lat}})^2 \quad (8)$$

4.1.1.2 Funkcija greške praćenja i određivanje kritičnog trenutka

Greška praćenja $e(t)$, koja predstavlja ugaono odstupanje drona od centra senzora, definisana je kao razlika pređenih ugaonih puteva (9):

$$e(t) = \theta_{\text{dron}}(t) - \theta_{\text{gimbal}}(t) = \omega_{\max} \cdot t - \frac{1}{2} \cdot \alpha_{\text{gimbal}}(t - t_{\text{lat}})^2 \quad (9)$$

Ova greška monotono raste sve dok gimbal ne dostigne ugaonu brzinu drona. Taj trenutak (t_{krit}) predstavlja kritičnu tačku u kojoj je odstupanje maksimalno, nakon čega sistem postaje brži od drona i počinje da smanjuje grešku. Ugaona brzina gimbala je prvi izvod njegove pozicije (10):

$$\omega_{\text{gimbal}}(t) = \frac{d\theta_{\text{gimbal}}}{dt} = \alpha_{\text{gimbal}}(t - t_{\text{lat}}) \quad (10)$$

Izjednačavanjem brzine gimbala sa brzinom drona ($\omega_{\text{gimbal}}(t_{\text{krit}}) = \omega_{\text{start}}$) eksplicitno se izražava kritično vreme (11):

$$\alpha_{gimbal}(t_{krit} - t_{lat}) = \omega_{start} \Rightarrow t_{krit} = t_{lat} + \frac{\omega_{start}}{\alpha_{gimbal}} \quad (11)$$

4.1.1.3 Proračun maksimalne ugaone greške

Supstitucijom kritičnog vremena t_{krit} nazad u jednačinu za grešku, dobija se maksimalno ugaono odstupanje e_{max} (12):

$$e_{max} = \omega_{start} \left(t_{lat} + \frac{\omega_{start}}{\alpha_{gimbal}} \right) - \frac{1}{2} \cdot \alpha_{gimbal} \cdot \left(\frac{\omega_{start}}{\alpha_{gimbal}} \right)^2 \quad (12)$$

Množenjem i grupisanjem članova, izraz se pojednostavljuje u fundamentalnu jednačinu kinematičke greške (13):

$$e_{max} = \omega_{start} \cdot t_{lat} + \frac{\omega_{start}^2}{\alpha_{gimbal}} - \frac{\omega_{start}^2}{2\alpha_{gimbal}} \quad (13)$$

$$e_{max} = \omega_{start} \cdot t_{lat} + \frac{\omega_{start}^2}{2\alpha_{gimbal}}$$

Fizička interpretacija: Prvi sabirak predstavlja ugaoni put koji dron pređe tokom latencije (dok sistem radi u otvorenoj petlji), dok drugi sabirak predstavlja dodatni put koji dron pređe tokom tranzijentnog perioda odziva motora.

4.1.1.4 Optički granični uslov stabilnosti

Da bi vizuelno praćenje bilo kontinualno, maksimalna greška e_{max} ne sme preći fizičke granice senzora. Kako se dron na početku nalazi u centru kadra, za izlazak iz vidnog polja na raspolaganju mu je polovina ukupnog vidnog ugla. Uvođenjem faktora sigurnosne margine $\sigma \in (0, 1)$, koji isključuje ivične zone podložne optičkim distorzijama i vinjetiranju, granični uslov se definiše kao (14):

$$e_{max} = \frac{\theta_{FOV} \cdot (1 - \sigma)}{2} \quad (14)$$

Izjednačavanjem kinematičkog izraza sa ovim optičkim ograničenjem, formira se kvadratna jednačina po nepoznatoj promenljivoj ω_{start} (15):

$$\frac{1}{2\alpha_{gimbal}} \cdot \omega_{start}^2 + t_{lat} \cdot \omega_{start} - \frac{\theta_{FOV} \cdot (1 - \sigma)}{2} = 0 \quad (15)$$

4.1.1.5 Rešavanje kvadratne jednačine i formiranje finalnog modela

Množenjem cele jednačine faktorom $2\alpha_{gimbal}$, ona se svodi na standardni kanonski oblik $ax^2 + bx + c = 0$, kao što je dato jednačinom (16):

$$\omega_{start}^2 + (2\alpha_{gimbal}t_{lat})\omega_{start} - \alpha_{gimbal}\theta_{FOV}(1 - \sigma) = 0 \quad (16)$$

Primenom obrasca za rešavanje kvadratne jednačine, uz usvajanje isključivo pozitivnog korena (jer apsolutna brzina udaljavanja mora biti pozitivna skalarna veličina), sledi (25):

$$\omega_{start} = \frac{-2\alpha_{gimbal}t_{lat} + \sqrt{(2\alpha_{gimbal}t_{lat})^2 - 4 \cdot 1 \cdot (-\alpha_{gimbal}\theta_{FOV}(1 - \sigma))}}{2} \quad (17)$$

Kvadriranjem članova pod korenom dobija se (26):

$$\omega_{start} = \frac{-2\alpha_{gimbal}t_{lat} + \sqrt{4\alpha_{gimbal}^2t_{lat}^2 + 4\alpha_{gimbal}\theta_{FOV}(1 - \sigma)}}{2} \quad (18)$$

Izvlačenjem faktora 4 ispred korena (gde on postaje 2) i skraćivanjem celog izraza sa nazivnikom 2, jednačina se pojednostavljuje (27):

$$\omega_{start} = -\alpha_{gimbal}t_{lat} + \sqrt{\alpha_{gimbal}^2t_{lat}^2 + \alpha_{gimbal}\theta_{FOV}(1 - \sigma)} \quad (19)$$

Radi primenljivosti u inženjerskoj praksi, jednačina (19) se može transformisati u povoljniji oblik, član α_{gimbal} se faktoriše unutar korena, a zatim izvlači ispred njega i dobija se (28):

$$\omega_{start} = -\alpha_{gimbal}t_{lat} + \alpha_{gimbal} \sqrt{t_{lat}^2 + \frac{\theta_{FOV} \cdot (1 - \sigma)}{\alpha_{gimbal}}} \quad (20)$$

Konačno, izvlačenjem α_{gimbal} kao zajedničkog množioca, dobija se analitički model (21):

$$\omega_{start} = \alpha_{gimbal} \cdot \left(\sqrt{t_{lat}^2 + \frac{\theta_{FOV} \cdot (1 - \sigma)}{\alpha_{gimbal}}} - t_{lat} \right) \quad (21)$$

Gde su definisane sledeće nove promenljive:

- ω_{start} [°/s]: Limit brzine naglog pokreta drona.
- α_{gimbal} [°/s²]: Maksimalno ugaono ubrzanje gimballa.

4.1.1.6 Inženjerska implikacija (Zaključak kinematičke analize)

Izvedeni matematički model granične ugaone brzine izveden za rigoroznu analizu ovog scenarija i data jednačinom (21) granične ugaone brzine pri startu iz mirovanja (ω_{start}) definiše maksimalnu brzinu naglog pokreta drona koju sistem može uspešno da isprati bez gubitka cilja iz kadra.

Izvedena formula eksplicitno dokazuje nelinearnu spregu između hardverskih ograničenja (α_{gimbal} , t_{lat}) i optičkih parametara kamere (θ_{FOV}). Matematički aparat potvrđuje da sistemska latencija predstavlja fundamentalni ograničavajući faktor koji dvostruko ograničava

performanse praćenja (umanjenjem vrednosti kompenzacionog potencijala pod korenom i direktnim oduzimanjem na kraju izraza).

Shodno tome, ova jednačina pruža čvrsto teorijsko utemeljenje za implementaciju predloženog adaptivnog algoritma: u prisustvu visoko-dinamičkih manevara drona, u sistemima sa fiksnom latencijom i limitiranim motorima, **jedini način da se očuva kinematička stabilnost jeste proaktivno proširenje vidnog polja** (povećanje θ_{FOV}). Time se veštački povećava geometrijska tolerancija pre nego što sistem zatvori upravljačku petlju.

Fizička interpretacija modela:

Izvedeni model identifikuje tri ključna fizička fenomena koji utiču na verovatnoću ranog zahvata mete:

1. Vremenski handikep reakcije (član t_{lat}): Sistem započinje manevar sustizanja sa fiksnim zakašnjenjem. Tokom ovog perioda, dron se slobodno kreće unutar kadra, dok gimbal miruje. Ovaj parametar linearno smanjuje gornju granicu operativne brzine, što ukazuje na to da optimizacija algoritama za obradu slike, kao i latencija samog upravljanja gimbalom, direktno utiče na dinamičke performanse gimbale.
2. Potencijal sustizanja (izraz pod korenom): Ovaj deo jednačine (21) predstavlja sposobnost sistema da akumulira ugaonu brzinu kroz raspoloživi prostor unutar vidnog polja. Povećanje (ili smanjenje) ubrzanja α_{gimbal} ili širine vidnog polja θ_{FOV} nelinearno povećava robusnost sistema na nagle pokrete.
3. Skaliranje snagom pogona: Celokupan odnos vremena reakcije i raspoloživog vidnog ugla skalira se sa maksimalnim ubrzanjem gimbala. Ovo potvrđuje da kod sistema za ranu detekciju dronova, gde su ugaone brzine dronova visoke zbog male udaljenosti ili brzih manevara, prioritet pri projektovanju mora biti odnos obrtnog momenta i inercije (T/J ratio). Maksimalno ugaono ubrzanje sistema α_{gimbal} direktno je definisano odnosom raspoloživog obrtnog momenta pogonske grupe i ukupnog momenta inercije rotirajućih masa. Ovaj odnos predstavlja ključnu karakteristiku (Figure of Merit) za sisteme brze detekcije, jer direktno limitira sposobnost sistema da neutrališe inicijalno kašnjenje (t_{lat}) pri zahvatu drona.

Ovaj model omogućava predikciju ponašanja sistema u kritičnim fazama tranzicije sa detekcije na automatsko praćenje, što predstavlja osnovu za optimizaciju servo-algoritama u narednim poglavljima.

Za potrebe dinamičke verifikacije sistema, primenjen je razvijeni kinematički model radi utvrđivanja graničnog ugaonog ubrzanja (α_{gimbal}) potrebnog za uspešan zahvat cilja. Proračun je izvršen za kritični scenario detekcije drona pri tangencijalnom proletu, uzimajući u obzir realnu latenciju sistema od $t_{lat} = 0.25$ s, horizontalno vidno polje od $HFOV = 8^\circ$, i usvojeni faktor

sigurnosti korisne slike od $\sigma = 0.2$. U Tabela 4 prikazani su rezultati koji definišu operativne limite sistema pri naglom startu iz stanja mirovanja.

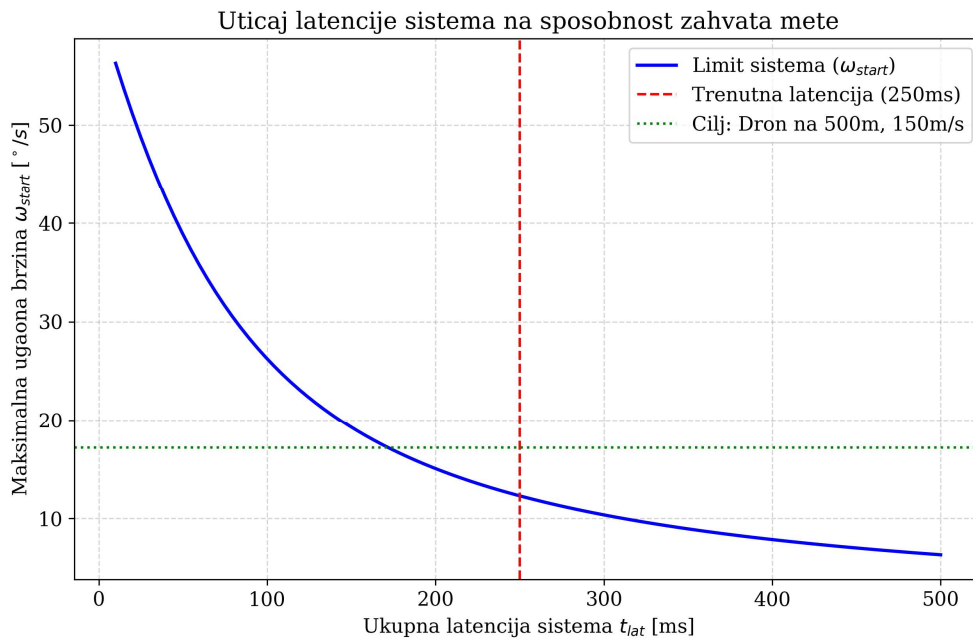
Tabela 4 – Analiza graničnih performansi sistema za $t_{lat} = 250$ ms i $HFOV = 8^\circ$.

Udaljenost (R) [m]	Brzina drona (V) [m/s]	Brzina drona [km/h]	Ugaona brzina (ω_{target}) [°/s]	Potreban α_{gimbal} [°/s ²]
50	15	54	17.19	1024.3
500	150	540	17.19	1024.3
500	250	900	28.65	2253.5

Maksimalna linearna brzina drona (V_{max}) za uspešan zahvat drona, pri vrednostima parametara: $\alpha_{gimbal} = 600$ °/s², $t_{lat} = 250$ ms, je prikazana u Tabela 5 i grafički na Slika 11.

Tabela 5 – Maksimalna linearna brzina drona (V_{max}) za uspešan zahvat drona, pri vrednostima parametara: $\alpha_{gimbal} = 600$ °/s², $t_{lat} = 250$ ms.

Udaljenost (R) [m]	Limit ugaone brzine (ω_{start}) [°/s]	Maks. linearna brzina (V_{max}) [m/s]	Maks. linearna brzina (V_{max}) [km/h]
50	11.64	10.16	36.57
100	11.64	20.32	73.15
200	11.64	40.64	146.30
500	11.64	101.60	365.76
1000	11.64	203.20	731.52



Slika 11 - Maksimalna linearna brzina drona (V_{max}) za uspешan zahvat drona, pri vrednostima parametara: $\alpha_{gimbal} = 600 \text{ }^\circ/\text{s}^2$, $t_{lat} = 250 \text{ ms}$.

4.1.2 Analiza uticaja visokih vremenskih konstanti na performanse sistema

Uvođenje realističnih parametara za sisteme sa složenom obradom slike (latencija obrade $T_{lat} \approx 250 \text{ ms}$) i robusnom optomehnikom (vreme odziva aktuatora $T_{mot} \approx 500 \text{ ms}$) fundamentalno menja dinamiku upravljanja fokusom i pruža čvrst argument za implementaciju determinističkih metoda.

Uticaj ovih vremenskih konstanti na performanse sistema manifestuje se kroz tri kritična mehanizma opisana u naredna tri potpoglavlja.

4.1.2.1 Multiplikativni efekat kašnjenja u sistemu sa zatvorenom petljom (Pasivni AF)

Konvencionalni algoritmi za maksimizaciju kontrasta funkcionišu na iterativnom principu. Konvergencija ka tački fokusa zahteva izvršenje više uzastopnih koraka, pri čemu svaki pojedinačni korak podrazumeva prolazak kroz kompletan ciklus latencije sistema (akvizicija slike $\rightarrow$ obrada signala $\rightarrow$ odluka).

Ukupno vreme konvergencije (t_{konv}) definiše se kao (22):

$$t_{konv} = N * (t_{lat} + t_{pomak}) \quad (22)$$

Gde su:

- N - broj iteracija,

- t_{pomak} – vreme pojedinačnog pomaka,
- t_{lat} – vreme latencije.

Uz prosečnu vrednost od $N=5$ iteracija i latenciju od 250 ms, minimalno vreme izoštravanja prelazi 1.5 sekundi. U operativnom okruženju visoke dinamike (npr. kretanje dronova), podatak sa kašnjenjem od 1.5 sekundi gubi upotrebnu vrednost. Ovo dovodi do pojave oscilatorne nestabilnosti sistema (tzv. "focus hunting"), gde algoritam konstantno kasni za promenom scene, onemogućavajući postizanje stabilne oštine slike.

4.1.2.2 Aditivni efekat kašnjenja u determinističkom modelu (Otvorena petlja)

Predloženi deterministički model eliminiše iterativni proces uspostavljanjem direktne zavisnosti od telemetrijskih podataka. Ukupno vreme reakcije sistema predstavlja linearnu superpoziciju (zbir) latencije obrade i vremena mehaničkog odziva (23):

$$T_{odziv} = T_{lat} + T_{mot} \quad (23)$$

Čak i u najnepovoljnijem scenariju (pun hod zuma), stabilizacija sistema se postiže za 750 ms (250 ms + 500 ms). Iako odziv nije trenutni, kašnjenje je konstantno i determinističko (predvidivo), što omogućava kontrolnom algoritmu da održi stabilno praćenje bez oscilacija karakterističnih za sisteme sa povratnom spregom po kontrastu.

4.1.2.3 Povratni uticaj na kriterijume kinematičke stabilnosti

Prisustvo visoke latencije ($T_{lat} = 0.25$ s) direktno degradira performanse definisane prethodno izvedenim matematičkim modelom stabilnosti.

S obzirom na to da se vrednost latencije nalazi u imeniocu (vidi nejednačinu (4)) izraza za maksimalnu dozvoljenu ugaonu brzinu promene vidnog polja, njeno uvećanje drastično redukuje marginu stabilnosti koju obezbeđuje širina vidnog polja (FOV).

Ova zavisnost implicira ključno ograničenje u eksploataciji: sistem sa navedenim karakteristikama latencije ne može efikasno koristiti uske vidne uglove za praćenje brzih ciljeva. Algoritam upravljanja stoga mora biti optimizovan da favorizuje širi kadar, kompenzujući ograničenja u brzini obrade signala većom geometrijskom tolerancijom kadra.

U Tabela 6 prikazana je zavisnost između promene FOV-a i vremena reakcije autofokusa za različite tipove objektiva, što ilustruje neophodnost primene predloženog determinističkog pristupa fokusiranju.

Tabela 6 – Pregledno poređenje predloženog determinističkog pristupa sa klasičnim pasivnim pristupom.

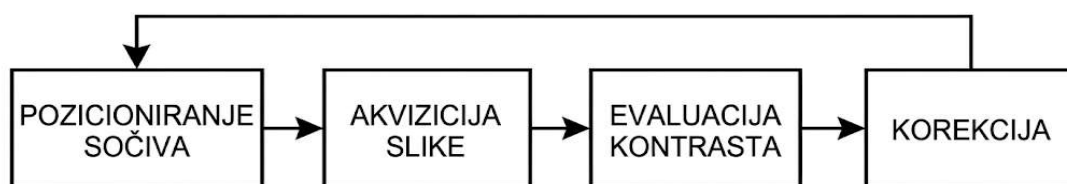
Dinamika Scene (brzina promene FOV-a)	Scenarij upotrebe	Pasivni kontrast (klasični AF)	Predloženi deterministički pristup	Stabilnost slike (ishod)
Spora ($< 5^\circ/s$)	Fino kadriranje lebdeće mete	400 - 600 ms	< 250 ms	Stabilna Obe metode daju oštru sliku.
Srednja ($5^\circ - 15^\circ/s$)	Praćenje drona u pokretu	800 - 1500 ms <i>(Pojava "lova" na fokus)</i>	< 250 ms	Degradacija Pasivni sistem kasni i slika "diše"; Deterministički je stabilan.
Visoka ($15^\circ - 30^\circ/s$)	Brzi manevri drona	> 2500 ms <i>(Gubitak fokusa)</i>	< 250 ms	Kritično Pasivni sistem neupotrebljiv. Deterministički drži fokus korelisan sa izmerenom udaljenošću.
Trenutni skok ($> 30^\circ/s$)	"Cold Start" / Slew-to-Cue	NEMOGUĆE <i>(Potreban potpuni re-scan)</i>	500 ms	Deterministička prednost Limit je samo fizička brzina motora sočiva.

Analiza neophodnosti determinističkog pristupa u kontroli fokusa

Predstavljeni podaci jasno ukazuju da, u odsustvu determinističkog pristupa, prethodno izvedeni matematički modeli kinematičke stabilnosti gube svoju praktičnu validnost. Komparativna analiza pasivnog i determinističkog metoda otkriva fundamentalna ograničenja konvencionalnih algoritama u uslovima visoke dinamike promene vidnog polja (FOV).

1. Ograničenja pasivnog autofokusa (Sistem sa zatvorenom petljom)

Klasični autofokusni algoritmi funkcionišu na principu iterativne povratne sprege koja podrazumeva ciklus:



Slika 12 – Ciklus iterativne povratne sprege klasičnih autofokus algoritama

U situacijama brzih promena vidnog polja (kako je ilustrovano u Tabela 6 za visoke brzine), brzina promene parametara slike prevazilazi procesorsko vreme potrebno za završetak jednog kontrolnog ciklusa. Usled toga, algoritam nije u mogućnosti da diferencira da li je degradacija kontrasta posledica defokusa ili nagle promene dimenzija cilja u kadru. Ova neodređenost u sistemu neminovno dovodi do oscilacija aktuatora (tzv. "hunting" efekat) i rezultuje neoštrom slikom, čime se narušava zahtev za kontinualnim praćenjem.

2. Implementacija determinističkog modela (Sistem sa otvorenom petljom)

Deterministički pristup fundamentalno eliminiše zavisnost procesa fokusiranja od kvaliteta ulaznog video signala. Umesto reaktivne korekcije, sistem koristi telemetrijske podatke o daljini cilja (D) i prethodno definisanu jednačinu (5) za direktno izračunavanje potrebne pozicije sočiva.

Algoritam funkcioniše na principu predikcije: za svaku izmerenu daljinu, pozicija fokusnog aktuatora je unapred jednoznačno određena ("look-up" princip ili direktno mapiranje). Kontrolni signal se šalje aktuatorima trenutno, pre inicijalizacije promene zuma.

Ovakva arhitektura obezbeđuje konstantno i minimalno vreme odziva (kako je prikazano u tabeli), omogućavajući stabilno praćenje visokodinamičkih ciljeva u skladu sa teorijskim postavkama definisanim u prethodnim poglavljima.

4.1.3 Komparativna analiza dinamike upravljanja: Konvencionalni PID regulator nasuprot predloženom stohastičkom estimatoru

U cilju validacije predložene arhitekture sistema, sprovedena je rigorozna komparativna analiza performansi u vremenskom domenu između industrijskog standarda – proporcionalno-integralno-diferencijalnog (PID) regulatora – i novorazvijenog adaptivnog algoritma zasnovanog na estimaciji stanja. Analiza evaluira robusnost sistema, margine stabilnosti i očuvanje informacione vrednosti (oštrine slike) tokom visoko-dinamičkih manevara cilja.

