

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ**

**мр Драган М Кнежевић, дипл. инж.**

**КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ТЕРМОВИЗИЈСКИХ  
СИСТЕМА СА ПАНОРАМСКИМ ПРИКАЗОМ  
ЗА НАДЗОР ПОКРЕТНИХ ОБЈЕКТА**

**Докторска дисертација**

**Београд, 2021.**

**UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING**

**Msc Dragan M Knežević, dipl. ing.**

**CHARACTERIZATION OF INFRARED  
SEARCH AND TRACKING SYSTEMS FOR  
MONITORING OF MOVABLE OBJECTS**

**Doctoral Dissertation**

**Belgrade, 2021.**

## КОМИСИЈА ЗА ПРЕГЛЕД И ОЦЕНУ ДИСЕРТАЦИЈЕ

### Ментор:

Др Петар Матавуљ, редовни професор  
Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

### Чланови Комисије:

Др Петар Матавуљ, редовни професор  
Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

---

Др Зоран Николић, ванредни професор,  
Универзитет у Београду  
Физички факултет

---

Др Јован Цветић, редовни професор  
Универзитет у Београду  
Електротехнички факултет

---

Датум одбране: \_\_\_\_\_ 2021.

## Захвалнице

Захваљујем се ментору, проф. др Петру Матавуљу редовном професору, на свесрдно указаној подршци и помоћи приликом израде дисертације.

Посебну захвалност дугујем коментору проф др Зорану Николићу, ванредном професору и Комисији, која је прегледала овај рад и својим корисним предлозима утицала на коначну верзију дисертације.

Срдечно се захваљујем својим професорима др Јовану Елазару, др Милеси Срећковић, др Драгану Митраковићу, др Дарку Васиљевићу и др Милошу Лабану, са којим сам имао задовољство да сарађујем још од својих студентских дана и њиховој несебичној подршци.

Захваљујем се својим колегама са којима сам низ година радио на различитим задацима и пројектима у области Командно информационих система у Центру за КИС и ИП ГШ ВС и системима заснованим на термовизијској техници у Лабораторији за оптоелектронику ВТИ МО ВС, Сектору за ваздухопловна средства и Центру за летна испитивања ГШ ВС и Центру за КИС и ИП ГШ ВС. Нарочито се захваљујем колегама, пк пк мр Љуби Ракићу, пп Светомиру Мрђи, пп мр Горану Марјановићу и мр Мирјани Николић.

Безрезервној пруженој подршци током рада на овој дисертацији захваљујем се Марији Кнежевић, Милошу Симићу, Михаилу Јојићу, Јелени Бажалац и Филипу Јовановићу.

Неизмерну захвалност дугујем својој породици, родитељима Милутину и Мирјани, брату Милану, братанцу Марку<sup>+</sup>, а посебно супруги Јасмини и ћерки Миљи, који су ми били највећа мотивација у току рада на овој теми, којима посвећујем овај рад.

Слава и хвала Господу нашем за љубав и снагу коју нам даје да истрајемо, упркос свим изазовима, на своју добробит и на добробит свих око нас.

Драган Кнежевић

Резиме:

Предложена тема припада области инфрацрвене (ИЦ) оптоелектронске технике. Најсавременији приступ решавању проблема квалитетног надзора, ране детекције и праћење промена у оквиру посматране сцене, заснива се на термовизијским системима са панорамским приказом,IRST (Infrared Search and Tracking) системима у оквиру мрежноцентричног концепта, чијом применом се остварује: правовремено уочавање циља и превентивни одзив самог система у зависности од његове намене, одговарајућим управљањем КИС надзора, на енергетски ефикасан и флексибилан начин у дневно - ноћим и сложеним условима рада.

Предмет истраживања предложене дисертације је карактеризација термовизијских система са панорамским приказом у односу на метеоролошке и климатске утицаје, сложеност позадине, природу инфрацрвене сигнатуре циља авиона, просторно-временско предфилтрирање улазних података и неопходна обрада за потпуно позиционирање групе летелица у области осматрања и реалном времену. Експерименталним поступком снимања ИЦ сигнатуре зрачења у динамичким и статичким условима и различитим маневрима током лета у карактеристичној ИЦ сцени, дефинисане су и потврђене просторне и температурне карактеристике емисије посматраног циља и утврђена је сагласност са подацима из литературе и допуна. Симулационе методе се односе на формирање и примену алгоритама за детекцију мета у снимљеним сценама. При том су коришћене изабране методе за обраду слике, као и оригинално дизајниран метод за предфилтрирање термограма применом логичких и скуповних операција. Коришћен је ефикасан поступак триангулације за потискивање лажних сигнала, који доприноси брзом формирању синтетичке слике.

Утврђен је поступак детекције свих тачкастих објеката од интереса у зони осматрања, издвајање лажних сигнала, добијене су значајне информације о циљу и предложен начин побољшане детекције удаљених објеката.

Квалитет и квантитет информација, које се могу добити из посматране ИЦ сцене је побољшан и позиција уочених објеката током панорамског претраживања се брзо и ефикасно издваја.

Главне предности, које издвајају IRST у односу на друге ИЦ системе су прикривена детекција и праћење циљева, имуност на RF локацију сензора, имуност на дејство противрадарских ракета и панорамско претраживање. IRST се описује моделом, који садржи модуларну преносну функцију система и системске карактеристике модела.

Просторно и временско предфилтрирање улазних векторских података је неопходно, посебно код откривања вишеструких циљева у области претраживања. Ова апликација је развијена за обраду ИЦ кадра, међутим развијени симулациони нумерички модел се може користити и за обраду слика у видљивом делу спектра.

Резултати ових анализа показују симулацију максималног времена израчунавања за 200 циљева на рачунарима различитих генерација. Овај модел би се теоретски могао применити на неограничен број циљева. Међутим, са великим бројем лажних аларма, смањује се вероватноћа да се задовоље услови разматраног симулационог модела.

Добијени резултати указују и на чињенице:

- Иако се очекује повећање времена за потребна израчунавања са повећањем процента стварних циљева, то није случај услед контракције матрице циљева.
- За већи број тачних циљева, парови података који по случајном избору одговарају различитим улазним векторима, извлаче се током верификације циља.

Применом симулационих нумеричких модела за предфилтрирање и ограду сигнала секвенци ИЦ сцена термограма у реалном времену, потиснут је значајно лажни аларм. Издвојени циљеви на нивоу елементарне сензорске ћелије са IRST системима применом нумеричког модела за триангулације, потврђују праћење групе од 90 летелица у реалном времену. На основу експеримената извршених за потребу тезе и промене позиција између сукцесивних скенова, могуће је нумеричком симулацијом проценити трајекторије, брзине, висине, формације у лету и облике маневара летелица. Иако се ради о тачкастим циљевима, ови подаци представљају основу за класификација летелица (ловачки авион, бомбардер, хеликоптер, беспилотна летелица, итд.).

*Кључне речи: временски филтер, ИЦ сигнатура авиона, IRST системи, модел циља, мултисензорска пасивна мрежа, праг контраста, предфилтрирање, просторни филтер, термографија, триангулација*

*Научна област: техничке науке – електротехника и рачунарство*

*Ужа научна област: физичка електроника - наноелектроника и фотоника*

*УДК број: 621.3*

## Abstract:

Suggested theme belongs to domain infrared (IR) optoelectronic technique. The most recent approach of solving the problem of quality monitoring, early detection and tracking changes of contents in the area of observation, is based on thermal imaging systems with panoramic display, infrared search and tracking (IRST) systems within network-centric concept, which application is realized: opportune insight target and protective response of the sole system depends on its assignment and the adequate command information system (CIS) monitoring management, on early effective and flexible manner in day – night and complex conditions of operation.

The object of research of the suggested dissertation is characterization of IRST systems under the meteorological and climate conditions, the complexity of background, natural IR signature of the aircraft target, space – time prefiltering incoming data and necessary processing for complete positioning of the group of aircrafts in the area of observation in real time. Experimental method of recording of IR signature emission in dynamical and static conditions and different maneuvers during the flight in characteristic IR scene, the space and temperature characteristics of emission of the target of observation are defined and verified and agreement with the data from the references and self contribution is affirmed. Simulation methods refer to forming and use of algorithms for detection of the targets in recorded scenes. During this process chosen methods for frame processing are used, as well as originally designed method for prefiltering of thermogram with the use of logical and set operations. Effective procedure of triangulation for suppressing false signal is used, which contributes to fast forming of sintetical frame.

The procedure of detection of all pointed objects of interest, in the zone of observation is established, as well as separating the false signals. The significant informations of the target are gathered and process of the enhanced detection of distant objects is suggested.

The quality and quantity of information that can be obtained from the observed IR scene is improved and the position of the observed objects during the panoramic search is quickly and efficiently separated.

The main advantages, which separate IRST from the other IR systems, are hidden detection and target tracking, immunity to RF location of sensors, as well as immunity to effects of anti radar missiles and panoramic lookup. It is described by the model, which contains the modular transmission function of the system and the system characteristics of the model.

Spatial and temporal prefiltering of input vector data is necessary, especially for the detection of multiple targets in the search area. This application is developed for the IR frame processing. However, the developed simulation numerical model can also be used for image processing in the visible part of the spectrum.

The results of these analyzes show the simulation of the maximum calculation time for 200 targets on computers of different generations. This model could theoretically be applied to an unlimited number of targets. However, with a large number of false alarms, the likelihood of meeting the conditions of the considered simulation model is reduced.

The results obtained also indicate the facts:

- Although it is expected to increase the time needed for calculations with an increase in the percentage of real targets, this is not the case due to the contraction of the matrix of targets.
- For a number of accurate targets, the data pairs that by random selection correspond to different input vectors are drawn during the verification of the target.

By using simulation numerical models for the prefiltering and processing of sequences of the IR scene of thermogram in real time, a significant false alarm was suppressed. The set targets at the level of the elemental sensor cell withIRST systems using the numerical triangulation model confirm the tracking of a group of 90 aircraft in real time. Based on the experiments performed for the need of thesis and the change of positions between successive scanners, it is possible to estimate trajectories, speeds, heights, formations in the flight, and shapes of maneuvers in the numerical simulation. Although this is a pointed target, these data form the basis for the classification of aircraft (a fighter aircraft, a bomber, a helicopter, a drone, etc.).

*Keywords: Contrast threshold value, IR aircraft signature,IRST systems, multisensor passive network, prefiltering, spatial filter, target models, temporal filter, thermography, triangulation*

*Scientific discipline: technical sciences - electrical engineering and computing*

*Scientific sub discipline: physical electronics, nanoelectronics and photonics*

*UDK number: 621.3*



## САДРЖАЈ

1.	УВОД.....	1
2.	КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ИЦ МОДЕЛА ЦИЉА И ПОЗАДИНЕ .....	4
2.1.	Анализа борбеног поретка .....	4
2.2.	ИЦ зрачење позадине летелице .....	5
2.3.	ИЦ сигнатура авиона.....	9
2.3.1.	Загревање оплате.....	11
2.3.2.	Зрачење продукта сагоревања.....	13
2.4.	Анализа радијансе циља и позадине.....	21
2.5.	Слабљење ИЦ зрачења при проласку кроз атмосферу.....	23
2.5.1.	Слабљење услед апсорпције .....	26
2.5.2.	Слабљење услед расејања .....	26
2.5.3.	Атмосферска трансмисија .....	27
2.5.4.	Атмосферске турбуленције .....	27
2.5.5.	Усвојени коефицијент слабљења.....	28
2.6.	Формирање модела ИЦ зрачења циља авиона.....	28
2.7.	Резиме.....	31
3.	КАРАКТЕРИЗАЦИЈА IRST .....	32
3.1.	Концепт модела IRST система .....	32
3.1.1.	Оптички систем са системом за скенирање.....	33
3.1.2.	Детектор система са системом за хлађење .....	33
3.1.3.	Електроника за обраду слике .....	34
3.1.4.	Рачунар.....	34
3.2.	Особине преносне и температурне резолуције IRST система.....	34
3.2.1.	Модулациона преносна функција.....	34
3.2.2.	Осетљивост .....	41
3.2.3.	Системске карактеристике модела .....	42
3.3.	Резиме.....	42
4.	ПРОСТОРНО-ВРЕМЕНСКО ПРЕДФИЛТРИРАЊЕ.....	43
4.1.	Математички модел групе циљева .....	44
4.2.	Опис процеса .....	46
4.2.1.	Испитивање неба и дефинисање флукуација .....	48
4.2.2.	Прављење вештачког неба са уносом циљева.....	49
4.2.3.	Предфилтрирање .....	50
4.3.	Симулациони резултати.....	52
4.4.	Анализа резултата .....	59
4.5.	Резиме.....	60
5.	ПРОЦЕС ТРИАНГУЛАЦИЈЕ .....	61
5.1.	Избор метода.....	61
5.2.	Концепт сензорске мреже заснован на IRST .....	62
5.3.	Модел са усвојеним принципом триангулације.....	63
5.4.	Симулациони резултати.....	68
5.5.	Резиме.....	75
6.	ЗАКЉУЧАК .....	76
7.	ПРИЛОЗИ.....	78
7.1.	Прилог 1 .....	78

7.1.1. Облик и величина детонационог облака.....	79
7.1.2. Утицај састава-врсте експлозива на термални ефекат детонације.....	80
7.1.3. Одређивање температурног максимума .....	82
<b>7.2. Прилог 2 .....</b>	<b>84</b>
<b>7.3. Прилог 3 .....</b>	<b>86</b>
8. ЛИТЕРАТУРА .....	89
Листа слика.....	93
Листа табела .....	95
Преглед коришћених ознака .....	96
Преглед коришћених акронима .....	101
Биографија, .....	102
Библиографија научних и стручних радова .....	103
Изјава о ауторству.....	109
Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада.....	110
Изјава о коришћењу.....	111

## 1. УВОД

У савременом техничко технолошком окружењу, човек се највише ослања на чуло вида у прикупљању информација о свету који га окружује. Зато се посвећује велика пажња изучавању уређаја за визуелизацију различитих видова зрачења, како би се приказ проширеног прилива података прилагодио могућностима ока. Термовизијски уређаји и системи формирају слику на основу појавног контраста услед просторно-временске расподеле емисивности и температуре у инфрацрвеној (ИЦ) сцени, с обзиром на природно својство материје да на температури изнад апсолутне нуле ( $0K$ ) емитује топлотно зрачење.

Визуелизација „топлотних слика“ остварује се појавом веома брзих полупроводничких кола високе интеграције и микропроцесора, који су омогућили примену различитих техника за формирање, обраду и побољшање слике. Практично за развој термовизијских уређаја за војне сврхе, везује се откриће првог фотонског детектора на бази ускозоналних легура типа  $(Hg,Cd)Te$ , 1956. године од стране Лаусона (Lawson). Један од првих назива за инфрацрвене (ИЦ) системе са видео сигналом и показивачем слике је био FLIR (Forward Looking Infrared). Овај термовизијски систем је настао раних 1960-их година модификацијом ваздухопловних ИЦ линијских скенера терена у претраживаче простора предње хемисфере у реалном времену (FLIR). Овај термин се традиционално задржао до данас, иако је практично у употреби назив термовизијска камера или инфрацрвена камера. Појавом конфигурације дводимензионалних низова детектора у равни жиже (FPA – Focal Plane Arrays), који или прекривају цело видно поље мозаичним матричним FPA или уз скенирајући механизам са мањим бројем детекторских елемената, појављују се термовизијски уређаји и системи са мозаичним сензорима. Употреба вишелементних фотодетектора је карактеристична за другу половину седамдесетих година прошлог века. Двадесет година касније почиње рад на фокалним матрицама [1]. Посебну групу инфрацрвених система чине термовизијски системи са панорамским приказом за надзор (IRST – Infrared Search and Tracking), који у оквиру термовизијске технике припадају средствима за поуздану детекцију, лоцирање и континуално праћење више циљева унутар захваћене ИЦ сцене. IRST системи се разликују од FLIR система у следећем [2]:

- IRST има видно поље од  $360^\circ$  у азимуту и до  $90^\circ$  степени у елевацији код неких система, за разлику од FLIR који има релативно мало видно поље.
- Код FLIR система учестаност слике има вредности  $\geq 30 Hz$ , а код IRST система вредности су  $\leq 10 Hz$ .
- IRST системи, сходно великом видном пољу, генеришу до неколико стотина милиона пиксела по једном кадру, док је тај број код FLIR система испод једног милиона пиксела по кадру.
- Обрада сигнала код FLIR система је прилагођена посматрачу, односно код напреднијих уређаја са аутоматским препознавањем циља, смањена је интервенција човека, док IRST системи имају за око два реда више података и захтевају компјутерски контролисану обраду података ради издвајања великог броја лажних аларма (clatter - клатер).

У војним применама, IRST системи су интегрисани у оквиру бродских, земаљских и ваздухопловних платформи. Служе за пасивно претраживање ваздушног простора унутар дефинисане хемисфере и њене дубине, ради откривања, праћења и класификације детектованих тачкастих објеката у високо структурираној позадини на удаљеностима већим од  $5 km$ , као и за дефинисање приоритета вишеструких ваздушних циљева. У оквиру научно – техничке дисциплине, термовизије, у овој тези се бавимо физичким процесима,

методама, моделима репрезентативног циља и IRST у односу на проблеме детекције и праћења ваздушних циљева на што већим удаљеностима. Основни појмови у овој области се сматрају познатим, с обзиром да овај рад представља наставак рада из магистарске тезе [3]. Главни проблеми у примени ових система проистичу од непоузданости ИЦ (инфрацрвене) сигнатуре циља, атмосферских ефеката, сложености позадине (различите врсте облака), алгоритама за обраду сигнала и података за детекцију потенцијалних циљева на великој удаљености и друга хардверских ограничења (нпр. великих меморија за чување и обраду широког спектра података) [4]. Са друге стране, термовизијски кадрови удаљених летелица, обично су изобличени услед утицаја атмосфере и оптичког система. Ове дисторзије утичу на способност посматрача да извуче одговарајуће информације из изабраног кадра за посматрани објекат посматрања/ истраживања. Улога атмосфере, током моделовања циља у ИЦ области зрачења, испитивана је и експериментално, с обзиром на реалне атмосферске ефекте, који утичу на детекцију.

Предмет истраживања прподнете дисертације јесте оптимизација термовизијских система са панорамским приказом у односу на: пасивну детекцију и пасивно одређивање удаљености посматраног објекта од сензора [4, 5, 6, 7], могућност праћења краткотрајних температурних одраза [8, 9, 10], расположивост довољно великог броја кадрова у секунди за захтевано видно поље и време интеграције [3, 8, 9, 10, 11, 12], просторно-временско предфилтрирање сигнала [11], потребно време за аквизицију и дистрибуцију података крајњим корисницима и процену захтева за побољшане карактеристике детектора (детективност, одзивност, осетљивост).

Проблем одређивања крајње детекције код термовизијских уређаја и система повезан је са:

- особинама површине и материјала објеката који се посматрају, пре свега расподеле емисивности и температуре на њиховој површини [3, 5, 6, 11-14],
- утицајима других извора зрачења који се рефлектују са различитих површина посматраних објеката,
- утицајима других извора зрачења који сачињавају укупну инфрацрвену сцену, поред зрачења објеката које желимо да уочимо,
- слабљењима сигнала током простирања кроз атмосферу [3, 11, 12, 15],
- другим утицајима који доводе до формирања лажних сигнала и
- карактеристикама термовизијског уређаја/система којим се осматра ИЦ сцена [3, 4, 5, 8, 16-19].

IRST се разматрају у оквиру сензорских мрежа за надзор. Карактеришу се видним пољем, просторном и температурном резолуцијом, као и координатама сопствене просторне позиције. Ови уређаји са различитих позиција у истом тренутку посматрају различите делове јединствене ИЦ сцене са циљем да детектују објекте у сцени [3, 4, 5, 7, 20] на основу њихове величине, ирадијансе, јачине примљеног сигнала који одговара боји, тј. интензитету сиве боје, дубини и сл. За симулациони модел, сваки од разматраних уређаја у најбољем случају можемо сматрати pinhole камером. Комплексни вид презентације подразумева геометријску калибрацију код које се успоставља једнозначна зависност тродимензионалне (3D) координате реалног објекта у дводимензионалној (2D) равни/пројекцији видног поља камере. Детаљна хомографска анализа омогућава просторну анализу запреминских објеката, анализу кретања, ротације, транслагације, модификације објеката и сл., укључујући и реалне параметре камере и амбијента. У нашем случају сваки објекат је мање/више тачкасти објекат. Детекција објеката виђених са више камера подразумева анализу преклапања уочених позиција објеката [1-4, 7, 10-12, 14, 17, 21-25]. Код тачкастих објеката, најпогодније решење се може добити анализом преклапања скупа координата објекта виђеног на различитим камерама, где се уз претходну квантизацију  $x$ ,  $y$

и  $z$  координата, може развити погодан  $3D$  кернел за екстракције објеката и анализе суседстава [11] или се по квантизацији на основу заједничког скуповног пресека добијених  $3D$  координата са свих камера, добија прави објекат, као онај кога истовремено виде све камере.

У поглављу, „Карактеризација мете и позадине“, анализирано је више карактеристичних циљева на основу радијансе доминантних извора зрачења летелица у односу на познату радијансу позадине чистог неба. За потребе анализе и формирања модела циља летелице, праћене су промене радијансе током маневара различитих парова летелица, који се односе на различиту оријентацију, висину, правац и брзину лета за различите дневно-ноћне услове у односу на термовизијску камеру, којом је праћен њихов лет. У раду су приказани делови експерименталних резултата, којима су потврђене тврдње из доступне литературе, на основу којих је уз стечена сазнања током мерења, донета одлука за карактеризацију мете и позадине.