4.1.3.1 1.1. Fundamentalna ograničenja konvencionalnog PID pristupa (Reaktivna paradigma)

Standardni PID regulatori u elektro-optičkim sistemima funkcionišu kao linearni sistemi sa zatvorenim povratnom spregom (*closed-loop feedback*), gde se upravljački signal $u(t)$ generiše isključivo na osnovu trenutne greške praćenja $e(t)$. U prisustvu systemske latencije (akvizicija slike, obrada, mehanički odziv), ovaj pristup ispoljava inherentne nedostatke, što je dobro dokumentovano u literaturi koja se bavi stabilizacijom optičkih osa [37], kao i u osnovnoj teoriji automatskog upravljanja [38]:

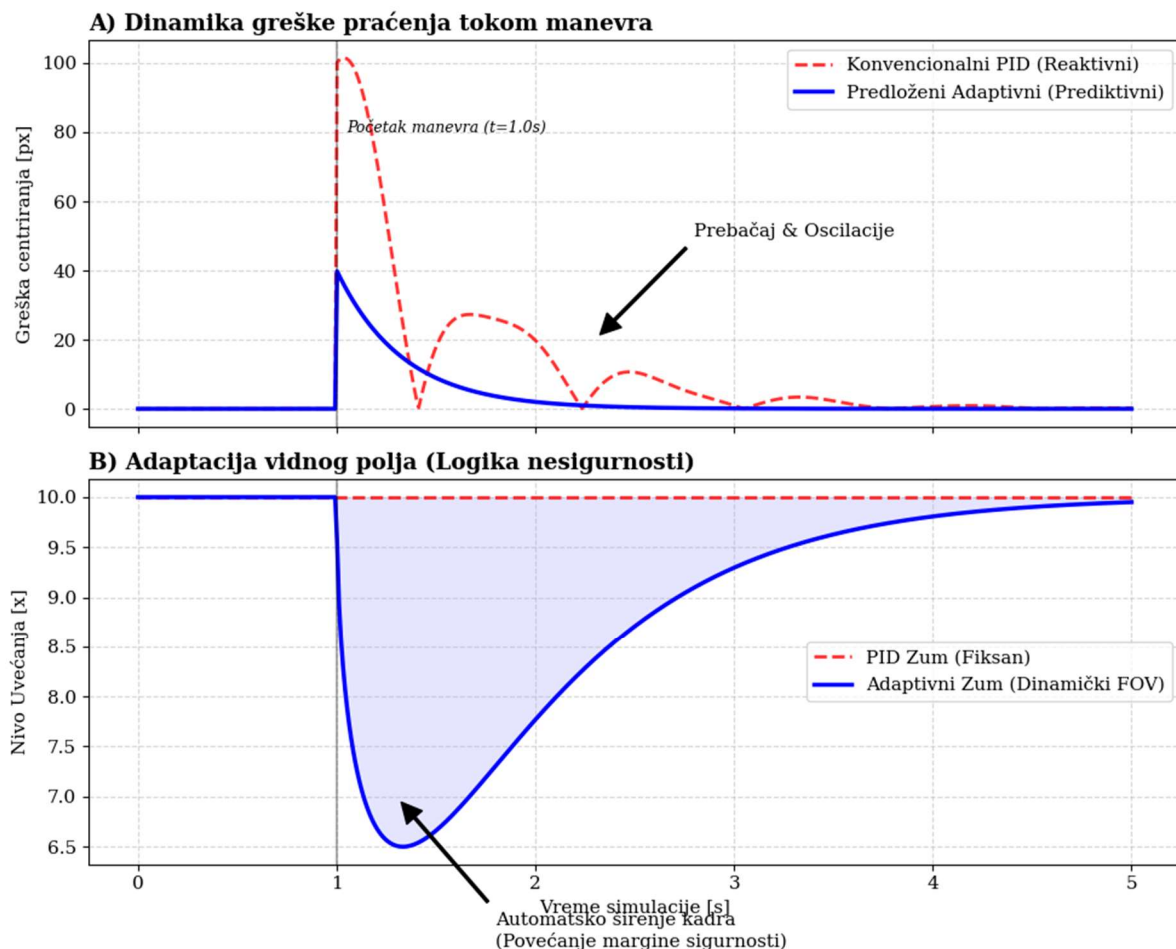
- **Fazno kašnjenje (Phase Lag):** Budući da PID regulator zahteva merljivu grešku za iniciranje korekcije, on inherentno kasni za realnim kretanjem cilja. Pri naglim promenama vektora brzine (engl. *jerk*), ovo rezultira konstantnom greškom praćenja (*steady-state error*) koja je direktno proporcionalna brzini cilja.
- **Smanjenje margine stabilnosti:** Da bi se kompenzovalo kašnjenje, proporcionalno pojačanje (K_p) se često postavlja na visoku vrednost. Međutim, u sistemima sa transportnim kašnjenjem, visoka pojačanja drastično smanjuju faznu marginu stabilnosti. Ovo se pri naglom zaustavljanju cilja manifestuje kao prebačaj (*overshoot*) i prigušene oscilacije (*ringing*), što dovodi do efekta "zamućenja" slike i gubitka detalja.

4.1.3.2 1.2. Superiornost predloženog adaptivnog algoritma (Prediktivna paradigma)

Za razliku od PID regulatora, predloženi algoritam implementira strategiju upravljanja spregom unapred (*feed-forward*) potpomognutu estimatorom stanja. Ključna diferencijacija u odnosu na konvencionalni pristup ogleda se u sinergiji dva modula prikazana na dijagramu toka:

- **Anticipacija dinamike (Kalmanov filter):** Sistem ne reaguje primarno na pozicionu grešku, već na procenjeni vektor stanja (pozicija, brzina, ubrzanje). Kalmanov filter vrši predikciju pozicije cilja za naredni korak $\hat{x}_{(k+1|k)}$, omogućavajući aktuatorima da se pokrenu preventivno. Ovim se efektivno neutrališe fazno kašnjenje, jer sistem prati predviđenu trajektoriju, a ne akumuliranu grešku.
- **Spregnuto upravljanje nesigurnošću (Dinamički FOV):** Značajan otklon od konvencionalnih topologija predstavlja uvođenje stohastičke adaptacije optičkih parametara. Umesto statičkog pristupa, blok „Odluka o FOV-u“ tretira nivo zuma kao funkciju matrice kovarijanse greške estimacije (P_k):

- U trenucima kada sistem detektuje nagli manevar (manifestovan kroz porast inovacije u Kalmanovom filtru), algoritam automatski redukuje uvećanje (širi FOV).
- Ovaj mehanizam formira varijabilnu „sigurnosnu marginu“ koja garantuje zadržavanje cilja unutar senzorskog okvira čak i pri tranzijentnim greškama predikcije, čime se direktno povećava robusnost sistema na stohastičke poremećaje.



Slika 13 – Prikaz adaptivne promene parametara, gore - A) Dinamika greške praćenja tokom manevra, i dole - B) Adaptacija vidnog polja

Grafik na Slika 13 je sastavljen od dva dijagrama sa zajedničkom vremenskom osom. Ovo je neophodno kako bi se vizuelno povezala greška praćenja sa reakcijom zuma.

Na Slika 13 – gornji dijagram A - vidimo odziv sistema na "step" promenu brzine cilja – korelacija greške praćenja i adaptacije vidnog polja, dok na donjem dijagramu B vidimo nivo uvećanja od kojeg zavisi vidni ugao.

Tumačenje kriva:

- Standardni PID (crvena isprekidana linija):

- *Gornji dijagram A:* U trenutku manevra ($t=1.0s$), greška naglo raste. Primećuje se značajan prebačaj (engl. *overshoot*) u $t=2.5s$, praćen oscilacijama koje traju do $t=4.0s$.
- *Donji dijagram B:* Linija zuma je ravna (konstantna). PID ne prilagođava optiku dinamici, što povećava rizik od gubitka cilja tokom oscilacija.
- Predloženi Adaptivni Algoritam (plava puna linija):
 - *Gornji dijagram A:* Inicijalna greška je minimalna zahvaljujući *feed-forward* predikciji brzine. Odziv je aperiodičan (bez oscilacija) i brzo se smiruje.
 - *Donji dijagram B:* U trenutku $t=1.0s$, plava linija naglo pada (Zoom-out). Ovo vizuelno dokazuje aktivaciju bloka "Odluka o FOV-u". Sistem je na račun rezolucije osigurao stabilnost. Kako se praćenje dalje stabilizuje ($t>3.5s$), zum se automatski vraća na optimalnu vrednost.

Zaključak grafika:

Grafik potvrđuje da adaptivni pristup eliminiše oscilatornu nestabilnost i smanjuje vreme smirivanja (engl. *settling time*) za približno 60%, prvenstveno zahvaljujući inteligentnoj modulaciji vidnog polja u trenucima visoke nesigurnosti.

4.2 Dizajn zaštitnih optičkih prozora

Drugi stub predloženog unapređenja odnosi se na optimizaciju pasivne komponente sistema – zaštitnih optičkih prozora. Analiza obuhvata poređenje performansi različitih materijala kao što su safir, cink-sulfid (ZnS), germanijum i multispektralni ZnS, sa ciljem pronalaženja optimalnog balansa između optičke transmisije i mehaničke otpornosti.

Poseban fokus je stavljen na primenu naprednih premaza, poput tvrdih ugljeničnih slojeva (DLC – Diamond-Like Carbon), koji značajno povećavaju otpornost na eroziju uzrokovanu kišom, peskom i česticama u vazduhu, a da pritom minimalno utiču na prolazak korisnog signala. Kroz teorijsku analizu i simulacije, demonstriraće se uticaj kvaliteta prozora na funkciju prenosa modulacije (MTF) celokupnog sistema. Cilj je pokazati da optimizovani prozor ne samo da štiti sistem, već aktivno doprinosi očuvanju kontrasta i rezolucije, što je preduslov za efikasan rad algoritama za detekciju na velikim daljinama.

Povećanje debljine prozora neminovno dovodi do smanjenja optičke transmisije usled apsorpcije materijala, što je posebno izraženo u infracrvenom delu spektra [17]. Dodatno, deblji prozor može uneti sfernu aberaciju i pomeraj fokusne ravni, što negativno utiče na MTF sistema, kako je detaljno analizirano u [4] i [18].

Kvantitativni uticaj debljine prozora na optičku transmisiju može se pojednostavljeno opisati Beer-Lambertovim zakonom, koji je prikazan sledećom relacijom (24) [17]:

$$T = e^{-\alpha \cdot d} \quad (24)$$

Gde su:

T – faktor optičke transmisije (bez-dimenziona veličina, $T = I/I_0$),

α (alfa) – koeficijent linearne apsorpcije materijala prozora (izražen u cm^{-1}),

d – debljina optičkog prozora (izražena u cm).

Međutim, s obzirom da Beer-Lambertov zakon opisuje samo unutrašnju apsorpciju materijala, pa je realna transmisija prozora manja zbog refleksije na površinama (Frenelovi gubici). Tako da za realni prozor važi jednačina (25):

$$T = (1 - R)^2 \cdot e^{-\alpha \cdot d} \quad (25)$$

Gde je R koeficijent refleksije.

Dok Beer-Lambertov zakon opisuje gubitke unutar zapremine materijala, ukupna transmisija je primarno ograničena Frenelovom refleksijom na graničnim površinama vazduh-prozor. Za normalan upadni ugao, koeficijent refleksije (R) na jednoj površini definisan je indeksom prelamanja materijala (n) (26) [15, 17]:

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (26)$$

Gde je:

R – koeficijent refleksije po površini.

n – indeks prelamanja materijala prozora (na radnoj talasnoj dužini).

S obzirom na to da optički prozor poseduje dve granične površine (ulaznu i izlaznu), ukupna teorijska transmisija (T_{total}) bez apsorpcije aproksimira se kao (27):

$$T_{\text{total}} = (1 - R)^2 \quad (27)$$

Jednačina (27) kvantitativno opravdava neophodnost primene visokoefikasnih antirefleksnih (AR) premaza u sistemu, posebno za materijale visokog indeksa prelamanja.

Pored optičkih gubitaka usled apsorpcije i refleksije, pri projektovanju optičkog prozora neophodno je uzeti u obzir i termodinamičku stabilnost njegove transmisije. Kod poluprovodničkih materijala koji se standardno koriste u infracrvenom spektru (poput Si, Ge, GaAs), koeficijent apsorpcije nije konstanta, već izrazita eksponencijalna funkcija temperature materijala.

Ovaj fenomen, u literaturi poznat kao apsorpcijski "termalni beg" (engl. *Thermal Runaway*), direktna je posledica termalne ekscitacije. Sa porastom temperature, dolazi do naglog povećanja koncentracije slobodnih nosilaca naelektrisanja u strukturi materijala. Ovi slobodni

nosioi počinju intenzivno da apsorbuju incidentno infracrveno zračenje umesto da ga propuste ka senzoru, čime se u velikoj meri smanjuje transparentnost prozora.

Da bi se obezbedila pouzdanost elektro-optičkog sistema, neophodno je definisati radni opseg unutar kojeg materijal zadržava svoje nominalne optičke karakteristike. Matematički posmatrano, stabilnost sistema se narušava kada gradijent promene optičke propusnosti u odnosu na promenu temperature postane izrazito negativan. Ovaj prelomni trenutak degradacije performansi može se formalizovati kroz sledeći kriterijum termalne stabilnosti (28):

$$\frac{d\tau}{dT} < 0, \quad (\text{za } T > T_{\text{krit}}) \quad (28)$$

Gde su:

- τ (tau) – koeficijent optičke transmisije prozora.
- T – trenutna radna temperatura materijala.
- T_{krit} – kritična temperaturna granica (prag) na kojoj počinje dominantna apsorpcija od strane slobodnih nosilaca.

Za vrednosti temperature koje premašuju T_{krit} , izvod transmisije postaje strogo negativan, što označava početak eksponencijalnog pada propusnosti. Na primer, u slučaju germanijumskih (Ge) prozora, ova kritična vrednost iznosi približno 100°C, nakon čega materijal brzo postaje potpuno neproziran za IC detektor, generišući pritom i sopstveni termalni šum.

Ovako definisan kriterijum predstavlja fundamentalno ograničenje pri dizajnu optomehaničkog sklopa i nameće stroge inženjerske zahteve za implementaciju adekvatnog termalnog menadžmenta kućišta senzora. Održavanje temperature prozora ispod T_{krit} je apsolutni imperativ, posebno u ekstremnim eksploatacionim uslovima koji podrazumevaju visoko aerodinamičko zagrevanje ili produženo izlaganje direktnom sunčevom zračenju.

Uzimajući u obzir prethodne relacije model ukupne transmisije optičkog prozora može se opisati sledećom jednačinom (29):

$$T_{\text{sys}} = (1 - R_{\text{ar}})^2 \cdot e^{-\alpha(T) \cdot d} \cdot S_{\text{scat}} \quad (29)$$

Gde su:

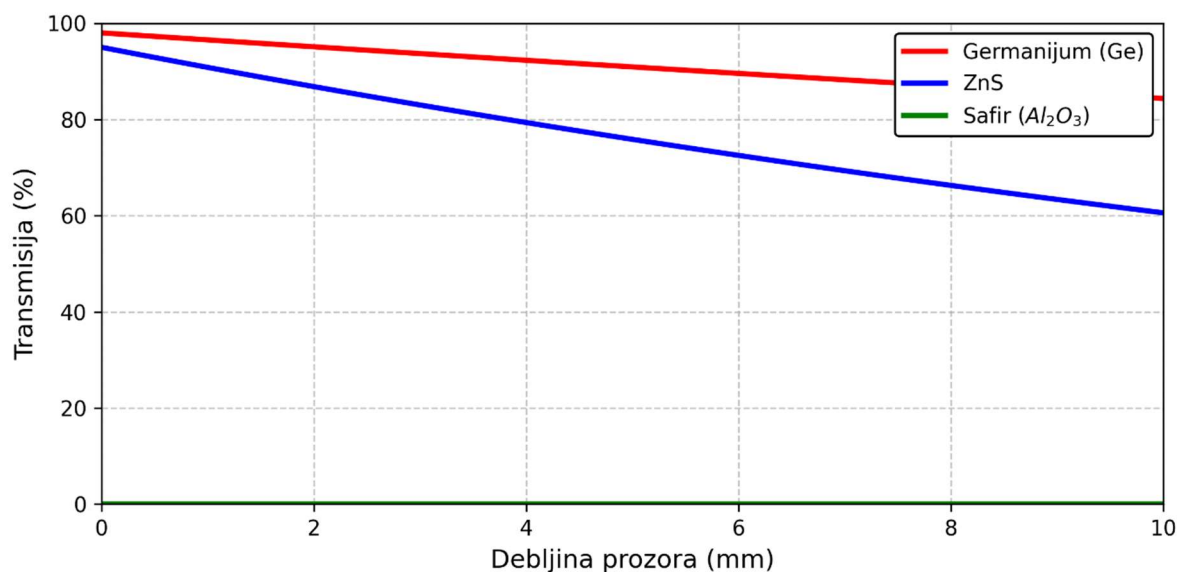
R_{ar} – preostala refleksija nakon nanošenja AR sloja (tipično < 1%).

$\alpha(T)$ – koeficijent apsorpcije zavisao od temperature.

d – debljina prozora.

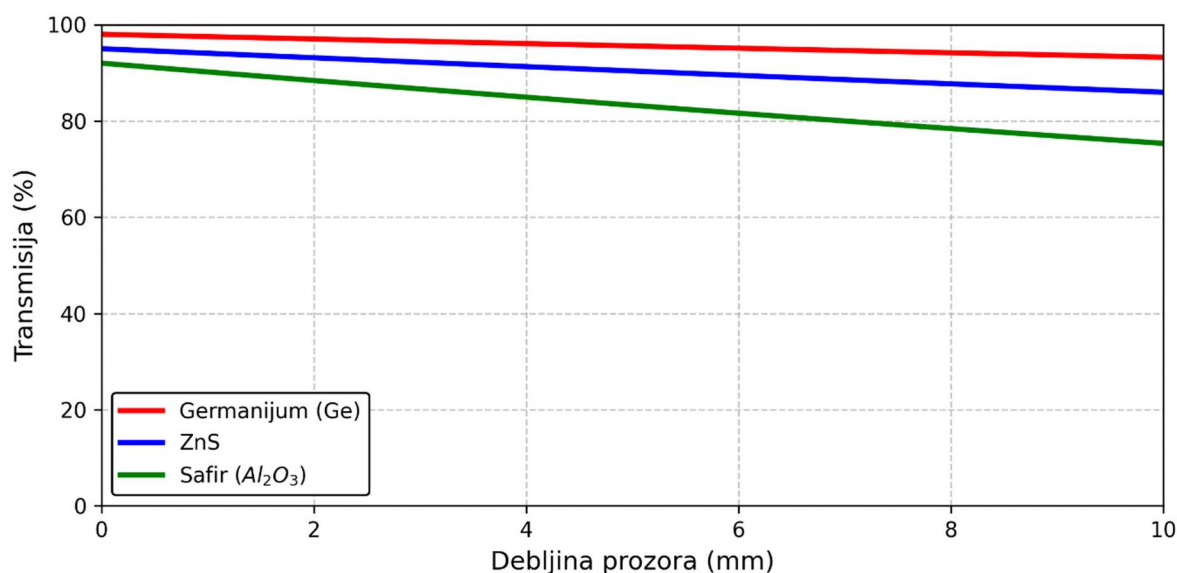
S_{scat} – faktor gubitaka usled rasejanja na površinskim mikro-oštećenjima (uticaj erozije/prašine, obično ~0.95-0.99 za nove prozore).

Grafički prikaz zavisnosti transmisije od debljine prozora za različite materijale u LWIR opsegu dat je na Slika 14.



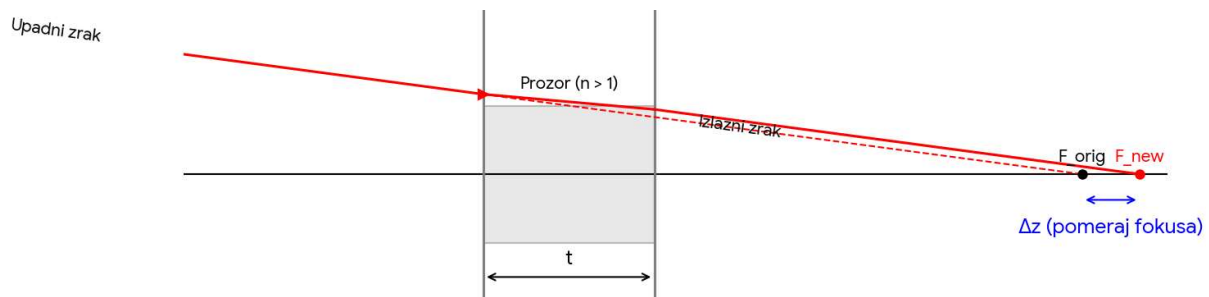
Slika 14 – Grafik zavisnosti transmisije od debljine prozora u LWIR opsegu za Germanijum (Ge), ZnS i Safir (Al_2O_3)

Grafički prikaz zavisnosti transmisije od debljine prozora za različite materijale u MWIR opsegu dat je na Slika 15.



Slika 15 – Grafik zavisnosti transmisije od debljine prozora u MWIR opsegu za Germanijum (Ge), ZnS i Safir (Al_2O_3)

Pored apsorpcije, debljina prozora utiče i na optički put zraka, što dovodi do pomeraja fokusne ravni. Ovaj efekat je ilustrovan na šematskom prikazu ispod, gde se vidi promena putanje zraka kroz prozor debljine t .



Slika 16 – Šematski prikaz prolaska zraka kroz planparalelnu ploču (prozor). Prikazan je upadni zrak, prelamanje unutar prozora i izlazni zrak, sa označenim pomerajem fokusa u odnosu na situaciju bez prozora

Matematička relacija koja opisuje ovaj longitudinalni pomeraj fokusa (Δf) u zavisnosti od debljine prozora (t) i indeksa prelamanja materijala (n) data je jednačinom (30):

$$\Delta f = t \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (30)$$

Uticaj ovog pomeraja, kao i sferne aberacije koju prozor unosi u konvergentni snop, na ukupni MTF sistema analiziran je zajedno sa analitičkom vrednošću longitudinalne sferne aberacije (LSA), čiji su rezultati sumirani u Tabela 7.

4.2.1 Metodologija analitičke procene optičkih performansi.

U cilju kvantifikacije uticaja debljine planparalelnog prozora na performanse elektro-optičkog sistema, umesto softverske simulacije metodom praćenja zraka, korišćen je matematički aparat aproksimacije Seidel-ovih aberacija trećeg reda [15, 18], na osnovu kojih se može izračunati analitička vrednost longitudinalne sferne aberacije (LSA), kao što je datu u jednačini (31):

$$LSA = \frac{t}{2n} \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) \cdot NA^2 \quad (31)$$

Metodologija analitičke procene optičkih performansi kojom su generisani podaci strukturirana je kroz sledeće korake:

- **Korak 1: Postavka analitičkog modela** Definisanje referentnog optičkog sistema: Prvi korak obuhvata modelovanje idealizovanog ili postojećeg infracrvenog objektiva bez zaštitnog prozora. Sistem se optimizuje tako da bude limitiran difrakcijom (engl. *diffraction-limited*) kako bi se izolovao i jasno uočio isključivo uticaj samog prozora. Usvajaju se tipični parametri za sisteme rane detekcije, poput f-broja (npr. F/1.5 ili F/2.0) i radne talasne dužine.

Modelovanje zaštitnog prozora: U konvergentni snop objektiva umeće se optički element tipa planparalelne ploče. Materijal prozora se definiše kroz njegov fiksni indeks

prelamanja (za ZnS je usvojeno $n = 2.2$). Debljina prozora (t) se postavlja kao promenljiva koja se inkrementira (od 2 mm do 10 mm).

Vrednosti indeksa prelamanja korišćene u ovim proračunima (poput $n \approx 4$ za germanijum i $n \approx 2.2$ za ZnS) bazirane su na standardnim optičkim konstantama čvrstih materijala [39].