Приказ карактеристичних параметара IRST система је дат у наредном поглављу. Дата је повезаност параметара IRST система, као што су област претраживања, просторна резолуција и просторна осетљивост за дефинисани крајњи домет система и познати модел ИЦ циља.

Остали утицаји на IRST систем, као што су вероватноћа детекције и вероватноћа лажног аларма, прагови одлучивања и др., анализирани су у наредном поглављу, Просторно – временско предфилтрирање. Овде је описана метода филтрирања, дати су симулациони резултати и анализа резултата.

Следеће поглавље се односи на процес триангулационе аквизиције десетине циљева у оквиру једне сензорске ћелије за просторну триангулацију. Анализирана је структура сензорске мреже за надзор, у оквиру које се позиционирање циљева у реалном времену одређује методом триангулације и симулиран је тај процес са приказом резултата.

У закључку су дати осврт и анализа постигнутих резултата, остварена очекивања, предлог даљих истраживања у односу на модел ИЦ циља летелице, област претраживања IRST, захтеви карактеристика IRST система за предложено просторно - временско филтрирање и примену триангулације за аквизицију циљева у сензорској мрежи.

Коришћене су експерименталне и симулационе методе током истраживања. У оквиру експерименталних метода, термовизијском камером (MWIR област) су снимани налети различитих летелица, како би се потврдили одговарајући наводи у литератури и усвојили карактеристични параметри мете авиона, на основу упоредног праћења два авиона истог типа. За издвајање детектованих летелица од лажног аларма, коришћене су познате методе за обраду слике и дизајниран оригинални метод за просторно и временско предфилтрирање сукцесивних термограма применом логичких и скуповних операција. Примењен је ефикасан поступак триангулације, који успешно потискују лажне сигнале и доприноси брзом формирању синтетичке слике.

Циљ тезе је био утврђивање поступка детекције свих тачкастих објеката од интереса у широком температурном опсегу унутар посматране ИЦ сцене у MWIR области, издвајање лажних сигнала од извора зрачења летелица које се траже у посматраној сцени, добијање употребљиве информације (аквизиција обухваћених циљева током једног претраживања целокупног видног поља, одређивање њихових координата и прослеђивање до крајњих корисника) и предлагање начина побољшања детекције удаљених објеката.

Истраживање је имало за циљ побољшање квалитета и квантитета информација које се могу добити из посматране инфрацрвене сцене и брзог и ефикасног издвајања позиција уочених објеката током панорамског претраживања.

## 2. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ИЦ МОДЕЛА ЦИЉА И ПОЗАДИНЕ

Метод развоја ИЦ модела циља авиона изведен је у односу на:

- анализу борбеног поретка,
- величине ИЦ сигнатуре емисионих површина авиона и њихову упрошћену геометрију,
- одговарајуће ефективне температуре, које представљају укупно зрачење ИЦ извора авиона и зрачење хладне позадине неба на основу вредности њихових радијанси, а на основу података из одговарајуће литературе, који су за потребе овог рада потврђени у потребној мери експерименталним поступцима.

### 2.1. Анализа борбеног поретка

Борбени поредак представља међусобни распоред групе летелица у ваздуху ради заједничког извршења борбеног задатка. Узајамни поредак авиона у борбеном поретку одређује се одстојањем, по дубини фронта, растојањем, по ширини фронта и превишењем или понижењем у односу на вођу. У овој анализи ће се пре свега анализирати ловачко-бомбардерска (ЛБА) и ловачка (ЛА) авијација.

За борбени поредак ЛА и ЛБА, а са становишта осматрања у електромагнетном спектру, у складу са предвиђеним борбеним дејствима карактеристични су:

- међусобна веза – комуникација радио средствима;
- ефекти поузданог и једноставног командовања у свим етапама лета;
- оријентисаност борбених дејстава на успешно савлађивање противваздушне одбране непријатеља;
- рано откривање непријатеља у ваздушном простору;
- препознавање циљева дејстава откривених летелица;
- запажања примењених маневара групе летелица, које изводе у циљу искоришћавања сопствених техничко–технолошких предности;
- извођење брзих и оштрих маневара ради скраћивања времена од уочавања објекта до завршетка напада;
- примена маневра по правцу, висини и брзини и брзи прелазак у други борбени поредак када то ситуација захтева;
- могућност примене маневра по правцу, висини и брзини лета, са ограничењем које се односи на удобност и безбедност управљања авионом и најмање замарање посада.

У зависности од поставке борбеног задатка који се решава, доба дана и метеоролошких услова, припреме посада, борбене опремљености авиона, облика тактичког наступања непријатеља, борбени поредак авиона може бити: смакнут, размакнут и у ешалонираном борбеном поретку.

Смакнутим поретком се обезбеђује већа густина ватре групе авиона. Размакнутим поретком се стварају повољни услови за већу безбедност од дејства непријатељске ПВО (противваздушне одбране). Смакнути и размакнута борбени поредак код ЛБА, према облику имају конфигурацију степена, колоне, фронта, клина или комбиновани борбени поредак авиона. Ешалонирано борбени поредцима омогућавају повољније услове за максималну слободу маневра, индивидуално тражење објеката, осматрање ваздушног простора и брзо извођење маневра за напад.

Појединачним авионима ЛА се најчешће дејствује у условима смањене видљивости. У дневним повољним метеоролошким условима и изнад облака, ловци дејствују у саставу пара, одељења, а изузетно и ескадриле, чиме се обезбеђује надмоћност над непријатељем у ваздушном простору и његово уништење на задатим линијама.

Успешна одбрана од ваздушних дејстава подразумева:

- добру процену могућих циљева дејстава и нападних праваца на њих;
- просторно растреситу и асиметричну мрежу осматрачких термовизијских станица са променљивом густином њиховог распореда за надзор штићених делова хемисфере;
- флексибилан комуникациони систем и брзо преношење података о захваћеним циљевима ваздушне претње ка додељеним системима ПВО.

## 2.2. ИЦ зрачење позадине летелице

Зрачење позадине за ИЦ сензорске станице, умрежене за надзор неба системом земаљских станица, представља различита стања у атмосфери посматрано са површине земље. Енергетски биланс зрачења објеката који се појављују у позадини циља и утичу на ИЦ сцену, према наводима у литератури [1-3], је приказана у табели 1:

Табела 1. Вредности екситансе ИЦ зрачења објеката у позадини према литератури [1-3]

Очекивани објекти у позадини	Средње таласно ИЦ подручје (MWIR – Medium-wave infrared)	Дуго таласно ИЦ подручје (LWIR – Long-wave infrared)
Дневно небо	1,4628 $W/m^2$	89,766 $W/m^2$
Ноћно небо	25,4 $10^{-3} W/m^2$	14,6971 $W/m^2$
Звезде на ноћном небу	Мање од $5 \cdot 10^{-9} W/(m^2 \mu m)$	Мање од $5 \cdot 10^{-10} W/(m^2 \mu m)$
Планете на ноћном небу	Мање од $10^{-6} W/(m^2 \mu m)$	Мање од $8 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \mu m)$
Месец	Месечев дан: 0,23 $W/m^2$ Месечева ноћ: –	Месечев дан: 1,72 $W/m^2$ Месечева ноћ: $6,14 \cdot 10^{-4} W/m^2$
Облак	3,2965 $W/m^2$	129,1902 $W/m^2$
Море, водене површине (цело видно поље)	2,8087 $W/m^2$	120,5752 $W/m^2$
Земља (емисивност пов. 0,85)	Лето: 4,5 $W/m^2$ Зима: 0,34 $W/m^2$	Лето: 131,1 $W/m^2$ Зима: 41,3 $W/m^2$
Сунце	24 $W/m^2$	1,5 $W/m^2$

Модел поздине [4, 26-28] полазе од концепта једноставних модела униформне поздине која одговара:

- чистом небу, или
- чистом небу уз увођење одређених нивоа облачности.

Радијанса чистог неба се може представити параметрима јединствене емисивности и температуре, односно, може се представити радијансом која представља еквивалентну температуру при емисивности 1. Ефекат угла елевације од спектралне радијансе је такав да када елевација расте, дужина оптичког пута кроз ниску атмосферу ( $H < 3$  km) опада и зрачење неба опада са висином. Када посматрамо зенит, емисија  $O_3$  расте, расте и апсорпција сопственог зрачења [26]. Резултати добијених спектралних расподела у мобилним спектрографским лабораторијама, коришћених за одређивање мере ИЦ спектралног зрачења неба, потврђују доминантност рефлектованог зрачења Сунца и неба за  $\lambda \leq 3 \mu m$  и топлотног зрачење на таласним дужинама  $\lambda > 3 \mu m$ .

Дакле код радијансе неба, спектри се могу природно раздвојити у две области:

- $\lambda \leq 3 \mu\text{m}$ , где доминирају процеси расејања, и
- $\lambda > 3 \mu\text{m}$ , где доминира топлотно зрачење.

Код даљинске ИЦ детекције хемијских и биолошких агенаса [28] у сложенем окружењу, где је захтев издвајање ових сигнатура од нешкодљивих материја у ваздуху, такође се анализирају различити спектри позадине. Позадински спектри тла, шума и ниско-угаоног неба, мерени су и анализирани на неправилним основама у периоду једне године. Овде је примењена техника даљинског откривања опасних гасова и аеросола применом термалне ИЦ спектрографије. Детерминистички ефекти се генерално индукују преко сигнатуре гасова, аеросола и променљиве позадине. Сигнатура настала интерференцијом може бити природна (нпр. промена метеоролошких услова услед облака прашине) или изазвани од стране људи (облаци који настају услед војних операција или индустријско – технолошких процеса). У овој методи, сваки спектар позадине представља резултат укупног зрачења и флукуација у позадини који модулишу интерферограм уз додатни допринос шума детектора. Ниско фреквентне флукуације атмосфере дају спектар са стабилним врховима (детерминистички), на основу којих се могу пратити садржине атмосферских честица и гасова. Наведена метода за добијање сигнатуре се ослања на краткотрајне и случајне промене температура и оптичког пута, чија природа није разјашњена ни до данас.

Облак је добар апсорбер и емитер у ИЦ области, док се у видљивом делу спектра понаша као добар дифузни рефлектор. Облаци се састоје од ситних капљица воде и честица леда. Формирају се кондензацијом и сублимацијом водене паре у слободној атмосфери и немају поновљиву структуру. Постоји више класификација облака у односу на њихов облик, начин постанка, физичка својства, висину формирања и постојања. Карактеристично је да немају поновљиве облике и исту густину на појединим деловима, чак ни у оквиру исте групе. Као такви, у односу на летелицу, која се налази испред облака, могу допринети да се делови емисионих површина летелице не виде, јер ће имати исту радијансу. Допринос облака, који се налази иза летелице може бити такав, да се један део емисионих површина летелице примећује као топлији, а други као хладнији у односу на радијансу облака у околини летелице.

Од других извора утицаја у оквиру позадине, појављују се утицаји зрачења са површине Сунца и Месеца.

Анализом сцене неба на основу добијених резултата мерењима летњег неба [29] термовизијском камером SC 7200 FLIR на локацији приближно око  $45^\circ$  северне географске ширине и приближно око  $22^\circ$  источне географске дужине (умерено континентална клима), пред залазак Сунце и по његовом заласку, указују на то да изнад угла елевације од  $50^\circ$  карактеристике неба постају константе, док небо испод  $50^\circ$  има својство експоненцијално опадајуће температуре са висином (елевацијом).

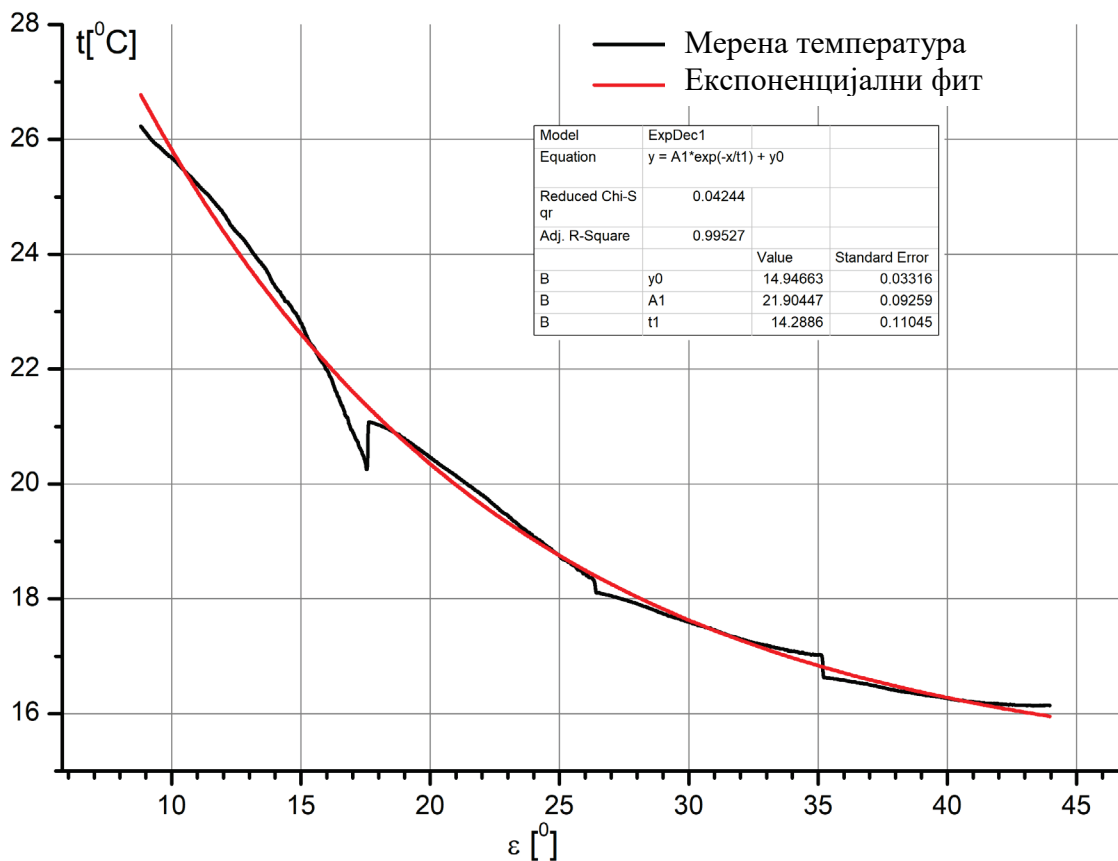
Изабран је сектор неба од  $8,8^\circ$  до  $44^\circ$  по висини и  $11^\circ$  по ширини са температурним прозором од  $5^\circ\text{C}$  до  $42^\circ\text{C}$ , учестаност слике од  $100\text{ Hz}$  и временом интеграције  $699\ \mu\text{s}$ . Снимане су две суседне природе неба - касно поподне у 19.00 часова и предвечерје, пре заласка Сунца у 20.15 часова (02. јун 2016.). Ова снимања су изведена према истој методологији [29]. Небо је снимано сукцесивно, у оквиру наведеног сектора неба и наведене природе неба, на следећи начин:

- статички (камера није померана током снимања – посматран је фиксни простор);
- потом се претходни оглед понавља уз уношење честица прашине различитих димензија ради симулирања ситно гранулисане сметње у сцени унутар захваћеног видног поља, на случајан начин, у случајно изабраном тренутку током периоде снимања; и



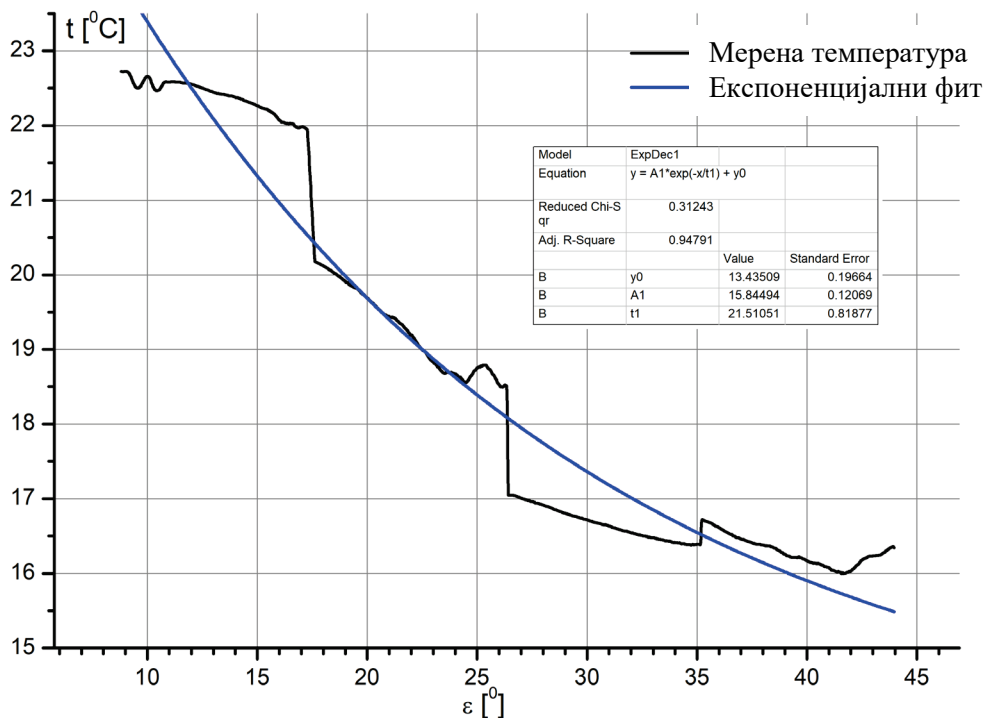
- динамички, када се камера покреће у хоризонталном правцу на десно (посматрано у односу на видно поље камере) од источне позиције ка југоистоку константном брзином око  $5^\circ/s$ .

За снимак у 19.00 часова је карактеристично постојање чистог неба, а за снимак у 20.15 часова облачност 3/8 са стратусима. Карактеристична метеоролошка ситуација поднебља Србије на периферији градске средине, према European Climate Assessment & Dataset.



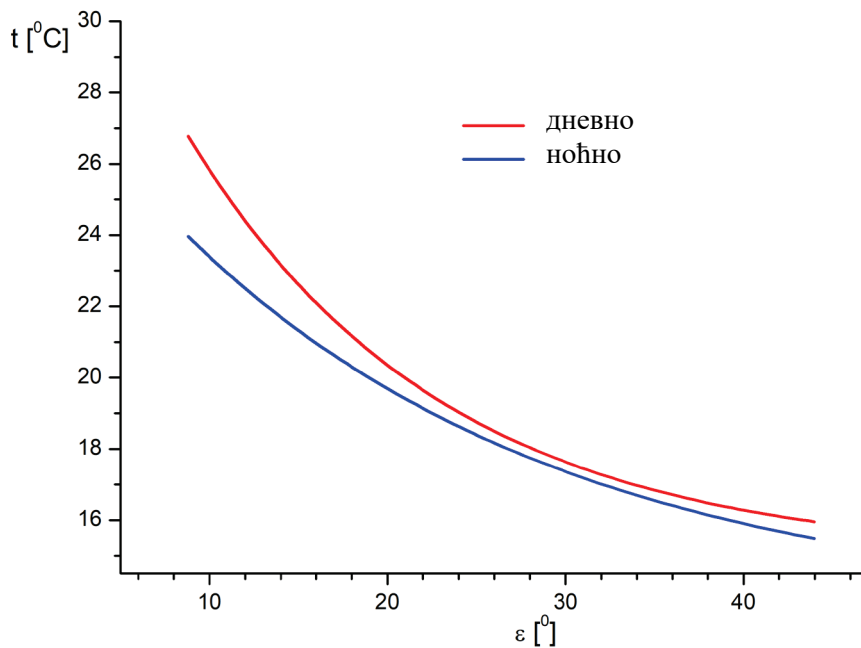
Сл. 1 Температурна зависност слојева атмосфере са углом елевације у дневним условима [29]

На сл. 1 су приказане мерена и екстраполацијом апроксимирана крива зависности промене температуре слојева атмосфере са углом елевације за дневне услове (19.00 часова).



Сл. 2 Температурна зависност слојева атмосфере са углом елевације у ноћним условима [29]

На сл. 2 су приказане мерена и екстраполацијом апроксимирана крива зависности промене температуре слојева атмосфере са углом елевације за ноћне услове (20.15 часова) и облачност 3/8 са стратусима.



Сл. 3 Температурна зависност слојева атмосфере са углом елевације у дневним и ноћним условима [29]

На сл. 3 су приказане екстраполацијом апроксимиране криве зависности промене температуре слојева атмосфере са углом елевације за дневни и ноћне услове на основу резултата приказаних на претходна два графика.

На сл.1-3, на местима облака постоје одступања (ноћни услови са облачношћу 3/8). Код малих углова елевације постоји одступање од  $8^{\circ}\text{C}$  до  $10^{\circ}\text{C}$  између дневних и ноћних услова, док је за велике углове елевације та промена око  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Такође је карактеристично да и за ноћне и дневне услове постоји иста експоненцијална природа промене температуре слојева ваздуха са елевацијом. Стандардна девијација за појединачне слојеве неба у дневним и ноћним условима, праћена је флукуацијама температуре од  $50\text{ mK}$  до  $100\text{ mK}$ , благо расте са углом и не прати тренд средњих вредности, које опадају са порастом угла елевације. На основу извршених статистичких анализа добијених резултата, расподеле флукуација температуре су се показале стабилним за велике углове елевације:

- нагнутост расподеле (skewness) има вредности приближно око  $-0,2$  и график је благо померен у лево са десне стране Гаусове расподеле, и
- испупченост расподеле (kurtosis) има вредност приближно око  $-1$ , график са релативно спљоштеном расподелом, промена са леве стране.