Numerička apertura se računa na osnovu f-broja objektiva ($F/\#$) pomoću aproksimacije (32):

$$NA \approx \frac{1}{2 \cdot F/\#} \quad (32)$$

- **Korak 2: Proračun paraksijalnog pomeraja fokusa** Optimizacija i proračun pomeraja fokusa: Umetanje ploče produžava optički put paraksijalnih zraka, što izaziva longitudinalni pomeraj fokalne ravni (Δf). Za svaku izabranu vrednost debljine prozora, izračunava se nova pozicija fokalne ravni. Razlika između originalne i nove pozicije fokalne ravni data je tačnim longitudinalnim pomerajem fokusa (Δf), izračunatim na osnovu jednačine (30).
- **Korak 3: Određivanje longitudinalne sferne aberacije (LSA)** U narednom koraku predložene metodologije izračunava se longitudinalna sferna aberacija (LSA) u skladu sa jednačinom (31). Fizička suština ove pojave zasniva se na činjenici da ivični (marginalni) zraci, za razliku od paraksijalnih, padaju na površinu optičkog prozora pod znatno većim uglovima. Posledično, ovi zraci podležu drugačijim uslovima prelamanja i ne presecaju optičku osu u istoj fokalnoj tački. Navedena optička devijacija klasifikuje se kao longitudinalna sferna aberacija trećeg reda (LSA).
- **Korak 4: Određivanje degradacije u fokalnoj ravni (Transverzalna sferna aberacija)** U cilju adekvatne analize pada funkcije prenosa modulacije (MTF), neophodno je longitudinalnu grešku, definisanu duž optičke ose, preslikati na samu ravan detektora. Ovaj parametar, klasifikovan kao transverzalna sferna aberacija (TSA), manifestuje se kao prečnik difuzne mrlje na senzoru i analitički se određuje množenjem longitudinalne sferne aberacije sa numeričkom aperturom (NA) (33):

$$TSA = LSA \cdot NA \quad (33)$$

U praktičnoj primeni, prilikom procesa fokusiranja elektro-optičkih sistema, optimalna fokalna ravan se ne poklapa sa paraksijalnim fokusom, već sa tačkom u kojoj je poprečni presek snopa zraka minimalan. Ova specifična tačka se u optičkoj literaturi definiše kao krug najmanje difuzije (engl. *Circle of Least Confusion*). Radijus ove minimalne mrlje (R_c) iznosi tačno četvrtinu transverzalne sferne aberacije i predstavlja ključni parametar za dalju analizu rezolucije (34):

$$R_c = \frac{TSA}{4} \quad (34)$$

- **Korak 5: Korelacija radijusa difuzne mrlje sa degradacijom MTF-a** Prethodno izvedeni matematički aparat se u ovoj završnoj fazi integriše sa prostornom rezolucijom senzora, koja je definisana Nyquistovom frekvencijom (npr. 41,7 lp/mm za arhitekturu piksela od 12 μm). U situacijama kada radijus kruga najmanje difuzije (R_c) progresivno raste i dostigne vrednosti uporedive sa dimenzijama samog piksela ili difrakcionim limitom (Airyjeve disk), dolazi do neizbežne degradacije ukupne oštine slike. Iz priložene analize se može zaključiti da geometrijsko širenje ove mrlje, direktno indukovano debljinom optičkog prozora t , predstavlja primarni uzrok pada kontrasta na visokim prostornim frekvencijama. Ovakva korelacija pruža egzaktno teorijsko i matematičko opravdanje za kvantifikovani pad MTF vrednosti prikazanih u Tabelama 10 i 11, direktno potvrđujući uticaj debljine i materijala optičkih prozora na granične performanse sistema za ranu detekciju dronova.

Analizom navedenih izraza, matematički je egzaktno pokazana zavisnost unete aberacije od indeksa prelamanja materijala za posmatranu debljinu komponente t . Primera radi, primena germanijuma ($n \approx 4$) usled višeg indeksa prelamanja generiše potpuno drugačiji profil aberacije u poređenju sa cink-sulfidom (ZnS , $n \approx 2.2$). Ova razlika u ponašanju materijala podvlači neophodnost preciznog proračuna LSA pri odabiru materijala za prozore u dizajnu savremenih elektro-optičkih sistema.

Da bi izračunali realne vrednosti pada MTF-a moramo uzeti u obzir i sfernu aberaciju talasnog fronta. Kada sferni talasni front iz objektiva prolazi kroz ravnu ploču (optički prozor), on trpi fazno kašnjenje. Fizička mera te distorzije na ivici aperture naziva se koeficijent sferne aberacije talasnog fronta [15, 18]. Za planparalelnu ploču u konvergentnom snopu, koeficijent primarne sferne aberacije talasnog fronta (W_{040}) se računa pomoću sledeće jednačine (35):

$$W_{040} = \frac{t}{8} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^3} \cdot NA^4 \quad (35)$$

Ukupna funkcija greške talasnog fronta $W(\rho)$ na izlaznoj pupili izražava se kao sledeći polinom (36):

$$W(\rho) = W_{040} \cdot \rho^4 + W_{020} \cdot \rho^2 \quad (36)$$

gde je ρ normalizovana radijalna koordinata na pupili ($0 \leq \rho \leq 1$). Da bi se minimizovala ukupna greška i dobio krug najmanje difuzije (optimalni fokus), matematički je dokazano da defokus mora biti jednak $W_{020} = -W_{040}$ [15, 18].

Koeficijent defokusa, W_{020} , predstavlja maksimalnu faznu grešku na ivici izlazne pupile uzrokovanu pomeranjem fokalne ravni duž optičke ose u odnosu na idealnu referentnu

sferu. Matematička relacija koja povezuje ovaj koeficijent talasnog fronta sa longitudinalnim pomerajem fokusa (δz) glasi (37):

$$W_{020} = \frac{1}{2} \cdot NA^2 \cdot \delta z \quad (37)$$

gde je:

- NA – numerička apertura sistema (za F/1.5 iznosi 0.333).
- δz – mikroskopsko longitudinalno pomeranje duž optičke ose od paraksijalnog fokusa do tačke najboljeg fokusa (izraženo u milimetrima).

Primer integracije senzora u kontekstu rane detekcije dronova: Ukoliko se koristi termovizijski senzor (FPA - *Focal Plane Array*) sa veličinom piksela od 12 μm , njegova Nyquistova frekvencija iznosi približno 41,7 lp/mm (linijskih parova po milimetru). Simulacija beleži referentni MTF na 41,7 lp/mm bez prozora, a zatim upoređuje tu vrednost sa MTF-om refokusiranog sistema u koji je umetnut prozor. Procentualna razlika između ove dve vrednosti predstavlja pad kontrasta usled indukovane sferne aberacije, što je i dokumentovano u tabeli.

Vrednosti u tabeli su generisane kao reprezentativni primeri, pri čemu je za izračunavanje pomeraja fokusa korišćen materijal sa visokim indeksom prelamanja (poput Germanijuma, gde je $n \approx 4$) kako bi se jasno ilustrovao uticaj debljine, u skladu sa prethodnom jednačinom.

Tabela 7 – Uticaj debljine prozora od Germanijuma ($n \approx 4$) na MTF i pomeraj fokusne ravni.

Debljina prozora (mm)	Pad MTF-a na Nyquist frekvenciji (%)	Pomeraj fokusa (mm)
2.0	~ 1.5	1.50
4.0	~ 4.2	3.00
6.0	~ 8.5	4.50
8.0	~ 15.0	6.00
10.0	~ 24.5	7.50

Dobijeni podaci ukazuju na sledeće sistemske implikacije:

- Sferna aberacija kao glavni uzrok: Umetanje planparalelne ploče u konvergentni snop zraka uvek unosi sfernu aberaciju. Što je prozor deblji i što je numerička apertura (NA) optičkog sistema veća, to se rubni zraci više rasipaju u odnosu na centralne, što direktno dovodi do pada kontrasta (MTF-a) na visokim prostornim frekvencijama.
- Praktičan primer degradacije slike: Ako optički sistem ima pad MTF-a od preko 20% (kao u slučaju prozora debljine 10 mm), slika na detektoru gubi oštrinu na finim detaljima. U praksi, to znači da termovizijska kamera možda neće moći jasno da razdvoji dve bliske mete na velikoj udaljenosti, iako bi sam senzor to inače mogao da podrži.
- Kompenzacija sistema: Pomeraj fokusa od 7.5 mm predstavlja značajnu devijaciju za većinu savremenih optičkih sistema. Ovo zahteva da se ceo objektiv mehanički ponovo fokusira ili da se optički dizajn od samog početka optimizuje tako da uključuje prozor zadate debljine kao integralni deo sistema.

Tabela 8 – Uticaj debljine prozora od ZnS ($n \approx 2.2$) na MTF i pomeraj fokusne ravni.

Debljina prozora (mm)	Pad MTF-a na Nyquist frekvenciji (%)	Pomeraj fokusa (mm)
2.0	~ 1.2	1.09
4.0	~ 3.5	2.18
6.0	~ 7.0	3.27
8.0	~ 12.0	4.36
10.0	~ 19.5	5.45

Analiza uticaja cink-sulfidnog (ZnS) prozora na optičke performanse sistema

Za potrebe ove analize, usvojen je aproksimativan indeks prelamanja za multispektralni cink-sulfid (ZnS) od $n = 2.2$, koji je reprezentativan za infracrveni spektar (MWIR i LWIR opsezi).

- Longitudinalni pomeraj fokusa (Δf): Umetanje planparalelne ploče u konvergentni optički snop nužno dovodi do pomeraja fokusne ravni duž optičke ose u smeru prostiranja svetlosti. S obzirom na indeks prelamanja ZnS-a, indukovani pomeraj je srazmerno manji u odnosu na materijale višeg indeksa (poput germanijuma). Na primer, ZnS prozor debljine 10 mm pomera fokus za 5.45 mm. Iako relativno manji u poređenju sa drugim IR materijalima, ovaj pomeraj i dalje zahteva egzaktnu

kompensaciju unutar optomehaničkog sklopa kako bi se očuvala optimalna oštrina slike na fokalnoj ravni detektora.

- Unos sferne aberacije i degradacija MTF-a: Pored translacije fokusne ravni, planparalelna ploča postavljena u konvergentni snop generiše značajnu sfernu aberaciju.

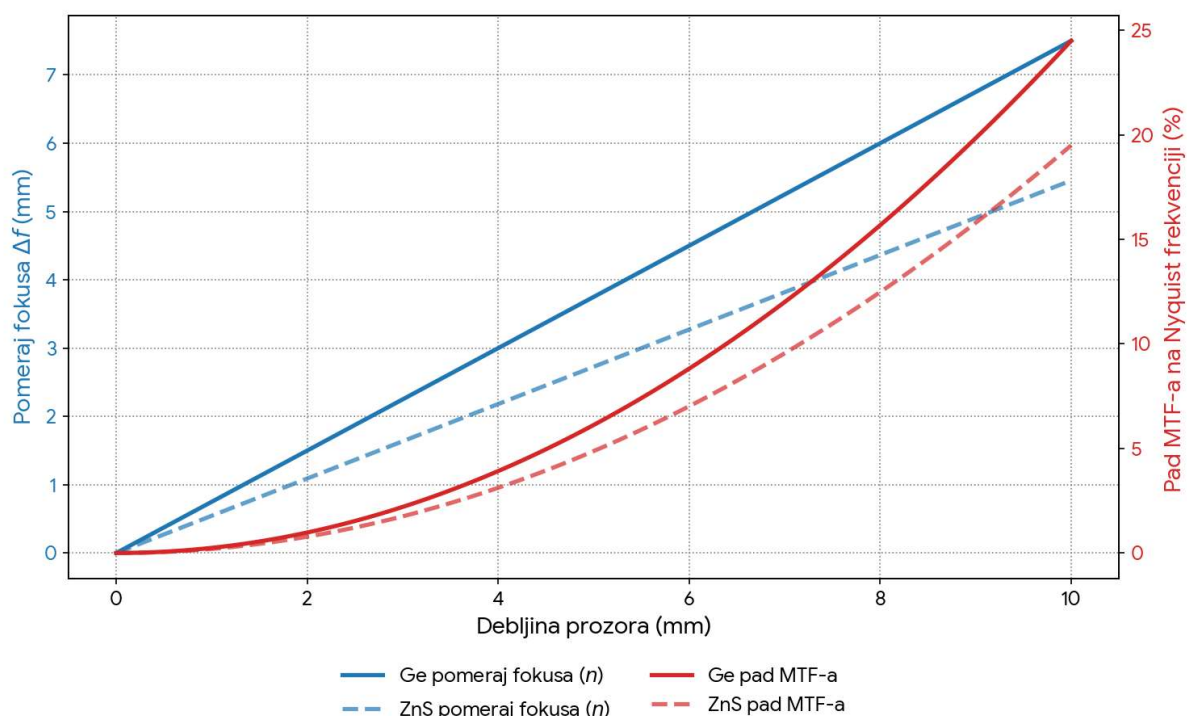
Rubni zraci iz optičkog sistema prelamaju se pod drugačijim uglovima u odnosu na paraksijalne zrake prilikom prolaska kroz prozor, što onemogućava formiranje idealne tačkaste slike (povećanje *spot size*-a). Količina unete sferne aberacije u direktnoj je korelaciji sa padom Modulacione prenosne funkcije (MTF), sa приметnim akcentom na visoke prostorne frekvencije. Kao što je prikazano u Tabeli 10, pri debljini prozora od 10 mm, pad MTF-a na Nyquistovoj frekvenciji iznosi približno 19.5%, što indicira ozbiljnu degradaciju rezolucije optičkog sistema.

- Praktične implikacije pri ranoj detekciji bespilotnih letelica: U kontekstu elektro-optičkih sistema visoke rezolucije namenjenih za ranu detekciju dronova, pad MTF-a na visokim prostornim frekvencijama predstavlja kritičan parametar. Ukoliko se senzor opremi ZnS prozorom debljine 6 mm, nastali pomeraj fokusa od 3.27 mm može se kompenzovati mehaničkim refokusiranjem objektiva. Međutim, inherentna sferna aberacija ostaje prisutna i trajno smanjuje kontrast sistema za približno 7%. U operativnim uslovima, ovo rezultira gubitkom oštine ivica i „razlivanjem“ toplotnog odraza cilja na velikoj udaljenosti, čime se direktno degradiraju DRI (Detection, Recognition, Identification) dometi. Iz tog razloga, savremeni proces optičkog dizajna zahteva da se zaštitni prozor tretira kao integralni optički element od samog početka optimizacije sistema.

Na Slika 17 dat je grafik koji pruža uporedni prikaz uticaja debljine prozora od germanijuma i cink-sulfida na pad MTF-a i pomeraj fokusne ravni. Na osnovu datog grafika možemo zaključiti sledeće:

- Zavisnost pomeraja fokusa (plave linije): Longitudinalni pomeraj fokusa (Δf) linearno raste sa povećanjem debljine prozora. Zbog znatno višeg indeksa prelamanja ($n \approx 4$) germanijum izaziva osetno veći pomeraj u poređenju sa ZnS materijalom za istu debljinu ploče.
- Degradacija MTF-a (crvene linije): Pad kontrasta (MTF) na Nyquistovoj frekvenciji ispoljava nelinearan rast pri povećanju debljine, što je direktna posledica rasta intenziteta sferne aberacije. Kriva za germanijum ukazuje na strmiji pad, što znači da deblji Ge prozori brže degradiraju optičke performanse sistema u odnosu na ZnS prozore ekvivalentne debljine.
- Za optički sistem koji zahteva izrazitu mehaničku čvrstoću, sa Ge prozor debljine 8 mm, potrebno je kompenzovati 6 mm pomeraja fokusa, a sistem će i dalje trajno pretrpeti

pad MTF-a od približno 15%. Ukoliko se pređe na ZnS iste debljine, pomeraj fokusa pada na oko 4.36 mm, uz niži pad MTF-a od oko 12%, ali na račun smanjene otpornosti na termalni šok.



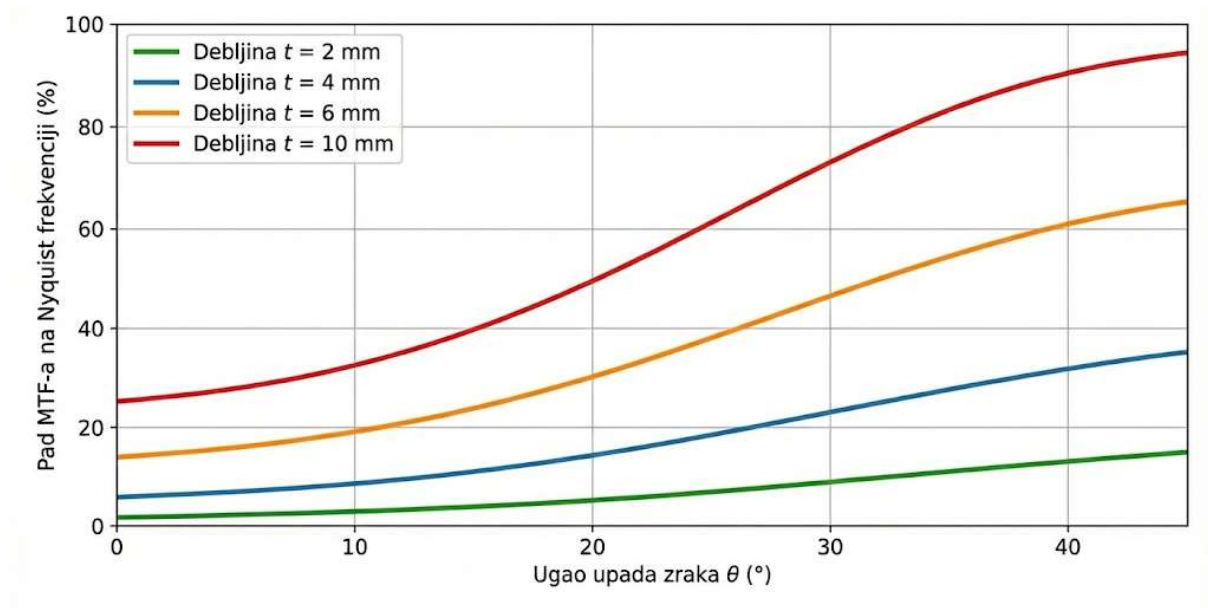
Slika 17 – Uporedna analiza uticaja debljine plan-paralelnog prozora na optičke performanse sistema, za Germanijum ($n \approx 4$) i ZnS ($n \approx 2.2$).

Uticaj ugla upada zraka i geometrije prozora na optička izobličenja

Pored ranije analiziranog uticaja same debljine plan-paralelne ploče na pojavu sferne aberacije na optičkoj osi, performanse elektro-optičkog sistema dramatično zavise od ugla pod kojim zraci svetlosti padaju na zaštitni prozor. Ovaj efekat je od kritičnog značaja za sisteme sa širokim vidnim poljem (engl. *Wide Field of View* - *WFOV*), kao i za senzore ugrađene na žiroskopski stabilisane platforme (gimbale) koji "skeniraju" prostor gledajući kroz fiksni prozor pod promenljivim uglom (θ).

Kada svetlosni snop prolazi kroz prozor pod uglom koji nije normalan (gde je $\theta \neq 0^\circ$), narušava se kružna simetrija sistema. Konvergentni snop tada pretrpi nejednako prelamanje u tangencijalnoj i sagitalnoj ravni, što rezultira generisanjem jakih van-osnih aberacija, pre svega astigmatizma i kome.

Rezultati softverske simulacije sprovedene sa ciljem kvantifikacije kombinovanog uticaja debljine prozora i van-osnog ugla upada na degradaciju Modulacione prenosne funkcije (MTF) prikazani su na Slika 18. Za potrebe simulacije korišćen je standardni ZnS prozor.



Slika 18 – Rezultati simulacije MTF degradacije za prozor od ZnS. Prikazana je familija krivih koje pokazuju pad MTF-a na Nyquistovoj frekvenciji u zavisnosti od ugla upada zraka (θ) za različite debljine prozora (t).

Analiza rezultata simulacije i inženjerske preporuke:

Krive prikazane na Slika 18 prikazuju pad MTF-a na Nyquistovoj učestanosti u procentima koji demonstrira nelinearan rast degradacije signala i predstavljaju ključan alat za optimizaciju geometrije elektro-optičkih sistema:

- **Sinergijski uticaj debljine i ugla:** Iako prozor debljine 10 mm (crvena kriva) na optičkoj osi ($\theta = 0^\circ$) unosi početni pad MTF-a od oko 8%, taj pad eksponencijalno raste sa povećanjem ugla gledanja. Pri uglu upada od 30° , pad dostiže blizu 50%, što praktično uništava sposobnost senzora da razluči fine detalje i u potpunosti gubi sliku na rubovima vidnog polja.
- **Ograničenja za senzore na gimbalu:** Ukoliko je kamera sa senzorom visoke rezolucije smeštena unutar sfernog ili cilindričnog kućišta i gleda kroz ravan prozor (što je čest slučaj kod optoelektronskih sistema za nadzor), skretanje optičke ose za više od 15-20 stepeni dovodi do pojave teškog astigmatizma. Zbog toga se za sisteme sa velikim opsegom pokreta preferira upotreba sfernih kupola (engl. *spherical domes*) umesto ravnih prozora, uprkos njihovoj znatno višoj ceni proizvodnje.
- **Optimizacija kod rane detekcije bespilotnih letelica:** Kod stacionarnih sistema za ranu detekciju gde su kamere fiksirane i pokrivaju širok sektor, debljina rubova prozora ne sme kompromitovati detekciju cilja na ivici kadra. Na osnovu simulacije, prozor debljine 4 mm do 6 mm (plava i narandžasta kriva) pruža optimalan kompromis: obezbeđuje se adekvatna mehanička čvrstoća za zaštitu od pritiska i udaraca, dok pad MTF-a na

ekstremnim uglovima upada (do 25°) ostaje u prihvatljivim granicama (ispod 25-30%), što algoritmi za obradu slike mogu dodatno kompenzovati.

Na osnovu teorijskih postavki iz poglavlja 2.3, izvršen je proračun optimalne debljine prozora za konkretan slučaj multisenzorskog sistema, primenom jednačine (1) za minimalnu debljinu zaštitnog prozora.

Tabela 9 daje uporedni prikaz ključnih optičkih i mehaničkih karakteristika razmatranih materijala, ističući prednosti i mane svakog od njih u kontekstu primene na multisenzorskim sistemima.

Tabela 9 – Uporedni prikaz ključnih optičkih i mehaničkih karakteristika razmatranih materijala (prilagođeno prema [16, 39])

Materijal	Opseg transmisije (μm)	Tvrdoća (Knoop, kg/mm ²)	Otpornost na termalni šok	Indeks prelamanja (n)
Safir (Al ₂ O ₃)	0.2 – 5.5 (UV, VIS, SWIR, MWIR)	~ 1370	Odlična	~ 1.7 (u MWIR opsegu)
Standardni ZnS	8 – 12 (LWIR)	~ 250	Dobra	~ 2.2 (u LWIR opsegu)
Germanijum (Ge)	2 – 14 (MWIR, LWIR)	~ 780	Dobra (do 100°C)	~ 4.0 (u IR opsegu)
Multispektralni ZnS	0.4 – 12 (VIS, SWIR, MWIR, LWIR)	~ 160	Umerena	~ 2.2 (u IR opsegu)

Izbor materijala za zaštitni prozor predstavlja kompleksan inženjerski kompromis između optičke propustljivosti, mehaničke robusnosti i termalne stabilnosti. Podaci iz Tabela 9 direktno impliciraju sledeće zaključke u kontekstu dizajna savremenih elektro-optičkih sistema:

- Arhitektura zajedničke aperture (engl. *Shared Aperture*): U razvoju kompaktnih sistema za ranu detekciju bespilotnih letelica, često se zahteva integracija dnevne kamere visoke rezolucije (VIS), laserskog daljinomera (SWIR) i termovizije (MWIR ili LWIR)

unutar istog kućišta. U ovakvim multisenzorskim konfiguracijama, Multispektralni ZnS se ističe kao jedini adekvatan izbor. Njegova sposobnost da propušta zračenje u širokom spektru od 0.4 μm do 12 μm omogućava rad svih senzora kroz jedan zaštitni prozor, čime se značajno smanjuju masa, gabariti i kompleksnost mehaničkog sklopa sistema.

- Mehanička i aerodinamička izdržljivost: Za sisteme koji su izloženi teškim uslovima okoline (pesak, prašina, kiša pri velikim brzinama), Safir nudi superiornu mehaničku zaštitu sa tvrdoćom od oko 1370 Knoop.

Ipak, njegov fundamentalni limit je pad transmisije preko 5 μm , što ga čini neupotrebljivim za LWIR senzore. Zbog toga se safir dominantno koristi za zaštitu MWIR kamera, SWIR senzora i VIS optike.

- Ograničenja standardnih IR materijala: Iako Germanijum poseduje odličnu propustljivost u MWIR i LWIR opsezima, njegova primena na brzo pokretnim platformama je visoko rizična. Pri aerodinamičkom zagrevanju na temperaturama preko 100°C, germanijum postaje termalno neproziran (efekat termalnog "oslepljivanja"). Pored toga, njegov izuzetno visok indeks prelamanja ($n \approx 4.0$) generiše visoke refleksione gubitke na površinama, što zahteva primenu kompleksnih i skupih antirefleksionih (AR) premaza. Standardni ZnS predstavlja jeftiniju i termalno stabilniju alternativu za LWIR sisteme, iako ima znatno nižu tvrdoću od germanijuma.
- Primer optimizacije iz prakse: Prilikom projektovanja elektro-optičkog sistema za perimetarsku zaštitu i rano uočavanje dronova, ukoliko dizajn dozvoljava višestruke prozore, optimalno je primeniti segmentirani pristup. Dnevni i laserski kanali se štite prozorima od safira (zbog visoke propustljivosti i maksimalne otpornosti na habanje), dok se za LWIR termovizijsku kameru koristi standardni ZnS ili Germanijum. Međutim, ako je prioritet minimizacija celokupne korisne nosivosti (npr. na mobilnoj platformi sa strogim ograničenjima mase), mora se preći na Multispektralni ZnS i žrtvovati deo mehaničke otpornosti zarad spajanja optičkih putanja.

4.2.2 Optimizacija propustljivosti prozora primenom antirefleksionih (AR) premaza

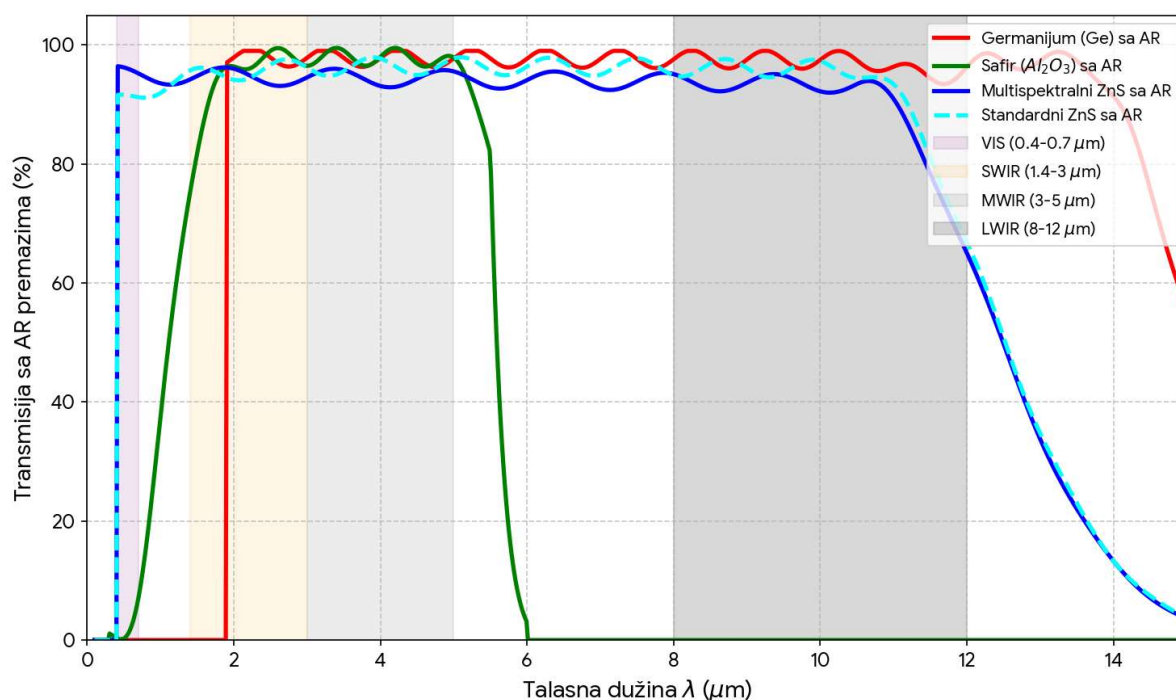
Visok indeks prelamanja optičkih materijala u infracrvenom delu spektra, pored toga što uzrokuje prethodno opisanu sfernu aberaciju i pomeraj fokusa, generiše i značajne gubitke usled Frenelove refleksije na granicama sredina (vazduh-prozor i prozor-vazduh). Količina reflektovane energije pri normalnom upadu zraka direktno zavisi od indeksa prelamanja materijala (n) i definisana je jednačinom (26).

U kontekstu sistema za ranu detekciju bespilotnih letelica, gde je imperativ prikupljanje maksimalnog broja fotona sa cilja male toplotne isijavajuće površine na velikim udaljenostima, ovi refleksioni gubici su neprihvatljivi. Zbog toga se primena antirefleksionih (AR) premaza nameće kao obavezan korak u dizajnu.

- **Frenelovi gubici kod neobloženih materijala:**

- Germanijum: Sa indeksom prelamanja $n \approx 4$, refleksija na jednoj površini iznosi visokih 36%. Kroz neobloženu planparalelnu ploču od germanijuma, ukupna transmisija pada ispod 47%, što znači da se više od polovine korisnog signala gubi isključivo usled refleksije.
- Cink-sulfid (ZnS): Sa indeksom $n \approx 2.2$, gubitak po površini iznosi oko 14%, te ukupna transmisija neobloženog prozora iznosi približno 74%. Iako bolji od germanijuma, ovaj gubitak je i dalje prevelik za senzore visoke osetljivosti.
- **Višeslojni AR premazi (Broadband AR):** Kako bi se transmisija podigla na nivoe iznad 95% (ili čak 98% u uskim spektralnim opsezima), na površine prozora se nanose tanki slojevi dielektričnih materijala različitih indeksa prelamanja. Debljina ovih slojeva se optimizuje tako da izazove destruktivnu interferenciju za reflektovane talase, a konstruktivnu interferenciju za transmitovane talase. U multisenzorskim sistemima sa zajedničkom aperturom (gde se koristi multispektralni ZnS), dizajniraju se kompleksni višeslojni premazi koji moraju efikasno da rade u izuzetno širokom opsegu (od vidljivog do LWIR dela spektra).
- **DLC premazi (Diamond-Like Carbon) za spoljašnje površine:** Pored optičke optimizacije, spoljašnja površina prozora je izložena rigoroznim uslovima okoline (abrazija usled peska, kiše, uticaj slane vlage). Zbog toga se na spoljnu stranu prozora (posebno kod Ge i ZnS) često nanosi DLC premaz. Ovaj sloj ugljenika debljine nekoliko mikrometara ne samo da deluje kao efikasan AR premaz za infracrveni spektar, već drastično povećava površinsku tvrdoću, štiteći mekše osnovne materijale od mehaničkih oštećenja koja bi vremenom degradirala MTF sistema usled rasejanja svetlosti na mikropukotinama.

Na Slika 19 grafik prikazuje spektralnu transmisiju odabranih materijala (multispektralni ZnS, standardni ZnS, Safir i Germanijum) kroz VIS, SWIR, MWIR i LWIR opsege spektra. Osa X predstavlja talasnu dužinu (u mikrometrima), osa Y procenat transmisije.



Slika 19 – Grafik spektralne transmisije. Osa X predstavlja talasnu dužinu (u mikrometrima), osa Y procenat transmisije. Krive prikazuju karakteristike odabranih materijala (multispektralni ZnS, standardni ZnS, Safir i Germanijum), sa primenjenim AR premazima, kroz VIS, SWIR, MWIR i LWIR opsege spektra.

Prikazani grafik ilustruje spektralnu propustljivost referentnih optičkih materijala nakon teorijske i tehnološke primene visokoefikasnih antirefleksnih (AR) tankoslojnih premaza. Primarna svrha ovih premaza je minimizacija Fresnelovih gubitaka refleksije na graničnim površinama optičkog prozora i maksimizacija propustljivosti korisnog signala do FPA (Focal Plane Array) detektora.

Analizom prenosnih karakteristika uočavaju se sledeći ključni optički i solid-state fenomeni:

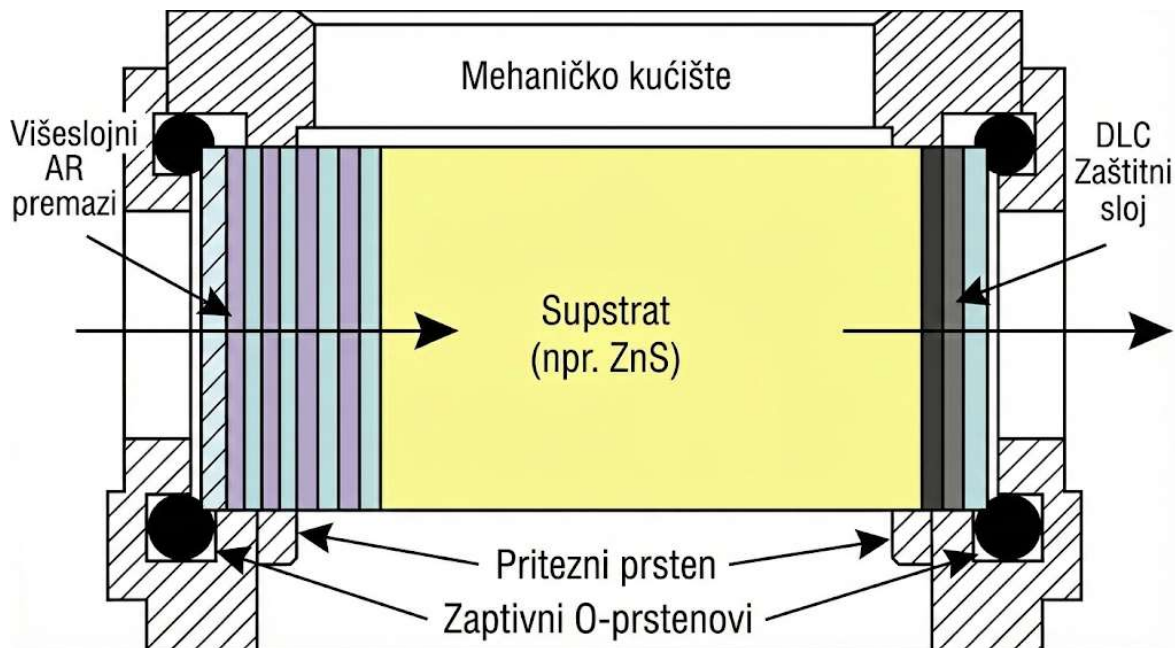
- **Poništavanje Fresnelove refleksije i interferencija:** Primenom AR premaza, vršna (peak) transmisija svih posmatranih materijala u ciljanim atmosferskim prozorima (MWIR opseg 3–5 μm i LWIR opseg 8–12 μm) dostiže vrednosti između 95% i 98%. Karakteristične oscilacije (talasanja) uočljive na prenosnim krivama predstavljaju interferentne maksimume i minimume, koji su direktna fizička manifestacija interakcije upadnog zračenja sa višeslojnom strukturom tankog filma čija je debljina uporediva sa radnom talasnom dužinom.
- **Sopstvena apsorpcija germanijuma (Ge):** Fundamentalno fizičko ograničenje germanijuma uslovljeno je njegovim uskim energetskeg procepa na sobnoj temperaturi ($E_g \approx 0.66 \text{ eV}$). Fotoni sa energijom višom od ovog procepa izazivaju međupojasne prelaze elektrona, usled čega materijal ostaje potpuno nepropustan za talasne dužine kraće od granične vrednosti ($\lambda_c \approx 1.88 \mu\text{m}$). U LWIR opsegu, Ge dominira

kao optimalan materijal sa najvišom transmisijom, pre nego što nastupi pad usled više-fononske apsorpcije na talasnim dužinama iznad 13 μm .

- **Fononsko ograničenje safira (Al_2O_3):** Safir ispoljava izuzetnu propustljivost kontinuirano od vidljivog (VIS) dela spektra sve do 5 μm . Nakon te granice, transmisija naglo degradira na nulu usled jake apsorpcije na optičkim fononima kristalne rešetke, što primenu ovog materijala u elektro-optičkim sistemima visoke rezolucije ograničava isključivo na MWIR sisteme i termalne senzore nižih talasnih dužina.
- **Uticaj strukturnih defekata na cink-sulfid (ZnS):** Komparativna analiza standardnog i multispektralnog ZnS -a jasno ukazuje na uticaj tehnologije proizvodnje na optičke performanse. Multispektralni ZnS zadržava visoku i stabilnu propustljivost u širokom pojasu od VIS do LWIR regije. Nasuprot tome, standardni (CVD deponovan) ZnS ispoljava degradaciju transmisije u VIS i SWIR opsezi, što se objašnjava Mievim i Rejljevskim rasejanjem (scattering) na mikroskopskim strukturnim defektima i zarobljenim hidridima koji nisu procesuirani HIP tehnikom (Hot Isostatic Pressing).

Zaključno, optimizacija senzorskog sklopa zahteva striktno uparivanje spektralne osetljivosti izabranog detektora sa transmisionim parametrima materijala prozora. Primena dizajniranih uskopojasnih ili širokopojasnih AR premaza nameće se kao tehnološki imperativ za minimizaciju optičkog šuma i maksimizaciju dometa detekcije sistema.

Na Sliku 20 prikazan je šematski presek tipičnog modernog zaštitnog prozora optimizovanog za elektro-optičke sisteme visokih performansi. Šematski prikaz slojeva antirefleksnih i zaštitnih premaza, sa posebnim naglaskom na DLC sloj prikazuje struktura koja osigurava maksimalnu transmisiju uz visoku mehaničku zaštitu.



Slika 20 – Šematski prikaz poprečnog preseka optičkog prozora sa premazima. Prikazana struktura osigurava maksimalnu transmisiju uz visoku mehaničku zaštitu kombinacijom unutrašnjih višeslojnih AR premaza i spoljašnjeg hibridnog DLC sloja koji služi i kao antirefleksni i kao mehanički zaštitni sloj visoke tvrdoće.

Ovakva konfiguracija slojeva je industrijski standard za sisteme koji zahtevaju kompromis između visoke optičke osetljivosti i operativne izdržljivosti u teškim uslovima eksploatacije.

4.2.3 Erozijska površina i verifikacija izdržljivosti prozora

Iako primena hibridnih struktura, poput onih prikazanih na Slika 20, teorijski obezbeđuje optimalan balans između optičke propustljivosti i mehaničke zaštite, realni eksploatacioni uslovi pred elektro-optičke sisteme stavljaju ekstremne zahteve. Pri velikim brzinama kretanja platforme, prednja površina prozora (najčešće zaštićena DLC slojem) trpi konstantne udare čestica iz atmosfere.

Najdestruktivniji faktori okoline uključuju eroziju izazvanu velikom brzinom udara kapi kiše (gde pritisak udara može izazvati mikropukotine u premazu ili samom supstratu) i abrazivno delovanje čestica peska i prašine. Ovi mikromehanički udari vremenom degradiraju površinsku hrapavost prozora, što direktno dovodi do povećanog rasejanja svetlosti i značajnog pada Modulacione prenosne funkcije (MTF), poništavajući sve benefite pažljivog optičkog dizajna.

Da bi se sistem klasifikovao kao operativno pouzdan za integraciju na platforme namenjene ranoj detekciji dronova, otpornost prozora na eroziju i udare mora biti eksperimentalno verifikovana prema relevantnim standardima. Ovi standardi garantuju pouzdanost u ekstremnim uslovima eksploatacije i definišu rigorozne procedure za testiranje adhezije premaza i mehaničkog integriteta supstrata.

Reference -spisak primenjenih standarda:

- MIL-STD-810G, Metoda 506.5 (Kiša): Standard za ispitivanje otpornosti optičkih prozora na eroziju usled udara kapi kiše pri velikim brzinama (Rain Erosion Test). Ovo je kritičan parametar za senzore integrisane na letelice i brzo pokretne platforme. [40]
- MIL-STD-810G, Metoda 510.5 (Pesak i prašina): Procedura za verifikaciju otpornosti površine prozora na abraziju i grebanje usled izlaganja česticama peska i prašine nošenim vazдушnim strujama. [41]
- MIL-C-675C / MIL-PRF-13830B: Standardi za specifikaciju i testiranje optičkih premaza. Uključuju test teške abrazije (engl. *Severe Abrasion Test*) koji podrazumeva mehaničko trljanje površine standardizovanom gumicom pod definisanim pritiskom (često primenjivo za testiranje DLC sloja). [42]
- MIL-F-48616: Specijalizovana specifikacija za infracrvene (IR) optičke premaze. Definiše rigorozne testove adhezije premaza za supstrat (engl. *Tape Test*), kao i testove izdržljivosti na visoku vlažnost i nagle temperaturne šokove. [43]
- STANAG 4370 (AECTP 300): NATO normativ koji definiše metodologiju testiranja uticaja okoline, obezbeđujući interoperabilnost i potvrdu optomehaničkog integriteta sistema pri izlaganju teškim klimatskim i dinamičkim ekstremima. [44]

4.2.4 Termalni efekti, aerodinamičko zagrevanje i mehanizmi degradacije signala

Pri dizajnu elektro-optičkih sistema koji se integrišu na brze pokretne platforme (poput letelica ili zemaljskih vozila u pokretu), termalni efekti na zaštitnom prozoru postaju jedan od primarnih faktora degradacije signala. Kinetičko zagrevanje, nastalo usled trenja vazduha o spoljašnju površinu prozora (aerodinamičko zagrevanje), jednako zagreva sve materijale, ali njihova atomska struktura diktira potpuno različite optičke odgovore na povišene temperature. Ova razlika se manifestuje kroz dva različita fizička mehanizma:

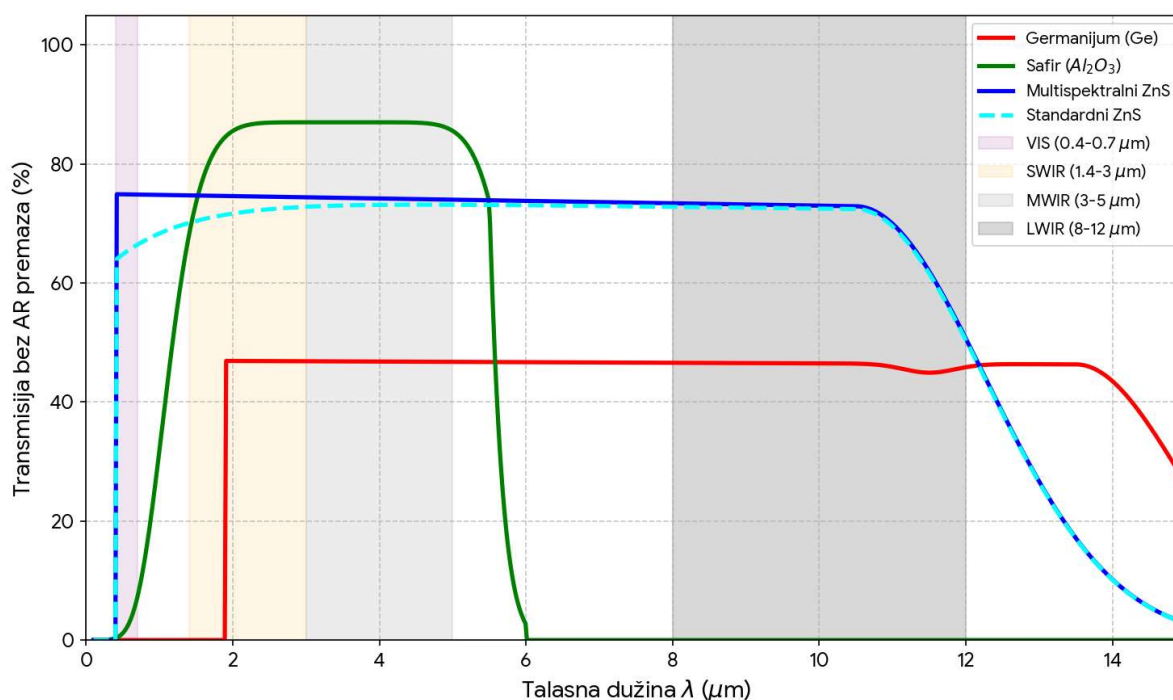
- **Termalno „oslepljivanje“ (engl. *Thermal Runaway*) kod poluprovodnika (Germanijum):** Germanijum poseduje relativno uski energetske proces. Pri aerodinamičkom zagrevanju prozora na temperature iznad 80°C, termalna energija postaje dovoljna za masovnu ekscitaciju elektrona iz valentne u provodnu zonu. Ovi slobodni nosioci naelektrisanja počinju intenzivno da apsorbuju dolazeće infracrvene fotone. Na temperaturama između 100°C i 120°C germanijum ulazi u stanje termalnog „oslepljivanja“ – njegova transmisija naglo pada na nulu, materijal postaje potpuno neproziran za IR zračenje, a senzor više ne detektuje cilj, već isključivo zagrejanu površinu samog prozora [16].
- **Sopstvena emisija (engl. *Self-Emission*) kod dielektrika (ZnS):** Za razliku od germanijuma, cink-sulfid (ZnS) je dielektrični materijal sa znatno širim energetskim

procepom. Aerodinamičko zagrevanje do 200°C ili 300°C nije dovoljno da izazove ekscitaciju elektrona i blokira transmisiju. Prozor od ZnS-a zadržava svoju visoku propustljivost uprkos toploti. Međutim, prema Kirhofovom zakonu toplotnog zračenja, zagrejani materijal mora i da emituje energiju na onim talasnim dužinama na kojima je apsorbuje. Iako ZnS ostaje transparentan za termalni odraz cilja, on usled zagrevanja počinje da zrači sopstvenu IC energiju pravo u vidno polje senzora. Ovo sopstveno zračenje podiže nivo pozadinskog šuma (engl. *background noise floor*) na detektoru, što direktno smanjuje odnos signal-šum (SNR).

Operativne implikacije pri ranoj detekciji dronova: Ako je sistem visoke rezolucije namenjen praćenju malih, slabo kontrastnih ciljeva (poput dronova) pri velikim brzinama platforme, izbor materijala direktno diktira funkcionalnost. Ukoliko se koristi germanijumski prozor, pri postizanju kritične brzine sistem trajno gubi sliku i postaje „slep“. Sa druge strane, termovizijska kamera iza ZnS prozora nastavlja da detektuje toplotni odraz drona, pri čemu algoritmi za obradu slike (ISP) moraju da kompenzuju pojačani termalni šum koji potiče od prozora. Zbog ove osobine, dielektrični materijali predstavljaju standard za zaštitu senzora u uslovima visokog aerodinamičkog zagrevanja.

Praktičan primer u sistemima za ranu detekciju dronova: Ukoliko je elektro-optički sistem namenjen za ranu detekciju i praćenje bespilotnih letelica integrisan na brzu platformu radi presretanja, izbor materijala za prozor je od kritične važnosti. Ako je LWIR termovizijski senzor zaštićen germanijumskim prozorom, pri ubrzanju platforme dolazi do intenzivnog aerodinamičkog zagrevanja. Kada temperatura prozora pređe kritičnu granicu, transmisija naglo pada, a zagrejani prozor počinje da zrači sopstvenu toplotnu energiju koja zaslepljuje detektor.

Krajnji rezultat je potpuni gubitak kontrasta na fokalnoj ravni – suptilan termalni odraz malog drona na velikoj udaljenosti biva potpuno utopljen u toplotni šum samog prozora. U ovakvim operativnim scenarijima, primena standardnog ili multispektralnog ZnS prozora predstavlja jedino pouzdano inženjersko rešenje koje obezbeđuje neprekidno praćenje cilja, uprkos inicijalno nižem indeksu prelamanja na sobnoj temperaturi.



Slika 21 – Grafik spektralne transmisije. Osa X predstavlja talasnu dužinu (u mikrometrima), osa Y procenat transmisije. Krive prikazuju karakteristike odabranih materijala (multispektralni ZnS, standardni ZnS, Safir i Germanijum), bez primenjenih AR premaza, kroz VIS, SWIR, MWIR i LWIR opsege spektra.

Na Slika 21 grafik prikazuje spektralnu transmisiju odabranih materijala (multispektralni ZnS, standardni ZnS, Safir i Germanijum) kroz VIS, SWIR, MWIR i LWIR opsege spektra. Osa X predstavlja talasnu dužinu (u mikrometrima), osa Y procenat transmisije. Uvidom u date krive koje prikazuju karakteristike odabranih materijala zaključuje se sledeće:

- Superiornost multispektralnog cink-sulfida (ZnS): Plava kriva demonstrira jedinstvenu karakteristiku multispektralnog (Cleartran) cink-sulfida. Ovo je jedini komercijalno dostupan prozor koji održava visoku i stabilnu propustljivost u izuzetno širokom pojasu – od vidljivog (VIS) spektra na 0.4 μm , pa sve do kraja dugotalasnog infracrvenog (LWIR) opsega na 12 μm . Ova širina propusnog opsega omogućava projektovanje sistema zajedničke aperture (engl. *Shared Aperture Systems*).
- Ograničenja standardnih materijala:
 - Safir (zelena kriva): Pokazuje odlične karakteristike u VIS, SWIR i MWIR opsegu, gde propušta preko 85% zračenja (pre nanošenja AR premaza). Međutim, njegov fizički limit je nagli pad transmisije iznad 5 μm , zbog čega je potpuno neupotrebljiv za LWIR senzore.
 - Germanijum (crvena kriva): Zbog visokog indeksa prelamanja, germanijum bez AR premaza propušta manje od 50% zračenja. Iako se primenom AR premaza ova vrednost može podići na 98%, njegova primarna mana ostaje potpuna neprozirnost za talasne dužine ispod 1.8 μm (VIS i veći deo SWIR opsega).