За мале углове елевације:

- нагнутост расподеле: график је више померен у лево са десне стране Гаусове расподеле, и
- нагнутост расподеле: график је значајно испупчен у односу на криву са Гаусовом расподелом

Резултати се могу сматрати добрим, јер потврђују да на малим угловима елевације имамо добар контраст и мању температурну разлику по ширини слике и оштрију расподелу шума по слојевима. Код великих углова елевације постоји нешто мањи контраст.

Поновљена су мерења у дневним условима током летњег кишног периода. У тим условима је трансмисија атмосфере знатно смањена и није било од интереса приступити даљој статистичкој анализи података.

Имајући у виду да тактички услови примене ИЦ убојних средстава и летелица подразумевају ведро небо и добру трансмисију атмосфере [5], у следећим деловима тезе се разматра позадина ведрога неба.

### 2.3. ИЦ сигнатура авиона

Типични ваздушни војни циљеви су авиони, хеликоптери, беспилотне летелице и ракете. Како су авиони кључни циљеви у ваздушној борби, тражи се одговарајући модел ИЦ циља за авионе. Авиони се праве од специјалне врсте алуминијума, тзв. авионског алуминијума. Површина им је прекривена посебним танким слојевима ради заштите од абразивног трошења и маскирних својстава.

Метод за процену емисионих делова ИЦ сигнатуре авиона подразумева:

- Препознавање извора зрачења у оквиру укупне ИЦ сигнатуре авиона,
- Издајање елементарних површина препознатих извора зрачења, за које се може сматрати да су вредности емисивности и температуре константне,
- Разматрање заступљености и утицаје препознатих извора зрачења (прва ставка) са повећањем растојања авиона од тачке посматрања са истим односом објеката околине у односу на авион, углове посматрања и оријентацију авиона,
- Свођење извора зрачења на доминантне изворе зрачења и одговарајуће површине,
- Разматрање утицаја позадине,
- Процењивање вредности емисивности и температуре емисионих површина,

- Процена површинских густина флукса зрачења доминантних извора зрачења и дефинисање површине пројекција разматраних доминантних извора зрачења, сматрајући површине Ламбертовим (Lambert) изворима у MWIR области електромагнетног спектра,
- Дефинисање модела ИЦ зрачења циља авиона при дефинисаним условима слабљења у атмосфери.

Генерално, ефективна радијанса циља авиона се може представити:

$$L_{ef}^c(T) = [\varepsilon_g(T_g) \cdot L_g(T_g) + \varepsilon_m(T_m) \cdot L_m(T_m) + \varepsilon_o(T_o) \cdot L_o(T_o)]_c + \rho_o(T_o) \cdot [L_{S/M} + L_z + L_{ob} + L_n]_p \quad (1)$$

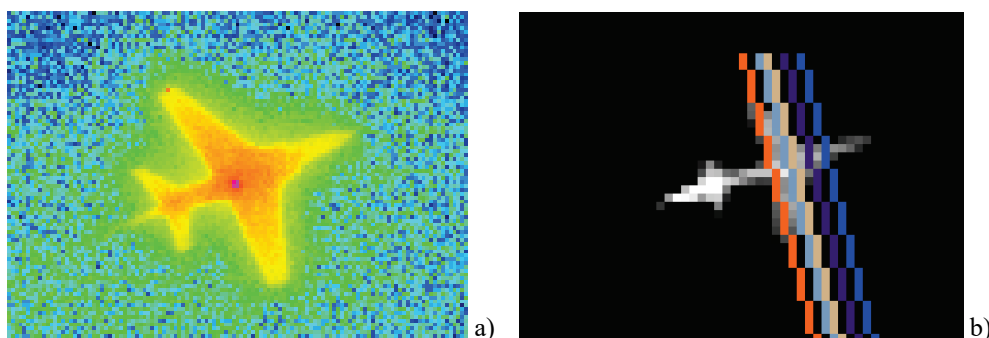
где су:  $L_{ef}^c(T)$  ефективна радијанса циља;  $T_g, T_m, T_o$ , редом температуре гасова, мотора и оплате;  $\varepsilon_g(T_g), \varepsilon_m(T_m), \varepsilon_o(T_o)$ , редом емисивности гасова, мотора и оплате;  $\rho_o(T_o)$ , рефлексивност оплате;  $L_g(T_g), L_m(T_m), L_o(T_o), L_{S/M}, L_z(T), L_{ob}, L_n$ , редом, радијансе гасова, мотора, оплате, Сунца/ Месеца, земље, облака и неба.

Укупна промена израчене енергије представља збир појединачних производа површинских густина флукса зрачења и површина са којих потичу. Мерењима термовизијском камером FLIR SC 7200 су потврђени подаци из литературе [2, 30] да издувни продукти сагоревања и кров кабине имају емисивност око 0,5, док металне површине летелице имају емисивност око 0,95.

У зависности од облика површина модела ИЦ циља авиона и њених оријентација у простору, у односу на друге изворе зрачења од утицаја, из геометрије проблема се уочава да ће се на вертикално оријентисане површине рефлектовати зрачење неба и Сунца (Месеца ноћу), а на хоризонтално оријентисане површине зрачење Земље.

На основу енергетских доприноса укупних температура на појединим деловима авиона и одговарајућих површина (сл.4), модел ИЦ зрачења циља авиона је оријентисан ка доминантним изворима зрачења [31], односно:

- Репрезентативну температуру АЦТ, која одговара доприносу укупне радијансе загрејаних чврстих површина тела летелице у односу на различите правце посматрања летелице и отворености њених површина, и
- Репрезентативну температуру АЦТ, која одговара укупној радијанси издувних продуката сагоревања и пресеку млазнице на њеном излазном делу у односу на различите правце посматрања летелице и отворености њених површина.



Сл. 4 а) Термовизијски снимак авиона у лету, и б) Термовизијски снимак емисионих површина авиона са мерним линијама преко његових чврстих површина [31]

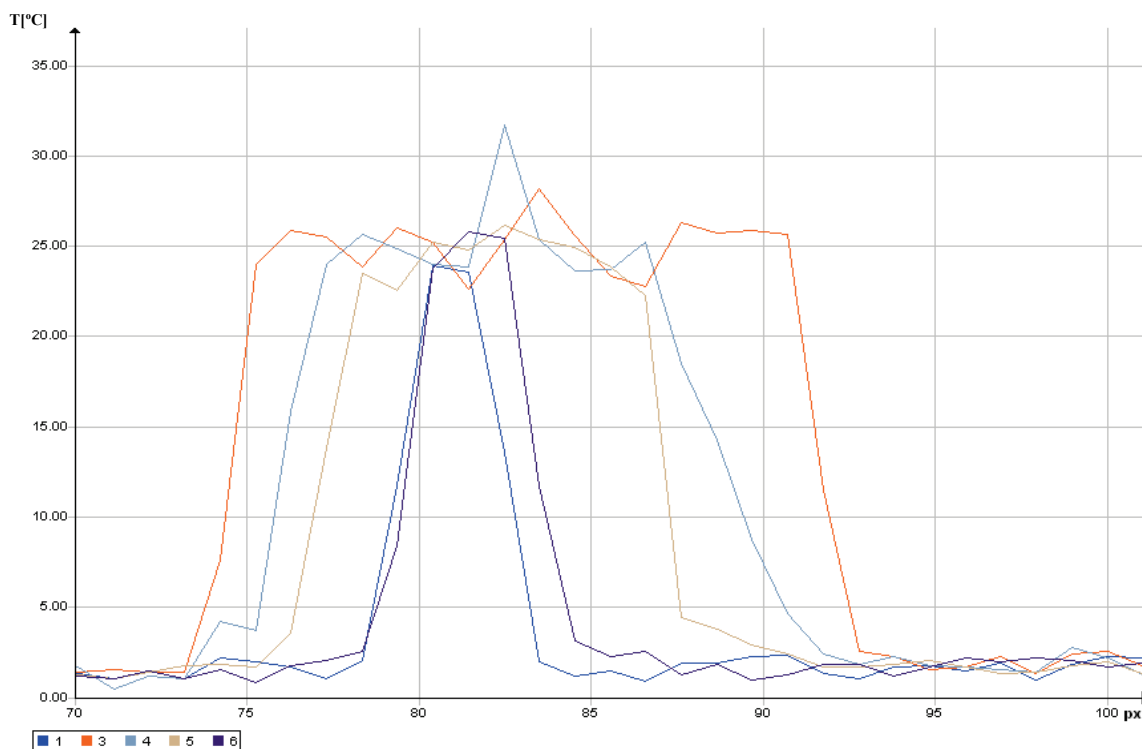
Када се авион посматра са велике удаљености, топли делови мотора су углавном заклоњени оплатом крилних површина или гасовима. У оквиру модела минималне ИЦ

сигнатуре, ови извори ће изостати. Модел треба да да параметре минималне сигнатуре авиона за његову детекцију на довољно великим удаљеностима.

### 2.3.1. Загревање оплате

Загревање оплате је процењено прорачуном [2, 3, 5, 8, 24, 30-34], а добијени резултати су потврђени мерењима. Прорачунато је:

- загревање услед ламинарног вискозног струјања, и
- загревање услед турбулентног вискозног струјања.



Сл.5. Просторна расподела температуре која одговара радијанси за мерне линије на сл. 1b) [31]

Модели наведени у литератури [2, 3, 30, 32], по питању референтних вредности за процену ИЦ зрачења услед аеродинамичког загревања, разматрају ламинарно струјање за хоризонталан лет авиона крстарећом брзином од  $0,7 M$  на висини  $10 km$ , са фактором опоравка  $\beta = 0,85$  (од могућих вредности:  $0,75$  до  $0,96$ ), практично на средини између ламинарног и турбулентног тока.

Однос апсолутне вредности разлике температура услед аеродинамичког загревања оплате при ламинарном,  $\beta = 0,75$ , и турбулентном струјању,  $\beta = 0,96$  и вредности аеродинамичког загревања при ламинарном струјању,  $\beta = 0,75$  за температуру амбијента од  $230 K$ , при брзини од  $1 M$  има вредност око  $3,4\%$ , док за  $2 M$  има вредност око  $10\%$ . Како се анализира реалан модел ИЦ зрачења циља авиона, односно делимично потиснута сигнатура зрачења, усвајањем да се авион не креће већом брзином од  $0,7 M$  (најчешћа брзина крстарења), усвојен је израз:

$$T_o = T_{amb} \cdot (1 + 0,175 \cdot M^2) \quad (2)$$

где су:  $T_o$ , температура оплате, а  $T_{amb}$  температура амбијента у околини авиона.

Посматрањем истог авиона под истим условима, али на већој удаљености, еквивалентна ефективна површина, која се пројектује на 1 пиксел у слици расте (сл. 5). Тако долази до усредњавања вредности радијансе, која долази из тог дела простора, па температурне расподеле на загрејаним металним површинама авиона постају уједначеније и губе се извори малих површина са израженијом радијансом.

За температуру амбијента на нивоу површине земље  $293\text{ }^{\circ}\text{C}$  и висину  $2\text{ km}$ , авион при брзини од  $0,5\text{ M}$ , има повећање температуре на металним површинама око  $12,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  у односу на температуру амбијента око авиона. При брзини од  $0,7\text{ M}$  авион има повећање температуре на металним површинама око  $23,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  у односу на температуру амбијента око авиона. На висини од  $10\text{ km}$ , за исту температуру на нивоу земље, при брзини од  $0,5\text{ M}$  авион има повећање температуре на металним површинама од  $9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  у односу на температуру амбијента око авиона, а за брзину  $0,7\text{ M}$  има повећање температуре на металним површинама  $19,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  у односу на температуру амбијента око авиона. Поред утицаја слабљења услед простирања сигнала кроз атмосферу, постоји и утицај радијансе неба. Температурни слојеви неба у правцу од посматрача ка летелици, са повећањем висине имају све мању густину и хладнији су у односу на температуру амбијента. У том смислу, у зависности од метеоролошких услова, географског подручја, доба дана и ноћи, док је температура која одговара ефективној радијанси неба мања од температуре непосредне околине авиона, промене радијансе услед аеродинамичког загревања авиона и неба су уочљиве. Када температура која одговара ефективној радијанси неба постане већа од температуре неба у непосредној околини авиона и како та разлика расте, стварају се услови да радијансе услед аеродинамичког загревања авиона буде потиснута у црно, дакле испод температурног нивоа ИЦ сцене која се посматра. Са друге стране, ако је знатно виша температура гасова, која зависи од физичко-хемијских процеса за различите режиме рада мотора, односу на ИЦ осматрачки систем, она може бити једним делом или потпуно заклоњена. Авион у том тренутку или одређеном кратком временском интервалу, може постати тотално невидљив. У систему мрежноцентричног ИЦ надзора, увек постоји довољан број сензора, који могу да детектују авион (генерално летелицу) из позиције, која допушта довољно изражен појавни контраст у односу на позадину. У овом случају могућност заклоњености није од великог утицаја.

Практично субсонични авиони и авиони који се крећу субсоничном брзином од  $0,4\text{ M}$  до  $0,8\text{ M}$ , сходно тактичкој употреби, имају температурну разлику оплате у односу на амбијент од  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При слабљењу од  $0,1\text{ km}^{-1}$  и температурној разлици циља и позадине од  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$  у околини циља, ове летелице се могу детектовати до  $40\text{ km}$  удаљености од осматрачке станице. Тада је температурна разлика циља и позадине на пријемнику 6 пута већа од температурне осетљивости (сматра се  $20\text{ mK}$ ) сензора. Код детекције летелице на удаљеностима до  $50\text{ km}$  удаљености температурна разлика циља и позадине на пријемнику је 2 пута већа од температурне осетљивости сензора. При температурној разлици циља и позадине од  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  у околини циља, за исто слабљење од  $0,1\text{ km}^{-1}$  и ове летелице се могу детектовати на удаљеностима до  $50\text{ km}$  од осматрачке станице са 2,7 пута већом температурном разликом циља и позадине на пријемнику у односу на температурну осетљивост сензора. За исто слабљење од  $0,1\text{ km}^{-1}$  и температурну разлику циља и позадине од  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  у околини циља, ове летелице се могу детектовати на удаљеностима до  $50\text{ km}$  од осматрачке станице са 4 пута већом температурном разликом циља и позадине на пријемнику у односу на температурну осетљивост сензора. За случај слабљења од  $0,2\text{ km}^{-1}$  и температурној разлици циља и позадине од  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  у околини циља, остварује се детекција летелице на растојањима од  $28\text{ km}$ , са 3 пута већом температурном разликом циља и позадине на пријемнику у односу на температурну осетљивост сензора. За суперсонични

авион, који се креће брзином од  $1,24 M$  на висинама око  $10 km$  и нижим и слабљењу од  $0,1 km^{-1}$ , детекција се остварује на удаљеностима до  $50 km$ .

Практично за  $v > 1,24 M$ , независно од површине авиона, који се посматра и његове оријентације у простору, могуће је детектовати његову ИЦ сигнатуру од металних површина и од млаза продуката сагоревања. За  $v < 1,24 M$ , ИЦ сигнатура која долази од металних делова, за одређене висине, у зависности од брзине лета, може бити потиснута у црно.

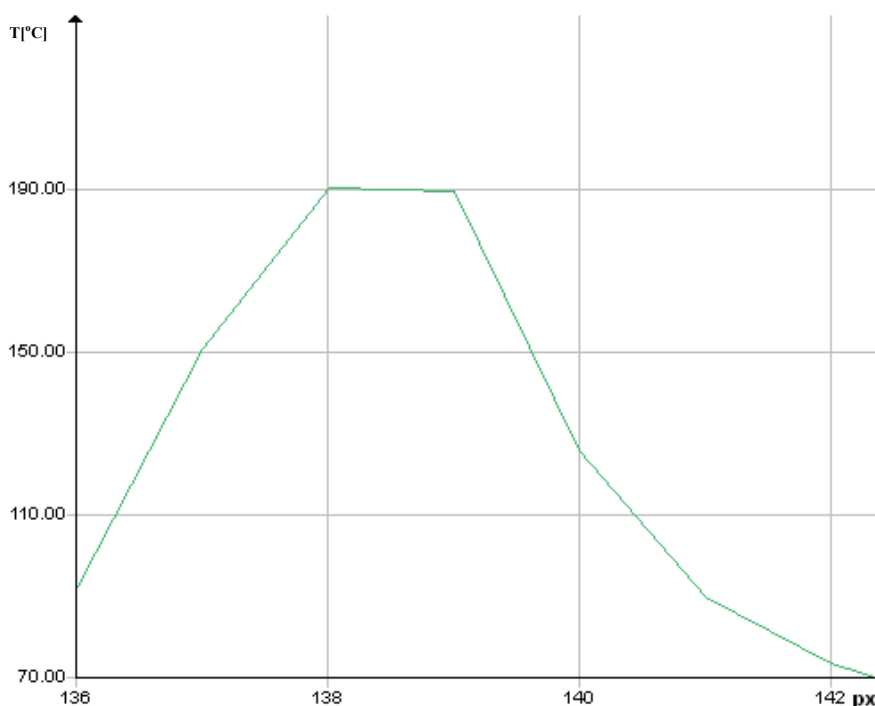
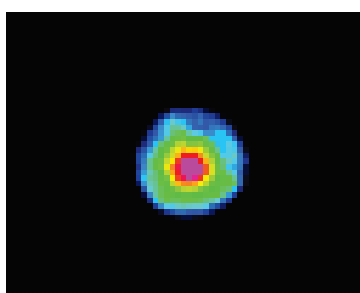
### 2.3.2. Зрачење продуката сагоревања

Карактер расподеле зрачења млазних мотора авиона, одређује се њиховим топлотним режимом, бројем млазних мотора, геометријским односом између дужине и пречника издвуне цеви, дужином трупа авиона и другим факторима. Унутрашњост млазника и откривени делови мотора (нпр. лопатице турбине, струјни мешач), представљају главне изворе зрачења млазног мотора. На местима потпуног застоја струје гаса услед његовог аеродинамичког загревања, долази до прираштаја температуре гаса до  $80 K$ , тако да при брзини око  $1,1 M$ , температура лопатица гасне турбине може да пређе  $1100 K$ . Максимум зрачења загрејаних металних делова мотора се налази приближно око  $3,5 \mu m$  [3]. Код процене ИЦ зрачења овог извора зрачења у литератури [2] се наводи максимална могућност отворене површине по мотору од  $0,4 m^2$  и температура од  $700 K$ .

Током потпуног сагоревања угљеноводоничних горива у великим количинама настају гасови са молекулима водене паре и  $CO_2$ . У самом излазном млазу врелих продуката сагоревања изражени су високи температурни градијенти, услед сложених термодинамичких процеса мешањем овог млаза са хладним слојевима атмосферског ваздуха. Зрачење и апсорпција гасова се одвија на истим таласним дужинама због различитих феномена молекуларних вибрација и ротација у ИЦ делу спектра. Различитим температурама гасова одговарају различити апсорпциони спектри по интензитету и распореду апсорпционих линија. На распоред и број апсорпционих линија највише утичу процеси интеракције и судари између молекула, комбиновање основних учестаности, спрезање ротационих и вибрационих стања и ширење основних спектралних линија услед Доплеровог ефекта. Код реалних спектра, мноштво индивидуалних линија се стапа у спектралне траке. Гасови који излазе из млазнице се налазе на знатно вишој температури од атмосферских гасова који апсорбују. То доводи до ширења спектралних трака ка већим таласним дужинама и повећања кинетичке енергије молекула, која се делом троши и на сударне процесе. Интензитет зрачења спектралне траке зависи од популације побуђених стања молекула који настају после сударних процеса. Део зрачења врелог језгра млаза, који емитује на крајевима спектралног опсега, избећи ће апсорпцију, што је значајно, јер се мерењима може одредити полуширина емисионе линије  $CO_2$  и на тај начин прецизно утврдити ефективна температура гаса. Са повећањем температуре  $CO_2$  његова спектрална трака са центром на  $4,25 \mu m$  се шири ка већим таласним дужинама, док је ширење ка мањим таласним дужинама ограничено на  $4,15 \mu m$ , где нема ИЦ зрачења из тог појаса [3]. Код процене ИЦ зрачења овог извора зрачења у литератури [2], оцењено је да максимална латерална пројектована површина врелих продуката сагоревања износи  $1 m \times 7 m$  са средњом ефективном температуром око  $450 K$ , при брзини  $2 M$  и отворене површине мотора од  $0,4 m^2$ . Температура на излазу млазнице је око  $920 K$ .

За исто слабљење од  $0,1 km^{-1}$  и температурну разлику циља и позадине у околини циља, која је већа од  $16 ^\circ C$ , ове летелице се могу детектовати на удаљеностима до  $50 km$  од осматрачке станице са 4 пута већом температурном разликом циља и позадине на пријемнику у односу на температурну осетљивост сензора.