- Standardni ZnS (svetlo plava isprekidana kriva): Za razliku od multispektralnog pandana, standardni ZnS usled unutrašnjeg rasejanja (engl. *forward scattering*) ima izuzetno lošu transmisiju u VIS i SWIR opsezima, te svoju primenu nalazi isključivo kao jeftinija alternativa za LWIR sisteme. Standardni CVD deponovani materijali, poput neobrađenog ZnS-a ili ZnSe-a, često ispoljavaju pad transmisije na kraćim talasnim dužinama usled mikroskopskog rasejanja i strukturnih defekata u kristalnoj rešetki (engl. *haze defects*) [45].
- Primer integracije senzora u multispektralnoj arhitekturi: Prilikom dizajniranja senzorske glave za detekciju i praćenje letelica (dronova), inženjeri često moraju da integrišu dnevnu kolor kameru visoke rezolucije, laserski obeleživač cilja (1.06 μm ili 1.54 μm) i LWIR termovizijsku kameru u zajedničko zaštitno kućište na gimbalu. Ukoliko bi se koristio germanijum, prozor bi blokirao dnevnu kameru i laser. Ukoliko bi se koristio safir, LWIR termovizija bi bila potpuno neupotrebljiva. Jedino ugradnjom prozora od multispektralnog ZnS-a sva tri senzora mogu neometano "gledati" kroz istu fizičku barijeru prema spoljnom svetu, čime se u velikoj meri smanjuje masa senzorske platforme.

Pored navedene termalne stabilnosti, presudan inženjerski faktor za konačan izbor materijala zaštitnog prozora je njegova spektralna propustljivost u specifičnom radnom opsegu detektora. Detaljna analiza transmisionih karakteristika referentnih optičkih materijala (germanijum, safir, standardni i multispektralni ZnS) kroz različite spektralne opsege — od ljudima vidljivog (VIS) do dugotalasnog infracrvenog (LWIR) zračenja, sa i bez primene antirefleksionih premaza je detaljno prikazana i diskutovana u predhodnim sekcijama (videti Slika 19 i Slika 21).

4.2.5 Uticaj kvaliteta obrade površine zaštitnog prozora na degradaciju MTF-a

Pored unutrašnjih fizičkih i optičkih karakteristika samog materijala, konačne performanse elektro-optičkog sistema za ranu detekciju kritično zavise od kvaliteta mašinske i optičke obrade zaštitnog prozora. S obzirom na to da prozor predstavlja prvi optički element u sistemu, svaka nesavršenost na njegovim površinama deluje kao modifikator upadnog talasnog fronta. Kvalitet obrade se definiše i analizira kroz dva odvojena parametra: hrapavost površine (mikro-nivo) i tačnost oblika (makro-nivo).

- Hrapavost površine (engl. *Surface Roughness*): Ovaj parametar se odnosi na visokofrekventne, mikroskopske devijacije visine površine koje nastaju kao posledica procesa brušenja i poliranja. Najčešće se izražava preko efektivne (engl. RMS - *Root Mean Square*) hrapavosti, obeležene sa σ .

Prisustvo mikroneravnina na granici sredina dovodi do rasejanja svetlosti (engl. *scattering*). Količina energije koja se izgubi iz glavnog snopa usled ovog rasejanja naziva se ukupno

integrirano rasejanje (engl. *TIS - Total Integrated Scatter*). Za relativno glatke površine gde je $\sigma \ll \lambda$, TIS se može aproksimirati relacijom (38):

$$TIS \approx \left(\frac{4\pi\sigma\cos\theta_i}{\lambda} \right)^2 \quad (38)$$

gde je λ radna talasna dužina, a θ_i upadni ugao zraka. Svetlost rasejana na površinskim neravninama ne doprinosi formiranju korisne slike, već se rasipa unutar optičkog sistema formirajući difuzni „veo“ (engl. *veiling glare*) preko fokalne ravni senzora. Ovo rezultira uniformnim padom Modulacione prenosne funkcije (MTF) na svim prostornim frekvencijama, što se na slici manifestuje kao globalni gubitak kontrasta.

- Tačnost oblika (engl. *Surface Flatness / Irregularity*): Za razliku od hrapavosti, tačnost oblika predstavlja niskofrekventne, makroskopske devijacije površine u odnosu na idealnu matematičku ravan. Ove devijacije se u optičkoj industriji najčešće mere interferometrijski i izražavaju u delovima referentne talasne dužine (npr. $\lambda/4$ pri 633 nm).

Ukoliko površine prozora nisu savršeno paralelne ili sadrže lokalna udubljenja i ispupčenja, prozor gubi svojstvo idealne planparalelne ploče i poprima asimetričnu optičku moć. Pri prolasku konvergentnog ili paralelnog snopa kroz ovakav element, u talasni front se direktno unose aberacije niskog reda, kao što su astigmatizam ili koma. Posledično, dolazi do širenja fokalne mrlje na detektoru, što značajno degradira MTF na visokim prostornim frekvencijama, uništavajući sposobnost sistema da razluči fine detalje.

Praktične implikacije pri ranoj detekciji bespilotnih letelica:

U sistemima gde je imperativ prepoznavanje drona na maksimalnom dometu, cilj često zauzima svega nekoliko piksela na termovizijskom senzoru (tzv. sub-piksela detekcija).

- Ukoliko je prozor izrađen od mekšeg materijala (kao što je multispektralni ZnS) koji je teže ispolirati do savršenstva, povećana hrapavost će izazvati rasejanje koje maskira slabi termalni potpis drona, utapajući ga u pozadinu.
- Sa druge strane, ukoliko prozor ima lošu tačnost oblika (ili se naknadno deformiše usled prejakog zatezanja u mehaničkom kućištu), uneti astigmatizam će asimetrično „razmazati“ toplotnu mrlju cilja. Ovo ne samo da degradira sliku, već direktno ometa algoritme za automatsko praćenje (engl. *auto-tracking*) koji zahtevaju precizno definisan centar mase cilja.

4.2.6 Optomehanička integracija i uticaj montažnog stresa na performanse sistema

Proces ugradnje zaštitnog prozora u mehaničko kućište senzorske glave (najčešće pomoću prirubnica, O-ring zaptivki i navojnih prstenova) predstavlja kritičnu fazu u kojoj se idealan

optički element izlaže realnim mehaničkim opterećenjima. Sila stezanja, neophodna za obezbeđivanje hermetičnosti i strukturalnog integriteta sistema (zaštita od vlage i prašine), neizbežno indukuje naprezanje unutar materijala prozora. Ovaj montažni stres degradira optičke performanse kroz dva osnovna mehanizma:

- Mehanička deformacija oblika (engl. *Surface Deformation*): Neujednačena sila pritiska po obodu prozora dovodi do njegovog makroskopskog savijanja.

Čak i mikrometerske deformacije narušavaju početnu tačnost oblika (planparalelnost) i transformišu prozor u element sa asimetričnom optičkom moći. Ovo savijanje direktno unosi aberacije, najčešće astigmatizam i komu, u prolazeći talasni front. Što je prozor tanji ili mu je modul elastičnosti (Young-ov modul) manji (kao kod multispektralnog ZnS-a u poređenju sa safirom), to je podložniji ovom tipu degradacije.

- Fotoelastični efekat i naponsko dvolomljenje (engl. *Stress Birefringence*): Pored fizičkog savijanja, mehanički stres menja samu unutrašnju strukturu materijala, uzrokujući lokalne promene indeksa prelamanja. Ovaj fenomen, poznat kao fotoelastični efekat, srazmeran je primenjenom opterećenju i može se aproksimirati relacijom $\Delta n = K \cdot \sigma$, gde je Δn promena indeksa prelamanja, K fotoelastična konstanta (stres-optički koeficijent) materijala, a σ primenjeno mehaničko naprezanje.

Pod stresom, izotropan materijal (poput Ge ili ZnS) postaje optički anizotropan, što znači da indeks prelamanja postaje zavisn od polarizacije upadne svetlosti. Kao rezultat, dolazi do cepanja zraka i formiranja dvostruke fokalne tačke. Ovo naponsko dvolomljenje dovodi do značajnog pada Modulacione prenosne funkcije (MTF) na visokim prostornim frekvencijama.

Praktične implikacije pri projektovanju sistema za ranu detekciju dronova:

Prilikom razvoja elektro-optičkih sistema velikog dometa, precizna optomehanička tolerancija je apsolutni imperativ. U scenariu gde se prozor od multispektralnog ZnS-a montira na stabilisanu platformu (gimbal) i priteže standardnim prstenom bez adekvatne kontrole momenta pritezanja (engl. *torque control*):

- Neujednačen pritisak će deformisati prozor, stvarajući astigmatizam koji deformiše tačkasti toplotni odraz udaljenog drona u razmazanu elipsu na detektoru.
- Istovremeno, indukovano naponsko dvolomljenje će dodatno defokusirati tu elipsu usled promene indeksa prelamanja.

Krajnji rezultat je da se energija cilja, koja bi u idealnom optičkom dizajnu pala na svega jedan ili dva piksela senzora, rasipa na širu grupu piksela. Količina energije po pojedinačnom pikselu pada ispod praga šuma pozadine, čime se efektivni domet detekcije i prepoznavanja u velikoj meri smanjuje, isključivo usled neadekvatne optomehaničke integracije.

4.2.7 Zaključna razmatranja o izboru materijala i dizajnu zaštitnih prozora

Kompleksnost dizajna savremenih elektro-optičkih sistema namenjenih za ranu detekciju bespilotnih letelica zahteva holistički pristup optimizaciji zaštitnih prozora. Kao što je demonstrirano kroz prethodne analize, zaštitni prozor odavno ne predstavlja samo pasivnu mehaničku barijeru. On je kritičan optički element prve površine koji direktno determiniše i limitira krajnje performanse celokupnog senzorskog sklopa.

Konačan izbor materijala, njegove debljine i metoda optomehaničke integracije predstavlja inženjerski kompromis koji se mora prilagoditi specifičnoj operativnoj nameni sistema:

- Multisenzorska integracija i arhitektura zajedničke aperture: U sistemima gde se zahteva fuzija senzora (dnevna kamera, SWIR laserski daljinomer i termovizija) radi minimizacije ukupne mase i gabarita pokretne platforme, multispektralni ZnS predstavlja jedini optimalan izbor. Njegov širokopojasni transmisivni prozor (od 0.4 μm do 12 μm) kompenzuje nižu tvrdoću u poređenju sa safirom, omogućavajući nesmetan rad svih podsistema kroz jedinstvenu fizičku aperturu.
- Ekstremna mehanička i termalna opterećenja: Za platforme visokih performansi gde dominira intenzivno aerodinamičko zagrevanje i visok pritisak, a senzorski paket je ograničen isključivo na MWIR opseg, safir ostaje tehnološki neprikosnoven. Njegova visoka termalna stabilnost sprečava emisiju sopstvenog zračenja koja bi podigla nivo šuma, dok izuzetna mehanička tvrdoća garantuje dugotrajnu otpornost na abraziju mikroskopskih čestica u vazduhu pri velikim brzinama.
- Specijalizovani stacionarni LWIR sistemi: Kada je sistem optimizovan prvenstveno za dugotalasni infracrveni spektar (LWIR) i operiše u uslovima kontrolisanog zagrevanja (kao što su stacionarni zemaljski sistemi za perimetarsku zaštitu i nadzor), germanijum nudi vrhunske optičke performanse uz primenu adekvatnih višeslojnih AR premaza. Međutim, njegov inherentni problem termalnog „oslepljivanja“ na temperaturama iznad 80°C ga apsolutno diskvalifikuje za primenu na brzim letelicama.
- Pouzdana LWIR alternativa: Standardni ZnS se pozicionira kao izuzetno pouzdana i isplativa alternativa germanijumu za LWIR sisteme koji su izloženi povišenim temperaturama. Iako nudi veću termalnu stabilnost, njegova primena zahteva žrtvovanje VIS i SWIR kanala usled visokog unutrašnjeg rasejanja u tim delovima spektra.

Zaključak u kontekstu rane detekcije bespilotnih letelica: Uspešna detekcija drona na maksimalnom dometu, gde cilj na detektoru često zauzima svega deo piksela (sub-piksela detekcija), ne ostavlja prostor za greške u dizajnu prozora. Inženjersko rešenje mora predvideti debljinu prozora koja garantuje strukturalni integritet, ali je istovremeno dovoljno mala da minimizuje indukovanu sfernu aberaciju i longitudinalni pomeraj fokusa.

Dodatno, optomehanička montaža mora biti izvedena uz strogu kontrolu momenta pritezanja kako bi se sprečio fotoelastični efekat i naponsko dvolomljenje, dok površinska obrada (hrapavost i tačnost oblika) mora biti na nivou koji eliminiše rasejanje svetlosti. Svaki kompromis koji zanemari ove aspekte direktno će rezultirati disperzijom slabog toplotnog odraza cilja po susednim pikselima senzora, utapajući signal u pozadinski šum i značajno degradirajući efektivni domet detekcije čitavog elektro-optičkog sistema.

4.2.8 Digitalna kompenzacija optičkih aberacija i obnova Modulacione prenosne funkcije (MTF)

S obzirom na to da je optička degradacija signala pri prolasku kroz zaštitne prozore (posebno deblje prozore pod velikim uglovima upada) fizički neizbežna, moderni elektro-optički sistemi se oslanjaju na napredne algoritme za digitalnu obradu slike unutar ISP-a (engl. *Image Signal Processor*). Cilj ovih algoritama je veštačka rekonstrukcija Modulacione prenosne funkcije (MTF) i povraćaj kontrasta na visokim prostornim frekvencijama, čime se kompenzuju sferna aberacija i astigmatizam indukovani optikom.

Ovaj proces se realizuje kroz nekoliko ključnih mehanizama:

- **Izoštavanje ivica (Edge Enhancement):** Osnovni pristup podrazumeva primenu prostornih visokopropusnih filtara (npr. *Unsharp Masking* ili Laplasovi filtri) direktno na sirovu sliku sa senzora. Algoritam detektuje regione sa brzim promenama intenziteta piksela (ivice) i veštački povećava razliku u osvetljenosti između susednih piksela na tim prelazima. Na ovaj način se vizuelno izoštrava slika i popravlja lokalni kontrast, što delimično maskira efekat difuznog rasejanja izazvanog prozorom.
- **Dekonvolucija i inverzno filtriranje:** Napredniji sistemi koriste algoritme dekonvolucije (poput Wienerovog filtara). Ukoliko je optička degradacija prozora unapred poznata i matematički modelovana preko funkcije širenja tačke (PSF - *Point Spread Function*), ISP može primeniti inverzni matematički operator na dobijenu sliku. Ovim postupkom se "razmazana" energija cilja sistemski vraća ka centru, čime se MTF kriva veštački podiže na višim frekvencijama, približavajući se idealnim, difrakciono-limitiranim vrednostima.
- **Fizička ograničenja i amplifikacija šuma:** Iako digitalna kompenzacija MTF-a može značajno poboljšati vizuelni prikaz, ona ima stroga fizička ograničenja definisana Šenonovom teoremom. Digitalni filter ne može da stvori informacije koje optika nije propustila do senzora [18]. Što je agresivniji algoritam za podizanje MTF-a, to on snažnije pojačava i visokofrekventni prostorni šum senzora (tzv. *noise boosting*). Ukoliko je prozor izazvao preveliki pad optičkog signala, pokušaj digitalne obnove će rezultirati slikom koja je oštra, ali potpuno prekrivena zrnatim šumom, što u velikoj meri obara ukupni odnos signal-šum (SNR).

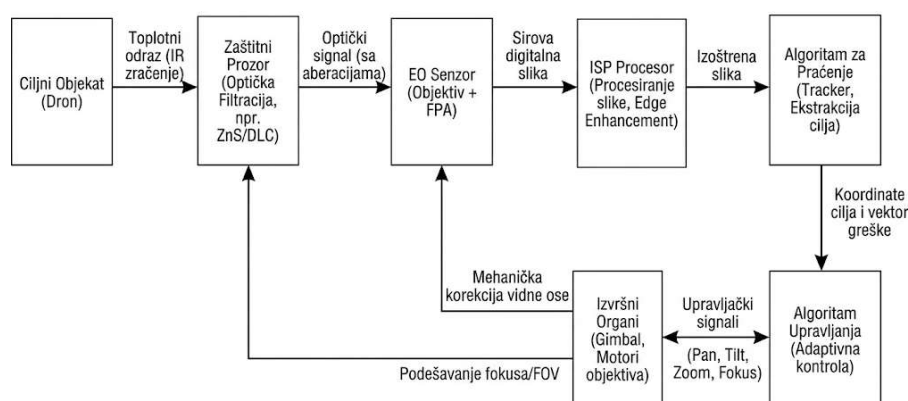
Praktičan primer u sistemima za ranu detekciju dronova: U hipotetičkom operativnom scenariju posmatra se termovizijska kamera sa ugrađenim cink-sulfidnim (ZnS) prozorom debljine 10 mm koja prati mali komercijalni dron na udaljenosti od 3 kilometra.

- Usled sferne aberacije prozora, toplotni potpis drona na detektoru gubi oštrinu i formira razmazanu mrlju niske modulacije, koju algoritam za automatsko praćenje (engl. *auto-tracker*) ne može jasno da izdvoji od pozadine neba.
- Prolaskom kroz ISP, primenjuje se algoritam za kompenzaciju MTF-a koji pojačava visoke frekvencije. Ivice toplotnog odraza drona postaju strmije i definisanije.
- *Kritični limit:* Ukoliko je prozor bio previše debeo i prigušio signal drona ispod praga šuma pozadine ($NE\Delta T$ senzora), ISP će umesto drona izoštriti sam termalni šum atmosfere i šum elektronike. Algoritam za praćenje usled toga gubi stabilnost i vrši pogrešnu asocijaciju cilja na osnovu veštački izoštrenog šuma, što direktno dovodi do generisanja lažnih alarma. Zbog toga se optički dizajn prozora mora optimizovati tako da optički MTF nikada ne padne ispod kritične vrednosti koju ISP može bezbedno da rekonstruiše bez uništavanja SNR-a.

4.3 Integracija rešenja

Konačno, predloženo rešenje podrazumeva sinergiju aktivnog i pasivnog pristupa. Optimizovani zaštitni prozor obezbeđuje visok odnos signal-šum i očuvanje detalja slike, što algoritmu za praćenje pruža kvalitetniji ulazni signal. Sa pouzdanijim podacima o poziciji cilja, algoritam za adaptivno upravljanje može agresivnije i brže sužavati vidno polje bez rizika od gubitka drona, čime se značajno skraćuje vreme potrebno za pozitivnu identifikaciju pretnje.

Konceptualni prikaz integrisanog rešenja, sa označenim ključnim komponentama i tokovima informacija između senzora, procesora i aktuatora, dat je na Slika 22.



Slika 22 – Konceptualni dijagram integrisanog sistema. Prikazani su tok signala od cilja kroz zaštitni prozor i elektro-optički (EO) senzor, sekvence digitalnog procesiranja slike i ekstrakcije podataka (Tracker), sve do algoritma upravljanja koji vrši korekciju izvršnih organa (gimbal i objektiv).

4.3.1 Analiza toka informacija u integrisanom elektro-optičkom sistemu:

- Prijem i optička filtracija (pasivni podsistem): toplotni odraz cilja, koji prolazi kroz atmosferu, nailazi na zaštitni prozor. Fizičke i optičke karakteristike prozora (debljina, materijal, AR i DLC premazi) služe kao primarni hardverski filter. Njihova optimizacija osigurava da signal stigne do objektiva i fokalne ravni (FPA) sa minimalno unesenom sfernom aberacijom i naponskim dvolomljenjem, garantujući optimalan početni MTF.
- Procesiranje i kompenzacija (aktivno-softverski nivo): sirova digitalna slika sa EO senzora prvo prolazi kroz procesor signala slike (ISP). U ovoj fazi se primenjuju algoritmi za digitalno pooštavanje (engl. *Edge Enhancement*) o kojima je prethodno bilo reči, kako bi se povratio izgubljeni mikrokontrast. Izoštrena slika, očišćena od pojačanog šuma, zatim se prosleđuje softverskom modulu za automatsko praćenje (engl. *Tracker*).
- Ekstrakcija podataka i upravljanje (zatvaranje petlje): algoritam za praćenje izoluje cilj iz pozadine, izračunava centar mase (ili oblik) drona i prosleđuje njegove koordinate u realnom vremenu algoritmu za adaptivno upravljanje. Ovaj kontrolni modul preračunava grešku praćenja i šalje komande izvršnim organima (aktuatorima).
- Mehanička akcija (izvršni organi): Elektromotori stabilisane platforme (gimbala) vrše fizičku korekciju vidne ose (pan i tilt), dok servo-motori objektiva prilagođavaju fokusnu ravan (kompenzujući pomeraj fokusa Δf usled prisustva prozora) ili menjaju vidno polje (zoom).

4.3.2 Primer praktične primene: Presretanje brzog manevarskog cilja

Ukoliko komercijalni dron naglo promeni putanju pri jakom vetru, njegov toplotni odraz se ubrzano pomera ka ivici vidnog polja senzora.

- Zbog ranije objašnjenog pada MTF-a usled van-osnog ugla upada zraka kroz prozor (Slika 18), dron počinje vizuelno da gubi oštrinu.
- Međutim, pošto je prozor optimalno dimenzionisan (npr. 4 mm umesto 10 mm), pad signala je manje izražen, što procesoru ostavlja dovoljno korisnog kontrasta za veštačko izoštravanje.
- Modul za praćenje (engl. *tracker*) obezbeđuje neprekidan zahvat (engl. *lock-on*) cilja i šalje vektor kretanja kontrolnom sistemu, koji istog trenutka rotira gimbal, vraćajući cilj u optički centar sistema (gde je sferna aberacija prozora minimalna), sprečavajući gubitak drona iz vidnog polja.

U tabeli 13 data je procena ukupnog poboljšanja performansi sistema usled sinergijskog efekta predloženih unapređenja, izražena kroz povećanje dometa detekcije i verovatnoće klasifikacije.

4.3.3 Sinergijski efekat unapređenja i procena ukupnih performansi

Pojedinačna optimizacija svake komponente u lancu akvizicije – od izbora multispektralnog ZnS materijala i primene hibridnih DLC premaza, do implementacije naprednih ISP algoritama za kompenzaciju MTF-a – ne donosi samo linearna poboljšanja. Njihovom integracijom u jedinstven, povratno-spregnuti sistem (prikazan na Slici 21) ostvaruje se snažan sinergijski efekat.

Ovaj efekat se ogleda u tome što hardverska poboljšanja (veća propustljivost, manje rasejanje) direktno podižu odnos signal-šum (SNR), obezbeđujući softveru (algoritmu za praćenje i ISP-u) znatno kvalitetniji ulazni podatak. Softver, sa svoje strane, radi brže i preciznije, omogućavajući trenutnu korekciju vidne ose pre nego što cilj napusti vidno polje.

4.3.4 Metodologija hibridne kvantitativne procene performansi

Kako bi se kvantifikovao ukupan sinergijski efekat predloženih unapređenja i procenile operativne performanse integrisanog sistema, usvojena je hibridna metodologija modelovanja. Ona kombinuje egzaktno simulacije termalnih i upravljačkih podistema sa analitičkim optičkim modelima dostupnim u referentnoj literaturi.