У смислу експерименталног потврђивања резултата наведених у теорији применом термовизијске технике [8-10], претходно су извршена мерења краткотрајних високо-температурних промена (Прилог 1) у сцени и постигнути су добри резултати. Сходно стеченим искуствима, приступило се мерењима зрачења врелих продуката сагоревања летелица у њиховим различитим режимима и маневрима. Издвојени су репрезентативни кадрови снимака ИЦ сигнатуре зрачења летелица на пресеку млазнице и продуката сагоревања. На њима је праћена просторна расподела температуре дуж карактеристичних мерних линија. Снимања су обављена без филтера у домену температура испод  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ , где смо у могућности директно да препознамо сцену и циљ унутар ње и са филтером за температуре од  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , када нисмо у стању да препознамо сцену, већ само сигнатуре високих температура (отежано је навођење на циљ, с обзиром да постоји време кашњења око  $5\text{ s}$  због промене филтера). На основу просторних расподела температура, могуће је проценити и површину коју заузимају врели продукти сагоревања.



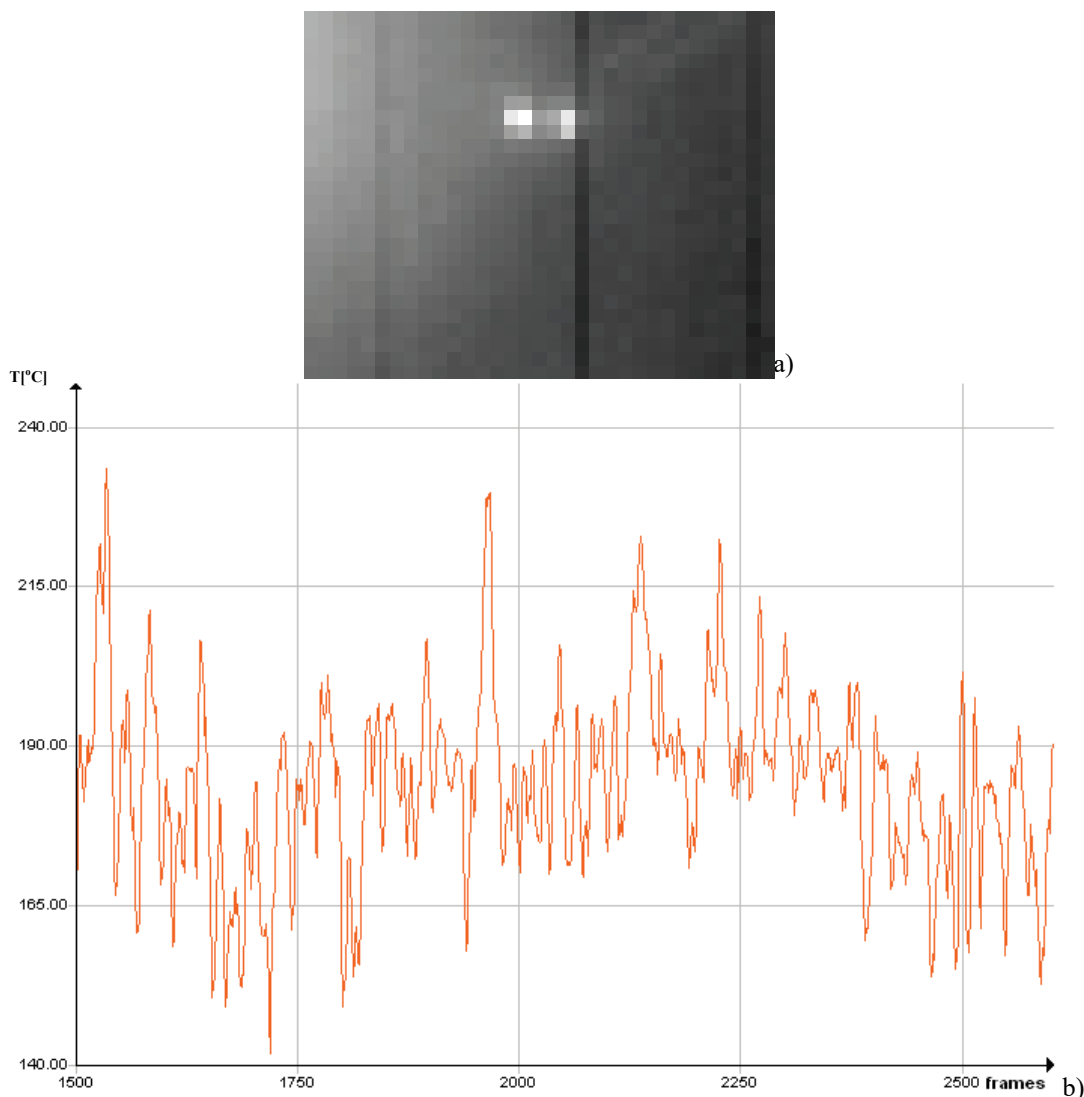
Сл.6 Просторни профил температуре мерен иза млазнице [31].

На сл. 6 је снимак профила млазнице субсоничног млазног авиона. Димензије релевантних граница ширења продуката сагоревања у радијалном правцу у односу на њихов латерални правац се могу проценити. Заравњени део графика који одговара температури од  $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ , представља сатурисани део, с обзиром да су унутар млазнице температуре знатно веће. Како је мерна линија провучена по средини млазнице (мерним



поступком, одређено је место највеће ширине млазнице) и познат је њен отвор, на основу пикселизације, могу се проценити неопходне мере.

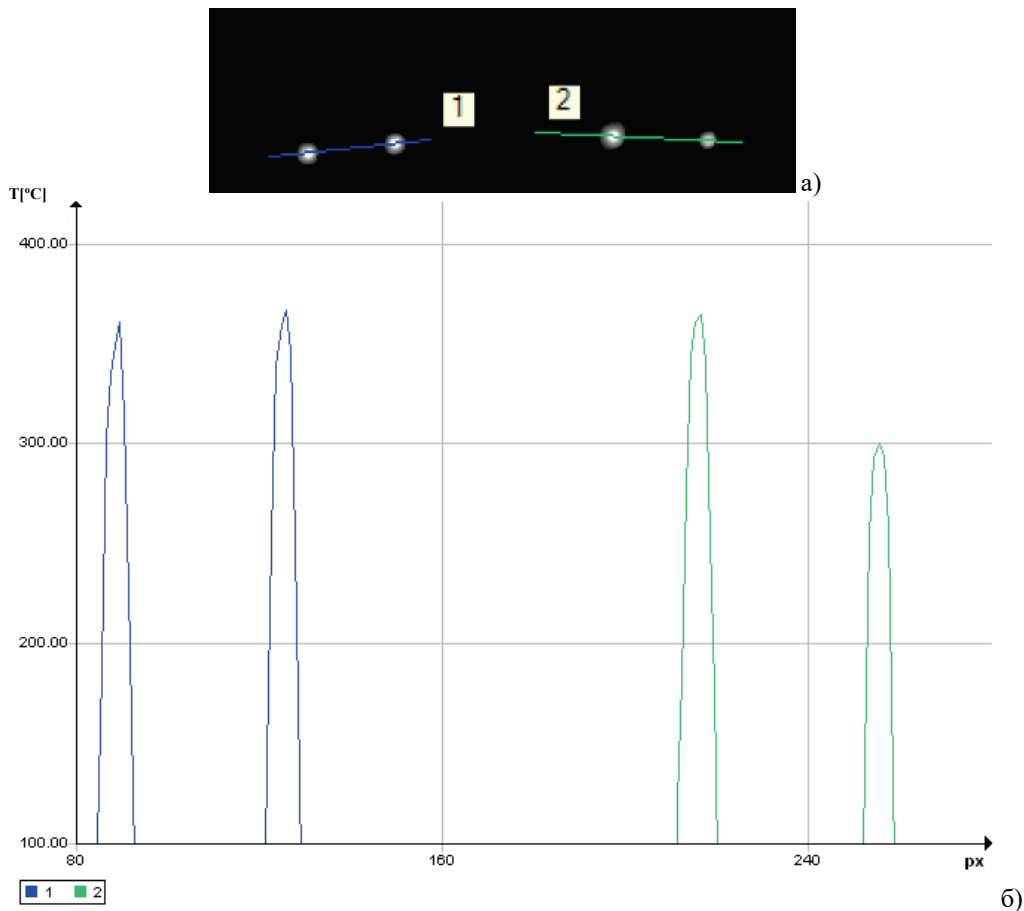
На сл. 7 је снимак латералног профила продуката сагоревања суперсоничног авиона у једној фази лета. Снимак је урађен ради поређења и потврђивања са сличним подацима у литератури [2, 3, 30]. На основу познате геометрије и пикселизације, могу се проценити неопходне димензије извора зрачења.



Сл. 7 а) Највећи део продуката сагоревања транспортног авиона посматран под углом из задње хемисфере – кадар термовизијског снимка, и б) Одговарајући временски дијаграм који прати максималну промену температуре продуката сагоревања [31].

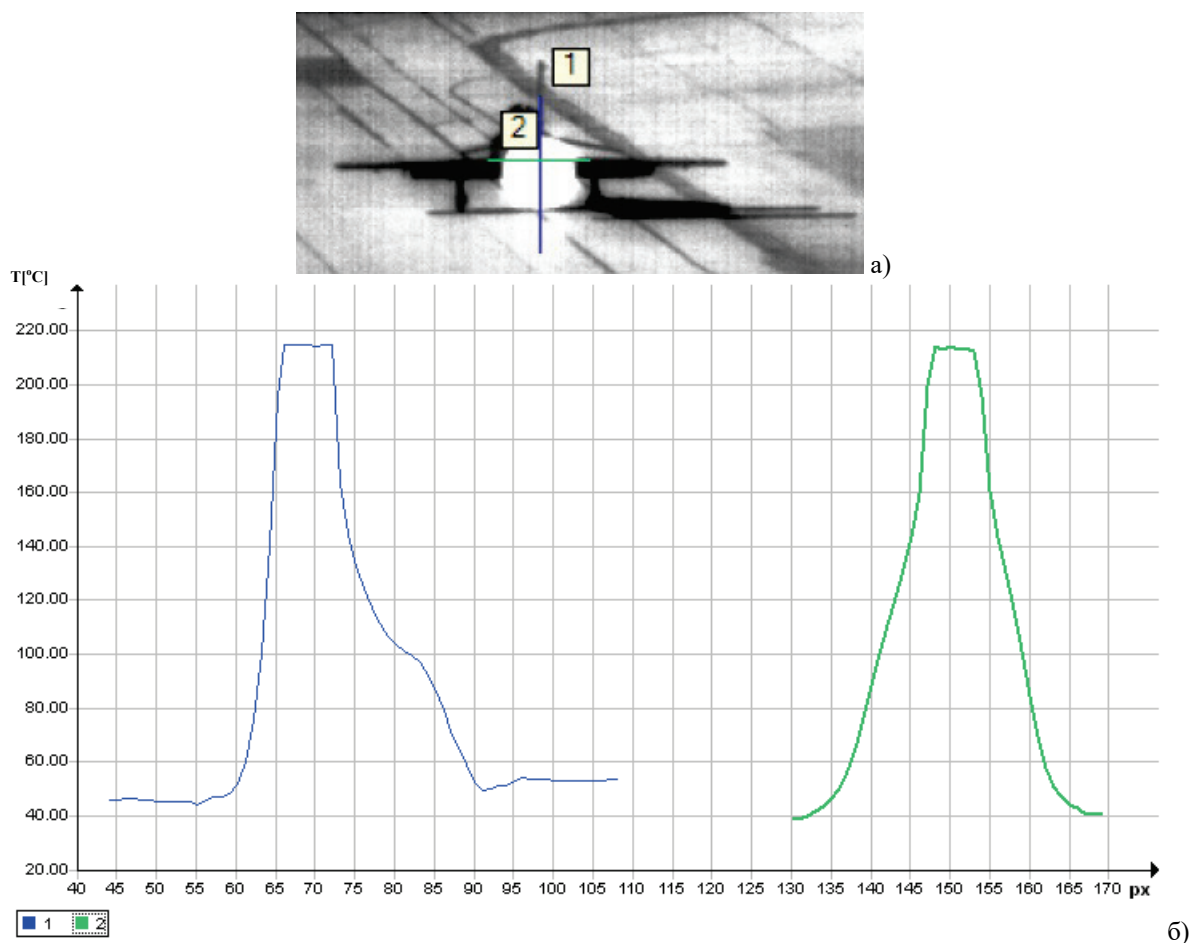
Сл. 7а карактерише почетни тренутак снимања временског дијаграма. Иако је снимање вршено без филтера у динамичким условима, није долазило до сатурације, као што се види, али није ни захваћен пресек млазнице нормалан на правац лета, већ је посматран под доста великим углом у односу на правац лета. Сферни облик одговара „цветању“ врелих гасова у непосредној околини млазнице. Појава „цветања“ се може потиснути, али за такав температурни прозор не бисмо могли да уочимо правац млаза продуката сагоревања и појавиле би се танки прстенасти отвори млазница у кадру.