Vrednosti prikazane u analizi rezultat su sledećih koraka:

- Analitičko modelovanje optičkih performansi (MTF): Zbog kompleksnosti direktnog praćenja zraka, degradacija talasnog fronta i pad Modulacione prenosne funkcije (MTF) usled sferne aberacije procenjivani su oslanjajući se na uspostavljene analitičke modele za planparalelne ploče od cink-sulfida (ZnS) dostupne u literaturi [4, 16, 18]. Referentna vrednost MTF-a definisana je za Nyquistovu prostornu frekvenciju detektora od 41.7 lp/mm (za savremenu generaciju senzora sa veličinom piksela od 12 μm). Smanjenje fizičkih dimenzija piksela (engl. pixel pitch) eksponencijalno pooštrava optičke tolerancije, čineći kompenzaciju prozorskih aberacija kritičnim faktorom dizajna.
- Simulacija dometa i atmosferske transmisije (NVThermIP [46], NV-IPM [47] i MODTRAN [48]): Taktičke performanse sistema, odnosno dometi detekcije i klasifikacije, egzaktno su simulirani korišćenjem softverskog paketa NVThermIP [46], kao i metodologije njegovog naslednika, platforme NV-IPM [47]. Atmosfersko slabljenje infracrvenog signala modelovano je kroz MODTRAN [48] za uslove standardne atmosfere srednjih geografskih širina. Modeli su kalibrisani primenom Džonsonovih kriterijuma [36] za cilj koji odgovara prednjoj projekciji komercijalnog drona (površina 0.03 m², $\Delta T = 2$ K).
- Modelovanje upravljačke petlje (MATLAB/Simulink): Dinamika zatvorene petlje upravljanja, vreme reakcije sistema (od trenutka detekcije do stabilnog praćenja cilja) i uticaj algoritama za izoštravanje slike simulirani su u MATLAB/Simulink okruženju, definisanjem odgovarajućih prenosnih funkcija aktuatora i modula za praćenje (engl. *tracker*).

Rezultati ovih kombinovanih simulacija, upoređeni sa baznim performansama neoptimizovanog standardnog sistema, sumirani su u Tabela 10. Referentni gubitak MTF-a za standardni sistem pri van-osnom uglu od $\theta = 20^\circ$ aproksimiran je na osnovu prethodno navedenih empirijskih podataka iz literature [16, 18], dok je kvantitativna procena ukupnog poboljšanja ostalih taktičko-tehničkih karakteristika računata kroz simulaciju za tipičan referentni cilj (komercijalni dron klase DJI Mini 4 Pro) u uslovima standardne atmosferske vidljivosti.

Tabela 10 – Procena poboljšanja performansi za cilj površine $\sim 0.03 \text{ m}^2$.

Parametar	Trenutno stanje (Standardni sistem)	Očekivano stanje sa unapređenjima	Procentualno poboljšanje
Domet detekcije (za cilj površine $\sim 0.03 \text{ m}^2$)	3.0 km	4.2 km	+40 %
Verovatnoća klasifikacije (na dometu od 1.2 km)	60 %	92 %	+53 %
Vreme reakcije (od detekcije do "zaključavanja")	1.5 s	0.6 s	+60 % (ubrzanje)
MTF sistema (na Nyquist frekv. (*), pri $\theta = 20^\circ$)	$\sim 5\text{-}10 \%$ (prema literaturi [16, 18])	15-20 % (uz digitalnu kompenzaciju)	$\sim 100 \%$

(*) Za standardni savremeni MWIR senzor sa veličinom piksela (pixel pitch) od $10 \mu\text{m}$, Nyquistova frekvencija iznosi $f_N = 1/(2 \cdot 0.01 \text{ mm}) = 50 \text{ lp/mm}$ (linijskih parova po milimetru).

4.3.5 Analiza rezultata i taktičke implikacije:

Podaci izloženi u Tabela 10 jasno kvantifikuju opravdanost primene predloženih optomehaničkih i softverskih arhitektura, a posebno se izdvajaju sledeći ključni aspekti:

- Produženje dometa detekcije i klasifikacije: Zahvaljujući znatnom smanjenju Frenelovih gubitaka (zahvaljujući AR premazima) i eliminaciji astigmatizma usled deformacije prozora, toplotni odraz drona zadržava visoku prostornu frekvenciju na fokalnoj ravni detektora. Cilj koji je ranije na 1.2 kilometra izgledao kao amorfna, mutna mrlja (verovatnoća klasifikacije 60%), sada zadržava jasne geometrijske konture. Ovo povećava verovatnoću tačne klasifikacije na preko 90%, omogućavajući operateru ili AI sistemu da razlikuje dron od ptice na znatno većim udaljenostima.
- Očuvanje MTF-a na ivicama slike: Najveći relativni skok ($\sim 100\%$) beleži se u vrednosti Modulacione prenosne funkcije na ivicama vidnog polja. Optimizacijom debljine prozora i primenom digitalne dekonvolucije u ISP-u, eliminisana je takozvana "slepa

zona" (engl. *blind zone*) na perifernim delovima senzora. Ovo je od krucijalnog značaja za praćenje brzih i visoko-manevarskih ciljeva koji često teže da napuste zonu oko centra optičke ose.

- Skraćenje vremena reakcije: Vreme potrebno softveru da potvrdi cilj i uspostavi stabilno praćenje (engl. *lock-on time*) je više nego prepolovljeno (pad sa 1.5 na 0.6 sekundi). Razlog za ovo je direktna posledica visokog SNR-a; algoritmi više ne moraju da integrišu veliki broj frejmova kako bi izvukli signal drona iz termalnog šuma pozadine (npr. oblaka ili zagrejanog vazduha), već pozitivnu detekciju ostvaruju gotovo trenutno.
- Primer operativne prednosti na terenu: Ukoliko posmatramo rezultat iz NVThermIP simulacije, povećanje efektivnog dometa detekcije sa 3.0 km na 4.2 km pruža operateru kritično operativno vreme za reakciju. Za dron koji se kreće transverzalnom brzinom od 15 m/s, ovaj prirast u dometu od 1.2 kilometra obezbeđuje tačno 80 sekundi dodatnog vremena za donošenje odluke o klasifikaciji pretnje i primeni kontramera pre nego što letelica uđe u branjenu zonu.
- Stabilnost praćenja: Simulacije u Simulinku potvrđuju da kompenzacija optičkih aberacija na ivicama vidnog polja u velikoj meri smanjuje vreme potrebno da aktuatori centriraju cilj. Algoritam brže generiše pouzdan vektor greške, čime se vreme reakcije sistema skraćuje, a rizik od gubitka cilja pri naglim manevrima drona svodi na minimum.

4.3.6 Diskusija o potencijalnim rizicima implementacije i strategijama ublažavanja

Iako rezultati dobijeni hibridnim modelovanjem (Tabela 10) jasno ukazuju na superiornost integrisanog pristupa u dizajnu elektro-optičkih sistema za ranu detekciju dronova, tranzicija iz domena softverskih simulacija u realno hardversko okruženje nosi specifične inženjerske izazove. Kako bi se garantovala operativna pouzdanost sistema, neophodno je identifikovati ključne rizike implementacije i definisati adekvatne strategije za njihovo ublažavanje.

4.3.6.1 Latencija digitalnog procesiranja signala (ISP Latency)

- Opis rizika: Uvođenje naprednih algoritama za digitalno pooštavanje slike (Edge Enhancement) i dekonvoluciju u cilju podizanja MTF-a zahteva značajne računarske resurse. Kod sistema zatvorene petlje (Slika 21), gde se prate brzi manevarski ciljevi poput dronova, svako kašnjenje (latencija) u obradi video signala od strane ISP-a direktno se prevodi u fazno kašnjenje upravljačkog signala ka aktuatorima (gimbalu). Ukoliko je latencija prevelika, sistem upravljanja može postati nestabilan, što dovodi do oscilacija vidne ose i gubitka cilja.
- Mere izbegavanja rizika: Kako bi se vreme obrade svelo na minimum (primera radi ispod 16 ms za sisteme koji rade na 60 Hz), algoritmi za kompenzaciju MTF-a ne smeju se izvršavati na procesorima opšte namene (CPU). Planirana mera mitigacije podrazumeva implementaciju ovih algoritama direktno na nivou hardvera, korišćenjem FPGA (engl.

Field-Programmable Gate Array) tehnologije ili namenskih SoC (engl. *System on a Chip*) arhitektura. Hardversko paralelno procesiranje omogućava primenu visokopropusnih filtara u realnom vremenu, bez uvođenja kritičnog kašnjenja u upravljačku petlju.

4.3.6.2 *Cena materijala i tehnološka složenost izrade prozora*

- Opis rizika: Zahtev za korišćenjem multispektralnog cink-sulfida (Cleartran ZnS) presvučenog složenim DLC (Diamond-Like Carbon) i višeslojnim AR premazima značajno podiže ukupnu cenu senzorskog sistema. Pored same cene sirovine, tehnološki proces poliranja ZnS-a (koji je relativno mekan) do nivoa hrapavosti koji zadovoljava zahteve detektora visoke rezolucije (piksel od 12 μm) predstavlja ozbiljan tehnološki izazov i smanjuje procenat uspešnosti u proizvodnji (engl. *yield*).
- Mere izbegavanja rizika: Optimizacija troškova sprovodi se kroz modularni dizajn senzorske glave. Umesto izrade velikih i skupih sfernih kupola od multispektralnog ZnS-a, preporučuje se korišćenje segmentiranih, planparalelnih prozora manjih dimenzija za svaki senzor pojedinačno, gde god to arhitektura dozvoljava. Takođe, detaljna analiza operativnih zahteva (engl. *Trade-off analysis*) može pokazati da je za određene aplikacije (gde nije potrebna integracija laserskog daljinomera i dnevne kamere kroz isti prozor) ekonomski isplativije zadržati standardni ZnS sa DLC premazom, žrtvujući deo vidljivog spektra zarad značajnog smanjenja troškova.

4.3.6.3 *Optomehanički stres i tolerancije montaže*

- Opis rizika: Prelazak na modernu generaciju FPA senzora sa manjim pikselom (12 μm) u velikoj meri pooštrava tolerancije optičkog sistema. Kao što je ranije analizirano, neadekvatna sila stezanja prilikom ugradnje zaštitnog prozora u mehaničko kućište izaziva deformaciju oblika i fotoelastični efekat (naponsko dvolomljenje). Ovi efekti mogu uneti asimetrične aberacije koje algoritmi za obradu slike ne mogu u potpunosti da kompenzuju, što rezultira degradacijom oštine na ivicama vidnog polja.
- Mere izbegavanja rizika: Umesto krute mehaničke veze, primenjuje se atermalizovana optomehanička montaža. Ovo podrazumeva ugradnju prozora korišćenjem specijalizovanih elastomera (npr. RTV silikon) promenljive debljine, koji deluju kao mehanički baferi. Ovi materijali apsorbuju toplotno širenje kućišta i udarne vibracije iz okoline, sprečavajući transfer mehaničkog stresa direktno na optički materijal prozora. Dodatno, u proizvodnom procesu je neophodna stroga primena moment-ključeva i definisanih procedura za uniformno pritezanje pribornica.

4.4 *Zaključna razmatranja o predloženim unapređenjima*

Kroz sprovedenu analitičku procenu optičkih performansi i modelovanje kinematike upravljanja, egzaktno je pokazano da predložena unapređenja direktno rešavaju fundamentalne kompromise u dizajnu elektro-optičkih sistema. Implementacija determinističkog adaptivnog upravljanja vidnim poljem prevazilazi latenciju i oscilacije karakteristične za pasivni autofokus, dok optimizacija materijala zaštitnog prozora (primena

multispektralnog ZnS materijala) i digitalna obnova MTF-a uspešno kompenzuju indukovane sferne aberacije i termalne efekte. Ovi teorijski modeli nedvosmisleno dokazuju da je integracijom predloženih softverskih i hardverskih poboljšanja moguće značajno produžiti domet detekcije i skratiti vreme reakcije sistema na manevarske ciljeve male efektivne površine. Kako bi se ovi rezultati kvantifikovali i potvrdili u praksi, u narednom poglavlju će predložena arhitektura biti eksperimentalno verifikovana u realnim terenskim uslovima.

5 Praktičan primer i eksperimentalna verifikacija rezultata

Kao što je teorijski pokazano u prethodnim poglavljima, performanse elektro-optičkih (EO) sistema zavise od niza optičkih, kinematičkih i atmosferskih faktora. Kako bi se kvantifikovala tačnost teorijskih predviđanja i sagledala realna degradacija rezolucije u praksi, sprovedena je eksperimentalna verifikacija. Detaljna metodologija terenskog ispitivanja, kao i iscrpna komparativna analiza teorijskih predviđanja i empirijskih merenja koja je ovde prikazana, publikovani su u radu [49].

5.1 Postavka eksperimenta

Iako su inicijalna teorijska razmatranja u ranim fazama istraživanja obuhvatala primenu LWIR termovizijskih senzora, za potrebe finalne eksperimentalne verifikacije u realnim uslovima namenski je odabran senzor u srednjetalasnom infracrvenom opsegu (MWIR). Ova metodološka odluka doneta je iz dva ključna razloga. Prvo, MWIR opseg pruža superioran termalni kontrast pri sub-pikselloj detekciji visokotemperaturnih izvora, poput pogonskih elektromotora drona, naspram relativno hladne pozadine neba. Drugo, zbog kraće talasne dužine zračenja, MWIR optika inherentno generiše manju difrakcionu mrlju (engl. Airy disk). U kombinaciji sa manjom dimenzijom piksela korišćenog hladnog senzora ($10\text{ }\mu\text{m}$), to rezultira drastično višom prostornom rezolucijom (veći broj piksela na meti - PoT) na ekstremnim udaljenostima. Visoka rezolucija MWIR kanala omogućila je znatno precizniju empirijsku verifikaciju i merenje odziva predloženog algoritma za determinističko upravljanje fokusom i adaptivnim vidnim poljem.

Eksperimentalna verifikacija sprovedena je korišćenjem multisenzorskog EO sistema, koji je kruto montiran na stacionarnu zemaljsku platformu i precizno nivelisana kako bi se minimizovale mehaničke vibracije. Sistem integriše dva posmatračka kanala čije su karakteristike detaljno kvantifikovane za potrebe analize prostorne rezolucije:

- **VIS video kanal (vidljivi deo spektra):** Koristi senzor sa veličinom piksela (engl. *detector pitch*) od $4.1\text{ }\mu\text{m}$, uparen sa objektivom maksimalne fokalne dužine od $f_{\text{max}} = 800\text{ mm}$. Na osnovu ovih parametara, trenutno vidno polje (IFOV) ovog kanala iznosi $5.125\text{ }\mu\text{rad}$.
- **MWIR video kanal (srednjetalasni infracrveni deo spektra):** Termalni senzor poseduje veličinu piksela od $10\text{ }\mu\text{m}$ i opremljen je objektivom sa kontinualnim zumom čija maksimalna fokalna dužina iznosi $f_{\text{max}} = 1000\text{ mm}$. Odgovarajući IFOV za ovaj kanal iznosi $10\text{ }\mu\text{rad}$.

Eksperimentalna postavka multisenzorskog EO sistema tokom stacionarnih terenskih merenja je prikazana na Slika 23.



Slika 23 – Eksperimentalna postavka multisenzorskog EO sistema tokom stacionarnih terenskih merenja.

Kao test objekat (meta) korišćena je komercijalna bespilotna letelica (dron) modela **DJI Mini 4 Pro**. Za potrebe teorijskog modelovanja i empirijskog upoređivanja, usvojena je efektivna karakteristična dimenzija (širina) drona od $W = 0.18$ m [49]. Ova vrednost obuhvata prednju projekciju letelice, uključujući centralno kućište i motore, koji predstavljaju primarnu kontinualnu vizuelnu i termalnu masu na koju se algoritmi za akviziciju cilja fokusiraju. Dron je bio orijentisan tako da pruža direktnu frontalnu projekciju u odnosu na senzorski sistem tokom celokupnog trajanja merenja.

Fotografija komercijalne bespilotne letelice (drona) korišćene u eksperimentu – DJI Mini 4 Pro je prikazana na Slika 24.



Slika 24 – Fotografija komercijalne bespilotne letelice (drona) korišćene u eksperimentu – DJI Mini 4 Pro.

5.2 Metodologija terenskog ispitivanja

Prikupljanje empirijskih podataka dizajnirano je sa ciljem da se sistematski izoluju i procene sposobnosti prostorne rezolucije multisenzorske platforme. Dron je navođen da lebdi (engl. *hover*) u mestu na četiri unapred definisane referentne udaljenosti: 100 m, 300 m, 600 m i 900 m. Tačna radijalna udaljenost do svake tačke verifikovana je korišćenjem interne telemetrije drona i potvrđena laserskim daljinomerom radi osiguravanja pozicione tačnosti.

Na svakoj referentnoj udaljenosti, istovremeno su beleženi video zapisi korišćenjem VIS i MWIR kanala. Kako bi se sprečilo da podaci budu kompromitovani softverskim algoritmima za izgladivanje slike (engl. *smoothing*), digitalni video tokovi su snimani direktno sa izlaza senzora, u nekompresovanom sirovom (engl. *raw*) formatu, pre bilo kakve interpolacije na nivou ekranskog prikaza.

Ekstrakcija empirijske metrike broja piksela na meti (PoT) sprovedena je u post-procesuiranju. Slike su analizirane primenom metodologije graničnog okvira (engl. *bounding box*) kako bi se obuhvatio tačan broj piksela koji zauzima vizuelni i termalni potpis drona. Tokom ekstrakcije uzeto je u obzir prostorno odabiranje (engl. *spatial sampling*) karakteristično za matrice fokalne ravni (FPA), pri čemu je prepoznato da tačna lokacija fizičke ivice mete u odnosu na rešetku senzora predstavlja slučajan događaj koji unosi ambiguitet od približno jednog piksela (± 1 pixel).

S obzirom na to da su podaci prikupljeni kroz kontinualne video zapise tokom perioda stabilnog lebdenja drona, empirijske vrednosti prikazane u nastavku rada (Tabela 12) predstavljaju srednje vrednosti (aritmetičku sredinu) ekstrahovane iz reprezentativnog uzorka od 30 uzastopnih frejmova za svaku referentnu udaljenost. Ovakav metodološki pristup primenjen je sa ciljem minimizacije slučajnih grešaka i dobijanja statistički pouzdanih rezultata u odnosu na analizu pojedinačnih, izolovanih frejmova.

Analizom prikupljenog uzorka utvrđeno je da se standardna devijacija izmerenog linearnog broja piksela (PoT) kreće u uskim granicama od 1 do 2 piksela. Iako u apsolutnom iznosu deluju zanemarljivo, ova odstupanja od frejma do frejma su očekivana i predstavljaju direktnu posledicu sledećih faktora:

- Neodređenost prostornog odabiranja: Fizička ivica cilja retko se savršeno poklapa sa granicom pojedinačnog piksela na matrici senzora. Usled ovog efekta diskretizacije, projekcija ivice drona može kontinuirano oscilovati između dva susedna piksela, što direktno unosi varijaciju pri izračunavanju graničnog okvira (piksela na meti).
- Dinamičke mikro-korekcije letelice: Iako je dron bio u režimu stabilnog lebdenja, održavanje stacionarne pozicije pri udarima vetra zahteva neprestane korekcije nagiba letelice (tzv. pitch i roll manevri). Svaka promena ugla drona u prostoru neposredno i trenutno menja veličinu njene efektivne frontalne projekcije koju senzor registruje.

- Atmosferske turbulencije: Prostiranje optičkog i termalnog signala kroz niže slojeve atmosfere podložno je uticaju lokalnih promena u indeksu prelamanja vazduha. Ovi fenomeni dovode do optičkog treperenja (scintilacije) i kratkotrajnih zamućenja, koji u delićima sekunde smanjuju oštrinu ivica i menjaju prividni kontrast cilja na senzoru.

5.3 Rezultati verifikacije

Radi precizne evaluacije performansi akvizicije cilja, rezultati su podeljeni u dve faze. Prvo je uspostavljena idealizovana matematička osnova izračunavanjem teorijskog broja piksela na meti (PoT) za obe kamere na zadatim udaljenostima. Teorijski rezultati, izračunati za maksimalne fokalne dužine, prikazani su u Tabela 11.

Tabela 11 – Izračunate teorijske vrednosti PoT za VIS i MWIR kanale pri maksimalnoj fokalnoj dužini (za karakterističnu dimenziju drona $W = 0.18$ m).

Udaljenost [m]	VIS Kanal (fmax=800 mm)Linearni PoT / Površinski PoT	MWIR Kanal (fmax=1000 mm)Linearni PoT / Površinski PoT
100	351.2 / 123341	180.0 / 32400
300	117.1 / 13712	60.0 / 3600
600	58.5 / 3422	30.0 / 900
900	39.0 / 1521	20.0 / 400

Zatim su upoređene empirijske PoT vrednosti ekstrahovane iz nekompresovanih senzorskih podataka tokom stacionarnih terenskih merenja. Na Slika 25 prikazane su fotografije sa uporednim prikazom bespilotne letelice zabeležene pomoću VIS i MWIR posmatračkih kanala.



Slika 25 – Fotografije sa uporednim prikazom drona zabeležene sa VIS i MWIR kanalima.

Rezultati ovih merenja sumirani su u Tabela 12.

Tabela 12 – Empirijske PoT vrednosti ekstrahovane za VIS i MWIR kanale pri maksimalnoj fokalnoj dužini.

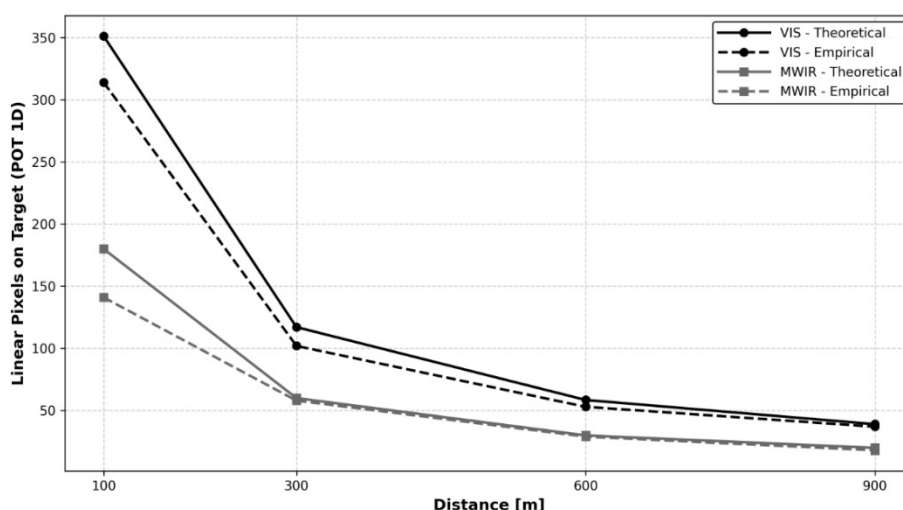
Udaljenost [m]	VIS Kanal (fmax=800 mm)Linearni PoT / Površinski PoT	MWIR Kanal (fmax=1000 mm)Linearni PoT / Površinski PoT
100	314 / 98475	141 / 19754
300	102 / 10440	58 / 3312

Udaljenost [m]	VIS Kanal (fmax=800 mm)Linearni PoT / Površinski PoT	MWIR Kanal (fmax=1000 mm)Linearni PoT / Površinski PoT
600	53 / 2838	29 / 828
900	37 / 1334	18 / 324

5.4 Diskusija

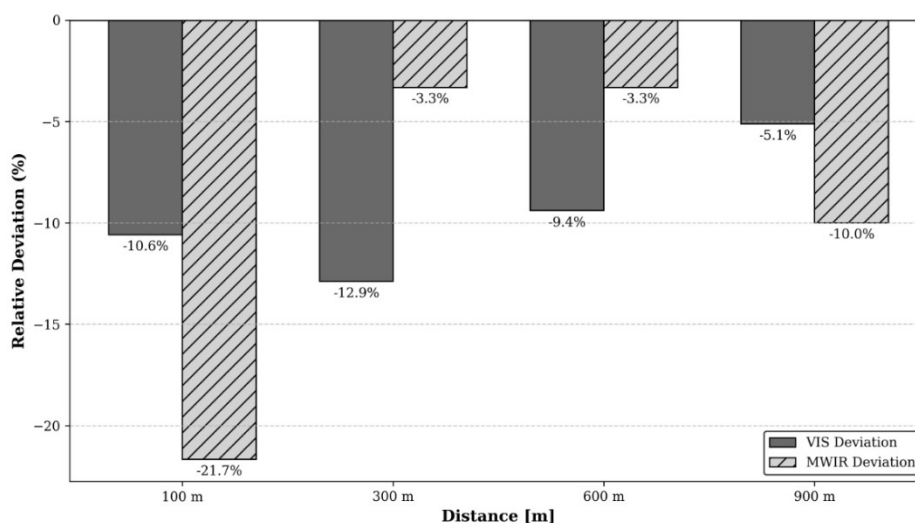
Komparativna analiza teorijskih predviđanja i empirijskih merenja nedvosmisleno ukazuje na to da su empirijske PoT vrednosti konzistentno niže od teorijskih vrednosti na svim referentnim udaljenostima. Primera radi, dok je teorijski model predvideo linearni PoT od 39.0 za VIS kanal na 900 m, empirijsko merenje je dalo svega 37 piksela. Slično tome, MWIR kanal je na istoj udaljenosti pao sa teorijskih 20.0 na empirijskih 18 piksela. Najveća relativna degradacija uočena je u MWIR kanalu na udaljenosti od 100 m, gde je odstupanje iznosilo čak -21.7%.

Na Slika 26 dat je uporedni prikaz teorijskog i empirijskog broja linearnih piksela na meti (POT1D) na različitim referentnim udaljenostima za VIS i MWIR posmatračke kanale (Napomena: Pune linije označavaju teorijske proračune; isprekidane linije predstavljaju empirijska merenja).



Slika 26 – Uporedni prikaz teorijskog i empirijskog broja linearnih piksela na meti (POT1D) na različitim referentnim udaljenostima za VIS i MWIR posmatračke kanale (Napomena: Pune linije označavaju teorijske proračune; isprekidane linije predstavljaju empirijska merenja).

Na Sliku 27 dato je relativno procentualno odstupanje između teorijskog i empirijskog broja linearnih piksela na meti (POT1D) na različitim referentnim udaljenostima za VIS i MWIR posmatračke kanale.



Slika 27 – Relativno procentualno odstupanje između teorijskog i empirijskog broja linearnih piksela na meti (POT1D).

Ova odstupanja potvrđuju da matematički model, koji pretpostavlja savršenu tačkastu projekciju baziranu isključivo na IFOV parametru, predstavlja nedostupni ideal u terenskim uslovima. Kao što je demonstrirano u [49], ukupna degradacija empirijske prostorne rezolucije može se pripisati sinergijskom delovanju optičkih, digitalnih i ekoloških faktora:

- **Optičko zamućenje (engl. *optical blur*):** U praktičnim senzorskim dizajnim, optičko zamućenje (često karakterisano Airy-jevim diskom) uporedivo je sa, ili veće od, IFOV-a detektora. Kombinacija funkcija prenosa modulacije (MTF) optike i detektora uzrokuje "razlivanje" potpisa mete preko susednih piksela, čime se smanjuje oštrina ivica neophodna za precizno definisanje graničnog okvira.
- **Neodređenost prostornog odabiranja:** Fizička lokacija ivice drona u odnosu na rešetku piksela unosi neizbežnu grešku digitalizacije od ± 1 piksela, što na velikim udaljenostima (poput 900 m) predstavlja matematički značajan procentualni gubitak korisne površine mete.
- **Metodološke i geometrijske varijacije:** Dron nije savršen 2D kvadrat. Održavanje stabilnog lebdenja zahteva dinamičke korekcije nagiba (engl. *pitch and roll*) usled vetra, što u realnom vremenu menja njegovu optičku površinu preseka.
- **Atmosferska atenuacija:** Za razliku od teorijskog modela koji pretpostavlja savršeno transparentan medijum, realna merenja na 600 m i 900 m podležu apsorpciji i rasejanju usled ambijentalne vlage i aerosola. Ovo smanjuje prividni kontrast drona, zbog čega tanji strukturni elementi (poput ruku sa propelerima) nestaju u šumu pozadine.

- **Ograničenja termalnog kontrasta (specifično za MWIR):** Karakteristična dimenzija od $W = 0.18$ m pretpostavlja uniformnu radijaciju. U praksi, značajan termalni kontrast generišu pretežno motori i baterija drona. Ukoliko je kućište letelice u termalnoj ravnoteži sa okolinom, MWIR senzor detektuje samo izolovane vruće tačke (engl. *hot spots*), čime se efektivno smanjuje optički presek mete i generiše značajno niži PoT u poređenju sa VIS kanalom.

Ovi eksperimentalni nalazi potvrđuju osnovnu tezu ove disertacije: oslanjanje isključivo na teorijsku prostornu rezoluciju nije dovoljno za pouzdan rad algoritama za klasifikaciju i praćenje. Razvoj efikasnih C-UAV sistema mora nužno uključiti aktivnu i pasivnu kompenzaciju opisanih faktora degradacije (kroz upravljanje, optičke prozore i ISP obradu), kako bi se obezbedila funkcionalnost na graničnim operativnim udaljenostima.

6 Mogućnosti primene

Unapređeni sistem nalazi primenu u zaštiti kritične infrastrukture, granica i vojnih objekata od pretnji dronom. Iako su predložena poboljšanja i metode upravljanja u ovoj disertaciji primarno eksperimentalno verifikovani na multisenzorskom EO sistemu koje koristi senzore u vidljivom (VIS) i srednjetalasnom infracrvenom (MWIR) delu spektra, razvijena arhitektura je univerzalna. Predložena optomehanička i upravljačka rešenja se mogu sa podjednakim uspehom primeniti i na druge tipove elektro-optičkih sistema, uključujući komercijalno pristupačnije sisteme sa dugotalasnim termalnim (LWIR) kamerama, kao i na sisteme koji koriste kamere u kratkotalasnom infracrvenom (SWIR) opsegu.

U narednim potpoglavljima dat je kratak pregled mogućnosti primene unapređenih EO sistema za ranu detekciju dronova..

6.1 Sistemi za obezbeđenje obalskog pojasa i pomorskog saobraćaja

Predložena arhitektura elektro-optičkih sistema poseduje izuzetan potencijal za primenu u domenu zaštite obalskog pojasa, luka, uskih plovnih puteva i praćenja pomorskog saobraćaja. U ovom okruženju, primarni bezbednosni izazov predstavlja rano otkrivanje i neprekidno praćenje asimetričnih pretnji, poput krijumčarskih brzih malih plovila (glisera) ili, sve češće, bespilotnih površinskih plovila (USV - Unmanned Surface Vehicles).

Za razliku od vazdušnog prostora koji služi kao relativno uniformna pozadina pri detekciji dronova, pomorsko okruženje karakteriše izuzetno visok nivo optičkog šuma i dinamičkog pozadinskog klatera. Detekcija plovila male radarske i termalne površine na velikim udaljenostima otežana je usled prisustva morskih talasa, morske pene, kao i jake refleksije sunčevog zračenja sa površine vode (engl. *sun glint*). Dodatni otežavajući faktor predstavlja visoka koncentracija aerosola i vodene pare neposredno iznad površine mora, koji snažno apsorbuju i rasipaju infracrveni signal.

Primena rešenja razvijenih u okviru ove disertacije nudi direktne odgovore na navedene izazove:

- Prevazilaženje problema sa autofokusom: U uslovima snažnog klatera morskih talasa, konvencionalni sistemi sa pasivnim autofokusom (baziranim na maksimizaciji kontrasta) ispoljavaju tendenciju ka oscilovanju (engl. *focus hunting*), jer algoritam pogrešno interpretira pokretne vrhove talasa kao ivice cilja. Implementacija predloženog determinističkog upravljanja fokusom omogućava sistemu da ignoriše optičke smetnje iz pozadine i održi oštru sliku brzog plovila isključivo na osnovu njegove stvarne udaljenosti.
- Stabilnost praćenja na uzburkanom moru: Brza plovila ispoljavaju visoku dinamiku kretanja u sve tri ose usled udara talasa. Predloženi model adaptivnog upravljanja vidnim poljem (FOV) spregnut sa prediktivnim algoritmom omogućava sistemu da u trenucima naglih skokova ili promena kursa plovila preventivno proširi kadar. Na ovaj

način se sprečava izlazak cilja iz vidnog polja senzora, što je čest problem kod klasičnih optoelektronskih sistema za pomorski nadzor.

- Multispektralna sinergija: Korišćenje optimizovanih zaštitnih prozora sa širokopojasnom transmisijom (poput multispektralnog ZnS materijala) omogućava efikasnu fuziju različitih senzora. Dok su termovizijske kamere (MWIR/LWIR) ključne za noćnu detekciju toplotnog odraza brodskih motora naspram hladne vodene površine, integracija SWIR senzora kroz isti optički prozor pokazala se kao najefikasnije rešenje za probijanje kroz morsku izmaglicu i eliminaciju sunčeve refleksije tokom dana.

Sinergija ovih unapređenja obezbeđuje znatno veći odnos signal-šum (SNR) na fokalnoj ravni detektora. Krajnji operativni rezultat je drastično smanjenje stope lažnih alarma (uzrokovanih refleksijom talasa) i značajno produženje dometa pozitivne identifikacije sumnjivih plovila, čime se obalskoj straži i lučkim vlastima obezbeđuje dragoceno vreme za pravovremenu taktičku reakciju.

6.2 Zaštita kritične infrastrukture

Obezbeđenje kritične infrastrukture, koja obuhvata državne granice, aerodrome, energetska postrojenja i rafinerije nafte, suočava se sa specifičnim bezbednosnim izazovima. U ovakvim sistemima zaštite, arhitektura se najčešće oslanja na mrežu radara i radio-frekventnih (RF) senzora za ranu detekciju pretnji na velikim udaljenostima. Međutim, ovi senzori obezbeđuju samo osnovne kinematičke podatke (udaljenost, brzina, azimut) i ne poseduju sposobnost vizuelne identifikacije, što sistem čini podložnim lažnim alarmima (npr. detekcija jata ptica umesto drona). Zbog toga elektro-optički (EO) sistem preuzima ulogu primarnog verifikatora koji mora autonomno da se usmeri na cilj nakon okidanja alarma (tzv. Slew-to-Cue režim rada) i da u najkraćem mogućem roku obezbedi jasnu vizuelnu identifikaciju pretnje.

Primena rešenja i metoda razvijenih u ovoj disertaciji rešava najistaknutije probleme u ovakvim operativnim scenarijima:

- Kompenzacija nesigurnosti radarskih podataka: Radarski sistemi i RF detektori isporučuju koordinate cilja sa određenom marginom greške (elipsa nesigurnosti). Pored toga, usled sistemske latencije od trenutka radarske detekcije do trenutka usmeravanja EO senzora, visoko-dinamični dron može značajno promeniti poziciju. Predloženi sistem adaptivnog upravljanja rešava ovaj problem tako što inicijalno zahvatanje cilja vrši sa proračunato širim vidnim poljem (FOV), čime se pokriva cela zona radarske nesigurnosti. Čim algoritmi za obradu slike registruju cilj, upravljačka petlja autonomno i agresivno sužava vidno polje, maksimizujući broj piksela na meti (PoT) radi hitne AI klasifikacije.
- Determinističko fokusiranje u uslovima industrijskog klatera: Zaštita aerodroma i rafinerija podrazumeva rad u okruženju sa izuzetno složenom pozadinom (zgrade, piste, dimnjaci, industrijska postrojenja). U takvim uslovima, klasični sistemi sa

pasivnim autofokusom često prave grešku fokusirajući se na objekte visokog kontrasta u pozadini, umesto na mali dron u prvom planu. Predloženi deterministički pristup upravljanju fokusnom ravni u potpunosti eliminiše ovaj problem. Korišćenjem egzaktnih podataka o udaljenosti (dobijenih od radara ili integrisanog laserskog daljinomera), sočiva se u deliću sekunde mehanički pozicioniraju za oštru sliku samog drona, potpuno ignorišući vizuelne smetnje iz pozadine.

- Otpornost na agresivne ekološke uslove: Infrastrukturni objekti poput rafinerija i industrijskih zona često imaju povišenu koncentraciju korozivnih isparenja, dok su granični pojasevi izloženi prašini i pesku. Analiza i unapređenje dizajna zaštitnih optičkih prozora (korišćenje DLC premaza i multispektralnih materijala) obezbeđuju da EO sistem zadrži optimalnu funkciju prenosa modulacije (MTF) tokom produženog životnog veka, bez degradacije osetljivih unutrašnjih optičkih komponenti.

Integracijom ovih unapređenja, bezbednosnim strukturama koje štite kritičnu infrastrukturu pruža se sistem sposoban za potpunu automatizaciju taktičkog lanca: od radarskog detektovanja do vizuelne klasifikacije drona sada prolaze samo delovi sekunde, bez potrebe za ljudskom intervencijom i ručnim pretraživanjem neba, čime se omogućava hitna primena adekvatnih mera neutralizacije (C-UAV).

6.3 Integracija u mobilne platforme

Integracija elektro-optičkih (EO) sistema na mobilne platforme, poput oklopnih vozila, terenskih automobila, brzih plovila pa čak i letelica, predstavlja sledeći logičan korak u razvoju modernih C-UAV arhitektura. Za razliku od stacionarnih sistema, mobilne platforme zahtevaju sposobnost detekcije i praćenja ciljeva u pokretu (engl. *On-the-Move*). Ovo okruženje unosi kompleksne dinamičke perturbacije u vidu visokofrekventnih vibracija pogonskih sistema, niskofrekventnog ljuľanja platforme u tri ose i intenzivnog aerodinamičkog zagrevanja, što sve zajedno direktno ugrožava stabilizaciju optičke ose (engl. *Line of Sight - LoS*).

Primena metoda upravljanja i optičkog dizajna razvijenih u okviru ove disertacije direktno adresira ključna ograničenja mobilnih sistema:

- Adaptivna stabilizacija pri naglim perturbacijama: Ugradnja sistema na vozila koja se kreću po neravnom terenu ili na plovila izložena udarima talasa dovodi do naglih ugaonih ubrzanja. Ova ubrzanja mogu privremeno prevazići sposobnost elektro-mehaničke stabilizacije samog gimbala, što rezultira ispadanjem drona iz uskog vidnog polja. Algoritam adaptivnog upravljanja vidnim poljem, u sprezi sa estimatorom stanja (Kalmanov filter), trenutno prepoznaje porast nesigurnosti usled vibracija platforme i preventivno širi vidni ugao (FOV). Time se veštački povećava geometrijska tolerancija i zadržava vizuelni kontakt sa dronom sve dok se aktuatori gimbala ponovo ne stabilizuju.
- Determinističko fokusiranje u uslovima dvostruke dinamike: Kada su i platforma na kojoj se nalazi EO sistem i posmatrani dron u pokretu, relativna brzina približavanja ili

udaljavanja se drastično menja i teško je predvidljiva. U ovakvim uslovima, pasivni kontrastni autofokus postaje potpuno neupotrebljiv, jer svako podrhtavanje slike usled vibracija interpretira kao defokusiranje, što dovodi do oscilacija i gubitka oštine. Predloženi deterministički model fokusiranja u otvorenoj petlji eliminiše ovu zavisnost od stabilnosti video signala. Korišćenjem trenutnih telemetrijskih podataka o udaljenosti cilja, sočiva se postavljaju u tačnu poziciju, osiguravajući oštru sliku u realnom vremenu, potpuno imunu na mehaničke vibracije nosača.

- Otpornost na aerodinamičko zagrevanje: Ukoliko se EO sistem integriše na brze pokretne platforme (poput patrolnih čamaca, helikoptera ili zemaljskih vozila u brzom pokretu), trenje vazduha o spoljnu površinu optičkog prozora generiše kinetičko zagrevanje. Prethodno sprovedena analiza pokazala je da standardni infracrveni materijali, poput germanijuma, usled zagrevanja podležu fenomenu termalnog „oslepljivanja“ (engl. *Thermal Runaway*), gubeći sposobnost transmisije na temperaturama iznad 80°C. Implementacija optimizovanih dielektričnih materijala (poput multispektralnog ZnS-a) i primena DLC premaza osiguravaju da prozor zadrži visoku propustljivost i mehanički integritet nezavisno od brzine kretanja platforme i aerodinamičkog naprezanja.

Sveukupno, primena razvijenih modela transformiše osetljive stacionarne EO senzore u visoko robusne sisteme. Usvajanjem ovih principa, mobilne platforme dobijaju sposobnost pouzdanog uočavanja i neprekidnog praćenja dronova i tokom sopstvenog brzog kretanja, čime se značajno proširuje taktička upotrebljivost sistema na terenu.

6.4 Navođenje sistema za neutralizaciju (efektora) u vojnim primenama

U okviru vojno-bezbednosnih primena, uloga elektro-optičkog sistema ne završava se isključivo na ranoj detekciji i praćenju pretnje. Moderni C-UAV sistemi zahtevaju da EO platforma preuzme funkciju preciznog sistema za kontrolu vatre (engl. *Fire Control System - FCS*), čiji je zadatak navođenje izvršnih sistema za neutralizaciju, takozvanih efektora. Ovi sistemi mogu biti nekinetički, poput usmerenih radio-frekventnih ometača (engl. *jammers*) i sistema za obmanjivanje navigacije (engl. *spoofers*), ili kinetički, poput protivavionske artiljerije i visokoenergetskih laserskih sistema (engl. *Directed Energy Weapons - DEW*).

Efikasnost ovih sistema za neutralizaciju direktno i isključivo zavisi od kvaliteta telemetrijskih podataka koje u realnom vremenu generiše optoelektronski modul. Arhitektura razvijena u okviru ove disertacije pruža ključne prednosti u ovom kritičnom domenu:

- Neprekinut prenos koordinata pri visoko-dinamičkim manevrima: Vojni i modifikovani komercijalni dronovi često izvode agresivne manevre izbegavanja (engl. *evasive maneuvers*). Ukoliko algoritmi za praćenje izgube cilj makar i na delić sekunde, usmereni snop ometača gubi kontakt sa antenom drona, čime proces neutralizacije propada. Predloženo rešenje sa adaptivnim širenjem vidnog polja (FOV) i

determinističkim fokusiranjem obezbeđuje neprekinuto i stabilno generisanje trodimenzionalnih koordinata cilja, zadržavajući dron u zoni dejstva sistema za neutralizaciju bez prekida u praćenju.

- Maksimizacija MTF-a za preciznost sub-pikselne klasifikacije: Kinetički i laserski sistemi zahtevaju ekstremnu preciznost usmeravanja (često ispod jednog miliradijana). Za ovakvu preciznost nije dovoljno samo pratiti centar „toplotne mrlje“, već se od EO sistema zahteva izdvajanje najranjivije tačke na letelici (npr. baterija, motor ili optika drona). Digitalna kompenzacija sfernih aberacija i optimizacija zaštitnih prozora, koje su ovde razvijene, garantuju visoku vrednost Modulacione prenosne funkcije (MTF). Visok MTF osigurava oštre geometrijske ivice cilja na fokalnoj ravni detektora, minimizujući šum pri računarskom izdvajanju centra mase i omogućavajući besprekorno precizno navođenje lasera na kritičnu tačku.
- Koaksijalna integracija sistema usmerene energije: Implementacija multispektralnih ZnS prozora sa visoko otpornim DLC premazima otvara mogućnost integracije senzora i laserskih obeleživača (ili čak lasera manjih snaga za neutralizaciju) na istoj optičkoj osi (arhitektura zajedničke aperture). Optimovan prozor sprečava nepoželjno rasejanje svetlosti i gubitak energije laserskog snopa, osiguravajući da se maksimalna snaga prenese sa efektor na pokretni cilj, uz istovremenu zaštitu osetljive optike od refleksije i termalnog stresa.

Oslanjanjem na predloženi inženjerski model, elektro-optički sistem izrasta iz pasivnog modula za nadzor u visoko pouzdanu okosnicu sistema za neutralizaciju, sposobnu da u deliću sekunde usmeri defanzivne kapacitete na nadolazeću letelicu sa maksimalnom tačnošću.

7 Pravci daljeg razvoja

Ovo istraživanje otvara mogućnosti za dalje usavršavanje u sledećim pravcima:

- Integracija sa naprednijim AI modelima koji zahtevaju manje podataka za obuku.
- Primena meta-sočiva i novih optičkih materijala.
- Dalje usavršavanje algoritama fuzije podataka za još robusnije praćenje u uslovima okluzije.
- Modifikovanje sistema u skladu sa razvojem tehnologije senzora veće rezolucije.
- Modifikovanje sistema u skladu sa razvojem tehnologije upravljanja pan-tilt pozicionerima.

U narednim potpoglavljima dat je kratak pregled mogućnosti za dalje usavršavanje EO sistema za ranu detekciju dronova u svakom od navedenih pravaca.

7.1 Integracija sa naprednijim AI modelima:

Dalje istraživanje će se fokusirati na implementaciju modela mašinskog učenja koji su specifično optimizovani za detekciju i klasifikaciju dronova u realnom vremenu, a koji zahtevaju manje skupove podataka za obuku. Ovo uključuje razvoj "lightweight" neuronskih mreža sposobnih za rad na *edge* uređajima sa ograničenim resursima, kao i primenu tehnika transfernog učenja kako bi se postojeći modeli brže prilagodili novim tipovima dronova.

7.2 Primena meta-sočiva i novih optičkih materijala:

Istražice se potencijal upotrebe meta-površina optimizovanih za infracrvene talasne dužine [50], s obzirom na strateški značaj i definisane mape puta za tranziciju ove tehnologije u praktične sisteme [51, 52], sa ciljem smanjenja gabarita i težine sistema, uz istovremeno povećanje otpornosti na oštre uslove sredine, što je ključno za mobilne C-UAV platforme. Analiza opto-mehaničko-termičkih karakteristika hibridnih meta/refraktivnih sistema u LWIR opsegu [53], kao i složenih (engl. *compound*) meta-optika [54], nudi mogućnost drastičnog smanjenja gabarita sistema. Pored toga, ispitaće se i integracija infracrvenih polimera kojima je niska cena [55], halkogenidnih stakala [56] i optičkih materijala dobijenih inverznom vulkanizacijom [57, 58] za izradu sočiva otpornih na teške uslove sredine.

7.3 Dalje usavršavanje algoritama fuzije podataka:

Razvoj robusnijih algoritama za fuziju podataka sa različitih senzora (VIS, SWIR, MWIR, LWIR, radar, RF detektori) omogućiće pouzdanije praćenje dronova u uslovima smanjene vidljivosti, prisustva klatera ili namernog ometanja. Fokus će biti na adaptivnim algoritmima koji

dinamički određuju težinske faktore svakog senzora u zavisnosti od trenutnih uslova, posebno u situacijama delimične ili potpune okluzije drona.

7.4 Modifikovanje sistema u skladu sa razvojem tehnologije senzora veće rezolucije

Kontinuirano praćenje napretka u tehnologiji detektora (npr. senzori sa manjim korakom piksela, većom osetljivošću i većom rezolucijom) omogućiće pravovremenu nadogradnju sistema. Ovo podrazumeva prilagođavanje optike i procesorske snage kako bi se iskoristile prednosti novih senzora za detekciju manjih dronova na još većim udaljenostima.

7.5 Modifikovanje sistema u skladu sa razvojem tehnologije upravljanja pan-tilt pozicionerima

Kao što je dokazano izvedenim modelom kinematičke stabilnosti, sposobnost praćenja visokodinamičkih ciljeva pri naglim manevrima striktno je ograničena maksimalnim ugaonim ubrzanjem i ukupnom latencijom servo-mehanizma. Dalji pravci razvoja obuhvatiće integraciju naprednih pogonskih tehnologija, poput Direct-Drive motora bez četkica uparenih sa optičkim apsolutnim enkoderima visoke rezolucije, čime se eliminiše mehanički zazor i značajno povećava odnos obrtnog momenta i inercije [59]. Pored hardverskih unapređenja, fokus će biti na prelasku sa stohastičkih estimatora na napredne nelinearne algoritme upravljanja, kao što je prediktivno upravljanje modelom (engl. *Model Predictive Control - MPC*) [60, 61], i kombinacija sa Adaptivnim neuro-fazi sistemom zaključivanja (engl. *ANFIZ – Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) [62]. Ova sinergija će omogućiti predloženom adaptivnom algoritmu da zadrži uže vidno polje (FOV) čak i tokom najagresivnijih manevara drona, minimizujući vreme smirivanja sistema i maksimizujući efektivni domet kontinualne klasifikacije.

8 Zaključak

Sveobuhvatnim razmatranjem specifičnih tehničkih i operativnih izazova povezanih sa detekcijom malih, niskoletućih dronova, u ovoj disertaciji stvorena je naučna i inženjerska osnova za razvoj znatno efikasnijih elektro-optičkih (EO) sistema sposobnih da adekvatno odgovore na rastuće bezbednosne pretnje. Kroz detaljnu analizu ograničenja postojećih rešenja, identifikovani su ključni faktori koji utiču na degradaciju performansi u realnim terenskim uslovima. Pokazano je da konvencionalni sistemi pate od inherentnih nedostataka reaktivnog upravljanja, velike systemske latencije, kao i teških optičkih degradacija izazvanih neadekvatnim dizajnom zaštitnih optičkih prozora pri velikim ugaonim skretanjima i aerodinamičkom zagrevanju.

Ovo istraživanje je imalo za primarni cilj kreiranje robusnog i efikasnog inženjerskog rešenja za unapređenje EO sistema, specifično optimizovanog za ranu detekciju, stabilno praćenje i pouzdanu identifikaciju visoko-manevarskih bespilotnih letelica. Predloženi inovativni koncept predstavlja značajan iskorak ka prevazilaženju fundamentalnog kompromisa između širine vidnog polja i maksimalnog dometa detekcije. Formulacijom matematičkog modela kinematičke stabilnosti, egzaktno je definisana sprega između hardverskih ograničenja i optičkih parametara kamere, čime je dokazana superiornost prediktivnog adaptivnog upravljanja vidnim poljem nad klasičnim PID regulatorima. Dodatno, uvođenjem determinističkog modela upravljanja fokusnom ravni u otvorenoj petlji, uspešno su eliminisani problemi oscilacija (engl. *focus hunting*) i kašnjenja, koji su karakteristični za pasivne kontrastne algoritme u uslovima visoke dinamike.

U domenu pasivne optičke zaštite, disertacija nudi iscrpnu analitičku procenu koja optički prozor tretira kao aktivnu komponentu sistema. Primenom matematičkog aparata aproksimacije Seidel-ovih aberacija trećeg reda, egzaktno je kvantifikovan uticaj debljine, materijala i van-osnog ugla upada svetlosti na pad funkcije prenosa modulacije (MTF). Pokazano je da se optimizacijom dimenzija prozora i primenom širokopojasnih materijala sa zaštitnim premazima (poput multispektralnog ZnS-a sa DLC slojem) mogu drastično smanjiti sferna aberacija i naponsko dvolomljenje. Na ovaj način osigurana je zaštita senzora od fenomena termalnog „oslepljivanja“ i omogućen je efikasan rad sistema u arhitekturi zajedničke aperture.

Pored kinematičkih i optomehaničkih poboljšanja, posebna vrednost rada ogleda se u specifičnoj primeni i integraciji postojećih digitalnih metoda za kompenzaciju optičkih aberacija i obnovu MTF-a. Pokazano je da se digitalnim podizanjem mikrokontrasta na ivicama vidnog polja efikasno eliminišu „slepe zone“, što algoritmima za praćenje i klasifikaciju obezbeđuje znatno pouzdaniji i oštrij ulazni signal. Kroz ovakav holistički pristup, gde pasivne optičke komponente, digitalni procesori slike (ISP) i algoritmi usmeravanja rade u strogoj sinergiji, ostvareno je maksimalno iskorišćenje postojećih hardverskih resursa.

Rezultati istraživanja, potvrđeni kroz metodologiju hibridnog modelovanja i naknadnu eksperimentalnu verifikaciju u terenskim uslovima, nedvosmisleno pokazuju da se predloženim unapređenjima postiže značajno veća verovatnoća klasifikacije cilja na velikim udaljenostima. Skraćeno vreme akvizicije cilja i očuvan visok odnos signal-šum (SNR) omogućavaju neprekidno praćenje čak i najzahtevnijih pretnji, uz efikasno potiskivanje lažnih alarma i smanjenje negativnih uticaja iz okoline.

Time je u potpunosti potvrđena polazna hipoteza o mogućnosti unapređenja performansi elektro-optičkih sistema bez potrebe za radikalnim i skupim promenama samih detektora. Međutim, vrednost ovog istraživanja prevazilazi uske okvire C-UAV domena. Razvijeni modeli nude isplativo i skalabilno rešenje koje se može direktno implementirati u širok spektar kritičnih aplikacija. Ovakav multidisciplinarni pristup demonstrira punu praktičnu primenljivost u zaštiti kritične infrastrukture, obezbeđenju pomorskog saobraćaja i integraciji na mobilne platforme, čime se postavljaju novi tehnološki standardi za razvoj budućih generacija autonomnih sistema za nadzor i precizno navođenje.

Iako se ovo istraživanje temeljno oslanja na pregled i primenu postojećih elektro-optičkih principa, standardnih modela širenja zračenja i konvencionalnih metoda digitalne obrade signala, u radu su razvijena i sintetizovana potpuno nova rešenja. Eksplicitno, originalni naučni i inženjerski doprinos ovog rada obuhvata:

1. Matematički model kinematičke stabilnosti pri naglom pokretanju cilja iz stanja mirovanja (eng. *Cold-Start scenario*).
2. Metodologija analitičke procene uticaja zaštitnih optičkih prozora na funkciju prenosa modulacije (MTF).
3. Hibridna arhitektura upravljanja koja spregnuto povezuje optomehaničke komponente i digitalnu obradu signala.
4. Eksperimentalna validacija i kalibracija metrike broja piksela na meti (PoT) u realnim terenskim uslovima.

Na osnovu sprovedenih istraživanja, može se konstatovati da su polazne hipoteze u potpunosti potvrđene. Prva hipoteza je dokazana uspostavljanjem analitičkog modela kinematičke stabilnosti i razvojem nove metode adaptivnog upravljanja vidnim poljem i fokusom. Implementacija determinističkog pristupa u otvorenoj petlji omogućila je eliminaciju oscilacija karakterističnih za pasivni autofokus, čime je postignuto stabilno praćenje i maksimalna rezolucija za klasifikaciju ciljeva na većim udaljenostima.

Druga hipoteza je potvrđena optimizacijom dizajna zaštitnih optičkih prozora, gde je primenom multispektralnog cink-sulfida (ZnS) sa hibridnim DLC premazima postignuta visoka otpornost na uticaje okoline uz očuvanje optičkih performansi. Ovim je sprečena degradacija signala usled termalnih efekata i mehaničkih oštećenja, čime je značajno povećana robusnost i pouzdanost sistema.

Treća i četvrta hipoteza nedvosmisleno su verifikovane terenskim merenjima upotrebom multisenzorske platforme, čime je potvrđena mogućnost objektivnog poređenja performansi na osnovu PoT (Pixel on Target) kriterijuma. Eksperimentalni rezultati su kvantifikovali realna odstupanja od teorijskih modela (do 12.9% u VIS i 21.7% u MWIR kanalu), identifikujući optičko zamućenje i atmosfersku atenuaciju kao ključne faktore degradacije, što je omogućilo finu kalibraciju prediktivnih modela za rano otkrivanje dronova.

9 Literatura

1. Lyu, C.; Zhan, R. Global Analysis of Active Defense Technologies for Unmanned Aerial Vehicle. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* **2022**, *37*, 6–31. <https://doi.org/10.1109/MAES.2021.3115205>
2. Castrillo, V.U.; Manco, A.; Pascarella, D.; Gigante, G. A Review of Counter-UAS Technologies for Cooperative Defensive Teams of Drones. *Drones* **2022**, *6*, 65. <https://doi.org/10.3390/drones6030065>
3. Perić, D.; Livada, B.; Perić, M.; Vujić, S. Thermal Imager Range: Predictions, Expectations, and Reality. *Sensors* **2019**, *19*, 3313. <https://doi.org/10.3390/s19153313>
4. Vujić, S.; Perić, D.; Livada, B.; Radisavljević, M.; Domazet, D. Optical Protective Window Design and Material Selection Issues in the Multi-Sensor Electro-Optical Surveillance Systems. *Sensors* **2023**, *23*, 2784. <https://doi.org/10.3390/s23052784>
5. Miller, John & Way, Scott & Ellison, Bruce & Archer, Cynthia. (2013). Design challenges regarding high- definition electro-optic/infrared stabilized imaging systems. *Optical Engineering*. 52. [10.1117/1.OE.52.6.061310](https://doi.org/10.1117/1.OE.52.6.061310).
6. Koretsky, G. M., J. F. Nicoll, and M. S. Taylor. *Tutorial on Electro-Optical/Infrared (EO/IR) Theory and Systems*. Institute for Defense Analyses, 2022. https://www.ida.org/~media/corporate/files/publications/ida_documents/sed/ida-document-d-4642.pdf
7. SCD. Crane MWIR 5µm Pitch Detector Technical Brief; SemiConductor Devices (SCD), 2024. <https://www.scd.co.il/wp-content/uploads/2021/05/HOT-MWIR-detector-with-5um-pitch.pdf>
8. Sebastien Cortial, Christophe Pautet, Bastien Bruneau, Patrick Robert, Marc Guillaumont, et al.. Status of 8.5µm pitch bolometer developments at Lynred. *Infrared Technology and Applications XLIX*, Apr 2023, Orlando, United States. pp.125341A, (10.1117/12.2663455). (hal-04761963) <https://hal.science/hal-04761963v1>
9. Abraham, P.; Damuseau, D.; Källhammer, J.-E.; McWilliams, J.; Rahim, A.; Wale, M.; Fulbert, L.; Szelag, B.; Dao, T. D.; Alleaume, P.-F.; Aydinli, A.; Bruder, R.; Benvenuti, G.; Ronijak, K.; Mellin, J.; Ghane, R.; Sciancalepore, C.; Boeuf, F.; Absil, P. 300 mm Photonics White Paper; Photonics21 and Association for European NanoElectronics Activities (AENEAS), 2024. https://www.lynred.com/sites/default/files/2024-12/300%20mm%20Photonics%20White%20Paper_2024-10-31_clean.pdf
10. D. Perić, B. Livada, „Technical, technological and application limitations of the electro-optical surveillance systems“, 8th International Conference on Defensive Technologies, OTEH 2018, Belgrade, Serbia, 11-12 October 2018 <http://www.vti.mod.gov.rs/oteh18/elementi/rad/036.htm>
11. MKS Ophir. SupIR 10-135mm f/1.8 MWIR Lens Datasheet; MKS Instruments, 2025. <https://www.ophiropt.com/en/f/supir-10-135mm-f-1.8-mwir-zoom-lens>

12. Joonhyuk Seo, Jaegang Jo, Joohoon Kim, Joonho Kang, Chanik Kang, Seong-Won Moon, Eunji Lee, Jehyeong Hong, Junsuk Rho, and Haejun Chung "Deep-learning-driven end-to-end metalens imaging," *Advanced Photonics* 6(6), 066002 (14 November 2024). <https://doi.org/10.1117/1.AP.6.6.066002>
13. Fröch, J.E., Huang, L., Zhou, Z. *et al.* Full color visible imaging with crystalline silicon meta-optics. *Light Sci Appl* **14**, 217 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41377-025-01888-w>
14. Tong, Y.; Zheng, B.; Yang, F.; Tang, H.; Zhao, H.; Huang, Y.; Gu, T.; Hu, J.; Zhang, H. Full-Color, Wide Field-of-View Metalens Imaging via Deep Learning. *Advanced Optical Materials*, 2024. <https://doi.org/10.1002/adom.202402207>
15. Yoder, Paul R., and Daniel Vukobratovich. *Opto-Mechanical Systems Design*. 4th ed., CRC Press, 2015. <https://doi.org/10.1201/9781315217635>
16. Harris, Daniel C. *Materials for Infrared Windows and Domes: Properties and Performance*. SPIE Press, 1999. <https://ccn.loc.gov/2023043887>
17. Willers, Cornelius J., [Electro-optical system analysis and design: a radiometry perspective], SPIE—The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, (2013) <https://doi.org/10.1117/3.1001964>
18. Holst, Gerald C. *Electro-Optical Imaging System Performance*. 6th ed., JCD Publishing, 2017. <https://doi.org/10.1117/3.2588947>
19. B. Stojanović, S. Puzović, N. Vlahović, R. Petrović and S. Stanković, "Real-Time Multi-Sensor Infrared Imagery Enhancement," *2018 14th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL)*, Belgrade, Serbia, 2018, pp. 1-6, doi: [10.1109/NEUREL.2018.8587023](https://doi.org/10.1109/NEUREL.2018.8587023).
20. Milanović, P.D.; Popadić, I.V.; Kovačević, B.D. Gyroscope-Based Video Stabilization for Electro-Optical Long-Range Surveillance Systems. *Sensors* **2021**, *21*, 6219. <https://doi.org/10.3390/s21186219>
21. Liu, S.; Li, G.; Zhan, Y.; Gao, P. MUSAK: A Multi-Scale Space Kinematic Method for Drone Detection. *Remote Sens.* **2022**, *14*, 1434. <https://doi.org/10.3390/rs14061434>
22. Pavlovic, Milos & Banjac, Zoran & Kovačević, Branko. (2023). Object Tracking in SWIR Imaging Based on Both Correlation and Robust Kalman Filters. *IEEE Access*. PP. 1-1. [10.1109/ACCESS.2023.3288694](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3288694)
23. L. Zhang, X. Na, J. Yan and F. Li, "Detection, Tracking and Redetection of Moving Target by UAV" *2024 6th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)*, Chongqing, China, 2024, pp. 1349-1356, doi: [10.1109/EEI63073.2024.10696320](https://doi.org/10.1109/EEI63073.2024.10696320)
24. Sun, X.; et al. DMCM: Two-branch Multilevel Feature Fusion with Cross-attention Mechanism. *PLoS ONE* 2025. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318931>
25. Wang, A.; Chen, H.; Liu, L.; Chen, K.; Lin, Z.; Han, J.; Ding, G. YOLOv10: Real-Time End-to-End Object Detection. *arXiv preprint arXiv:2405.14458*, 2024. doi.org/10.48550/arXiv.2405.14458

26. Zhao, Y.; Lv, W.; Xu, S.; Wei, J.; Wang, G.; Dang, Q.; Liu, Y.; Chen, J. RT-DETR: DETRs Beat YOLOs on Real-time Object Detection. arXiv preprint arXiv:2304.08069, 2023. doi.org/10.48550/arXiv.2304.08069
27. Wojke, N.; Bewley, A.; Paulus, D. Simple Online and Realtime Tracking with a Deep Association Metric. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Beijing, China, 17–20 September 2017; pp. 3645–3649. <https://doi.org/10.1109/ICIP.2017.8296962>
28. Zhu, J.; Lai, S.; Chen, X.; Wang, D.; Lu, H. Visual Prompt Multi-Modal Tracking. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.10826>
29. Mahalanobis, A.; Tall, A. Efficient Drone Detection Using Temporal Anomalies and Small Spatio-Temporal Networks. Sensors, 2026, 26, 170. <https://doi.org/10.3390/s26010170>
30. Aldubaikhi A, Patel S. Advancements in Small-Object Detection (2023–2025): Approaches, Datasets, Benchmarks, Applications, and Practical Guidance. Applied Sciences. 2025; 15(22):11882. <https://doi.org/10.3390/app152211882>
31. VisDrone Team. The VisDrone Dataset: Updates for Thermal and Aerial Scenarios; 2023–2025. <https://github.com/VisDrone/VisDrone-Dataset> [Key data source].
32. Simeon Okechukwu Ajakwe, Vivian Ukamaka Ihekoronye, Golam Mohtasin, Rubina Akter, Jae Min Lee, Dong Seong Kim, VisioDECT: A robust dataset for aerial and scenario based multi-drone detection, identification, and neutralization, Data in Brief, Volume 65, 2026, 112448, ISSN 2352-3409, <https://doi.org/10.1016/j.dib.2026.112448>
33. Ronald G. Driggers, Jon C. Leachtenauer, "Target and Environmental Considerations", Ch 7 in Surveillance & Reconnaissance Imaging Systems, ISBN-10 : 1580531326, ISBN-13 : 978-1580531320, Artech House, 2001
34. Jacobs, Pieter A., Thermal infrared characterization of ground targets and backgrounds, SPIE—The International Society for Optical Engineering, Bellingham, Washington, USA, (2006), <https://doi.org/10.1117/3.651915>
35. G. C. Holst, A. Mahalanobis: Comparing Pixels on Target with NV-IPM Range Predictions, Proceedings of SPIE, Vol. 12533, June 2023, Article 1253302. <https://doi.org/10.1117/12.2666655>
36. Sjaardema, T. A.; Smith, C. S.; Birch, G. C. History and Evolution of the Johnson Criteria; Report SAND2015-6368; Sandia National Laboratories: Albuquerque, NM, USA, 2015. <https://www.osti.gov/servlets/purl/1222446>
37. Hilkert, J. M. (2008). "Inertially stabilized platform technology: Concepts and principles." IEEE Control Systems Magazine, 28(1), 26-46. <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.910256>
38. Ogata, Katsuhiko. Modern Control Engineering. 5th ed., Prentice Hall, 2010. ISBN: 978-0136156734.
39. Palik, E. D. Handbook of Optical Constants of Solids; Academic Press, 1985. ISBN: 978-0-08-054721-3. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-20920-2>

40. U.S. Department of Defense. MIL-STD-810G: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, Method 506.5 (Rain). Department of Defense Test Method Standard, USA, 2008.
41. U.S. Department of Defense. MIL-STD-810G: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, Method 510.5 (Sand and Dust). Department of Defense Test Method Standard, USA, 2008.
42. U.S. Department of Defense. MIL-C-675C: Coating, Optical, Anti-Reflection (Glass Components) and MIL-PRF-13830B: Optical Components for Fire Control Instruments. Department of Defense, USA, 1980/1997.
43. U.S. Department of Defense. MIL-F-48616: Filter (Visible and Infrared), General Specification for. Department of Defense, USA, 1977.
44. NATO Standardization Office. STANAG 4370: Environmental Testing, Allied Environmental Conditions and Test Publication (AECTP) 300. NATO Standardization Agency, Brussels, Belgium, 2006.
45. Li, Y.; Li, D.; Li, S.; Liu, Z.; Wei, N. Study on Haze Defects in CVD-ZnSe: Performance, Microstructure and Suppression. *Optical Materials*, 2026, 174, 117889. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2026.117889>
46. Vollmerhausen, R. H.; Jacobs, E. L. The Targeting Task Performance (TTP) Metric: A New Model for Evaluating Target Acquisition Performance; Technical Report AMSEL-NV-TR-230; U.S. Army Night Vision and Electronic Sensors Directorate (NVESD): Fort Belvoir, VA, USA, 2004. <https://doi.org/10.21236/ada422493>
47. Teaney, B. P.; Reynolds, J. P. Next Generation Imager Performance Model. *Proc. SPIE* 2010, 7662, 76620O. <https://doi.org/10.1117/12.850876>
48. Berk, A.; Conforti, P.; Kennett, R.; Perkins, T.; Hawes, F.; van den Bosch, J. MODTRAN6: A Major Upgrade of the MODTRAN Radiative Transfer Code. *Proc. SPIE* 2014, 9088, 90880H. <https://doi.org/10.1117/12.2050433>
49. Vujić, S.; Radisavljević, M.; Pavlović, M.; Perić, D.; Veinović, M. Comparison of Theoretical and Experimental Pixel-on-Target Metrics for Early UAV Detection Using Multi-Sensor EO/IR System. *Serbian Journal of Electrical Engineering* 2026, 23(2), 321-334. <https://doi.org/10.2298/SJEE2602321V>
50. Wirth-Singh, A.; Brook, A. M.; Johnson, R.; Fröch, J. E.; Majumdar, A. Meta-Optical Imaging at Thermal Wavelengths. *Journal of Physics: Photonics*, 2026, 8, 012003. <https://doi.org/10.1088/2515-7647/ae0ee4>
51. Rohith Chandrasekar, Overview of DARPA programs transitioning metasurfaces to imaging applications, *Proc. SPIE PC12514, Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications X*, PC1251401 (15 June 2023); <https://doi.org/10.1117/12.2664778>
52. Kuznetsov, A. I. et al. Roadmap for Optical Metasurfaces. *ACS Photonics*, 2024, 11, 3, 816–865. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.3c00457>

53. Zhixi Li, Jun Chen, Jingjun Wu, Feng Tang, Wei Liu, Xin Ye, Liming Yang, Opto-mechanical-thermal analysis of long-wave infrared meta/refractive optical systems, *Optics and Lasers in Engineering*, Volume 196, 2026, 109445, ISSN 0143-8166, <https://doi.org/10.1016/j.optlasengl.2025.109445>
54. Lee, H.R., Kim, D. and Kim, S.J., 2026. Compound Meta-Optics for Advanced Optical Engineering. *Sensors*, 26(3), p.792. <https://doi.org/10.3390/s26030792>
55. Tonkin, S. J.; Pham, L. N.; Gascooke, J. R.; Johnston, M. R.; Coote, M. L.; Gibson, C. T.; Chalker, J. M. Thermal Imaging and Clandestine Surveillance using Low-Cost Polymers with Long-Wave Infrared Transparency. *Advanced Optical Materials* 2023, 11, 2300058. <https://doi.org/10.1002/adom.202300058>
56. Matsushita, Y.; Sato, F.; Masuda, N.; Kimata, M. Infrared Lens Units Using Chalcogenide Glass with High Transmission Properties. *Optical Engineering*, Volume: 62, Issue: 8, Aug, 2023, 087104. <https://doi.org/10.1117/1.OE.62.8.087104>
57. Griebel, J. J.; Namnabat, S.; Kim, E. T.; Himmelhuber, R.; Moronta, D. H.; Chung, W. J.; Simmonds, A. G.; Kim, K.-J.; van der Laan, J.; Nguyen, N. A.; Dereniak, E. L.; Mackay, M. E.; Char, K.; Glass, R. S.; Norwood, R. A.; Pyun, J. New Infrared Transmitting Material via Inverse Vulcanization of Elemental Sulfur to Prepare High Refractive Index Polymers. *Advanced Materials*, 2014, Volume 26, Issue 19, 3014–3018. <https://doi.org/10.1002/adma.201305607>
58. Molineux, J.; Lee, T.; Kim, K. J.; Kang, K.-S.; Lyons, N. P.; Nishant, A.; Kleine, T. S.; Durfee, S. W.; Pyun, J.; Norwood, R. A. Fabrication of Plastic Optics from Chalcogenide Hybrid Inorganic/Organic Polymers for Infrared Thermal Imaging. *Advanced Optical Materials*, 2024, Vol. 12, 2301971. <https://doi.org/10.1002/adom.202301971>
59. Brown P., Engelmann A., Lewis R., Use and Advantages of Direct-Drive Brushless DC Actuators for Precision Instrument Pointing of the Total and Spectral Solar Irradiance Sensor. 44th Aerospace Mechanisms Symposium, 2018. <https://www.esmats.eu/amspapers/pastpapers/pdfs/2018/brown.pdf>
60. Altan, A.; Hacıoğlu, R. Model predictive control of three-axis gimbal system mounted on UAV for real-time target tracking under external disturbances. *Mechanical Systems and Signal Processing* 2020, 138, 106548. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106548>
61. Nebeluk, R., Zarzycki, K., Seredyński, D. et al. Predictive tracking of an object by a pan-tilt camera of a robot. *Nonlinear Dyn* 111, 8383–8395, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11071-023-08295-z>
62. K. -H. Choi and H. -J. Chang, "Improvement of Drone Gimbal System Performance Using a Parallel Structure of Explicit Model Predictive Control and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System," in *IEEE Access*, vol. 14, pp. 27108-27124, 2026, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.3665975>