На сл. 7б, приказан је и временски дијаграм који прати промену температуре продуката сагоревања у области оба млазна мотора.



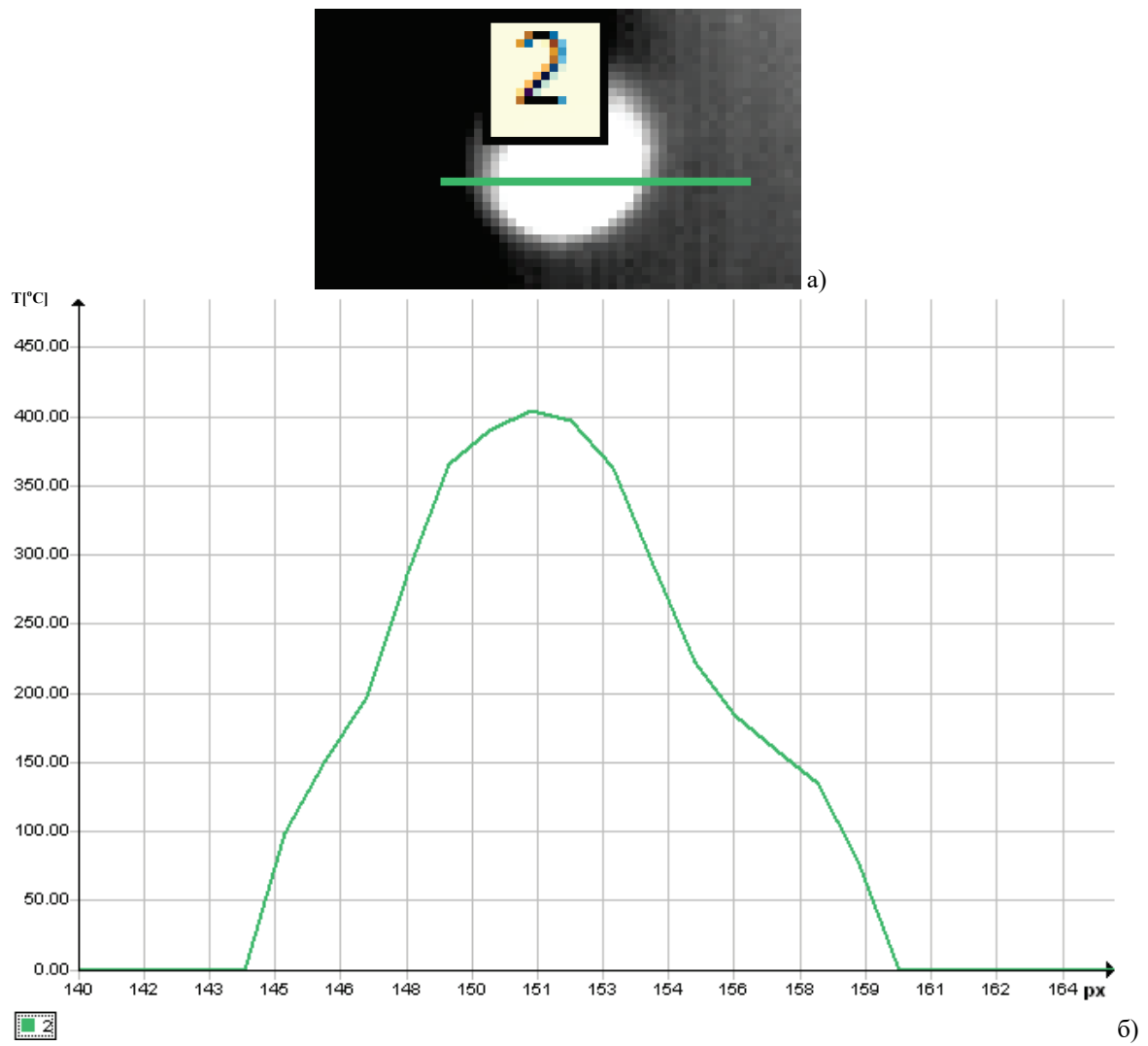
Сл. 8 а) Кадар термовизијског снимка са мерним линијама за процену просторне расподеле температуре за други транспортни авион, и б) Профил просторне расподеле температуре према мерним линијама на слици а) [31].

Код другог транспортног авиона (сл. 8), посматрана је ИЦ сигнатура млазних мотора директно из задње хемисфере и са знатно ближег растојања, него у претходно приказаном случају (сл. 7).



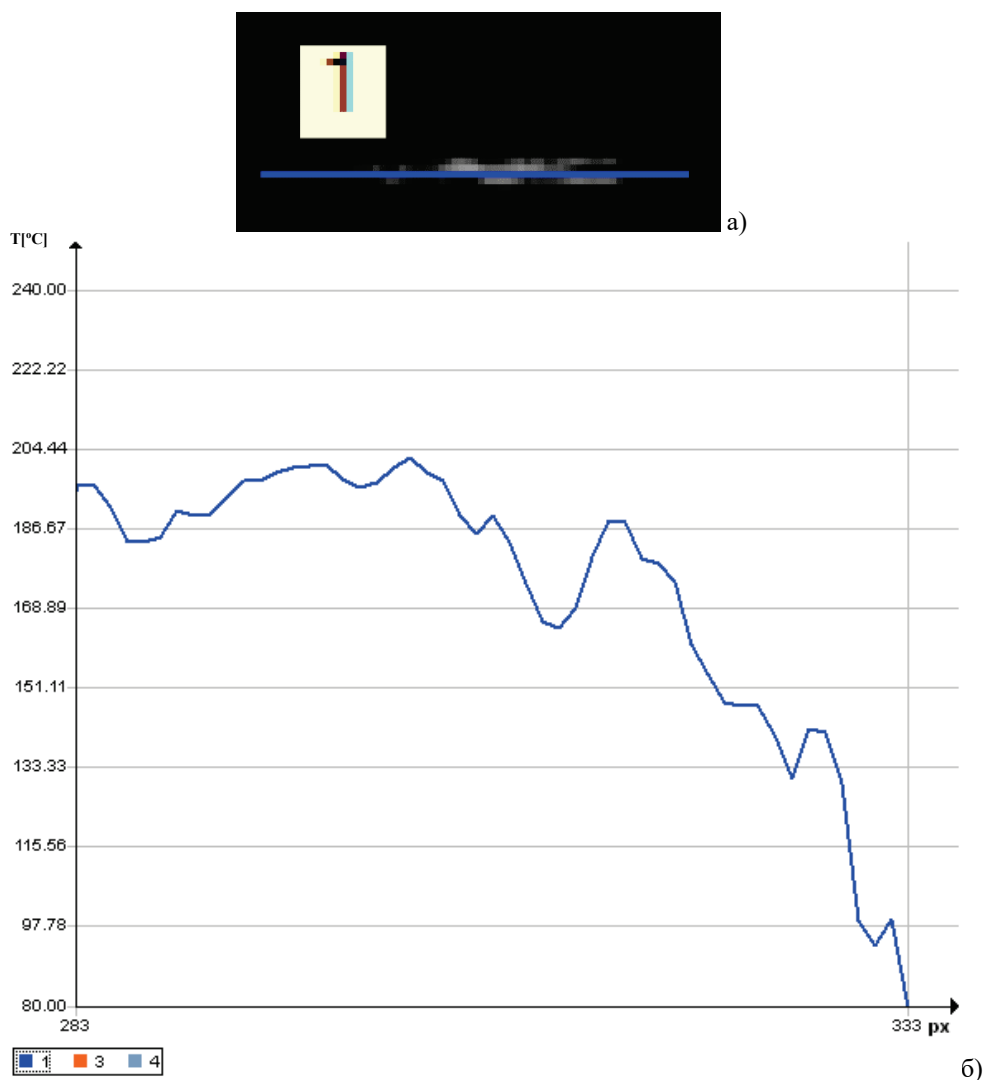
Сл. 9 а) Кадар термовизијског снимка са мерним линијама б) Профил просторне расподеле температуре према мерним линијама на слици а).

На сл. 9 је приказан кадар термовизијског снимка пресека млазнице без филтера по пуштању субсоничног авиона у тренутку његовог изласка на полетну писту са мерним линијама, да би се процениле димензије врелих излазних гасова. У областима сатурације забележена је температура од  $214^{\circ}\text{C}$ , просечне температуре су биле око  $94^{\circ}\text{C}$  ван области пресека млазнице, а минималне око  $40^{\circ}\text{C}$ . У истој ситуацији је промењен филтер и процењена је температура на пресеку млазнице (сл. 10). Максимална температура  $400^{\circ}\text{C}$  је потврђена у непосредној комуникацији са пилотом (инструменти баждарени; температура је одговарала тренутној снази мотора). Потом је извршена процена емисивности врелих гасова од 0,5 и проверена за друге изабране кадрове. Тако је за путнички авион приказан на сл. 9, потврђена температура  $350^{\circ}\text{C}$  на пресецима млазница, што је у складу са подацима из литературе [1, 2].



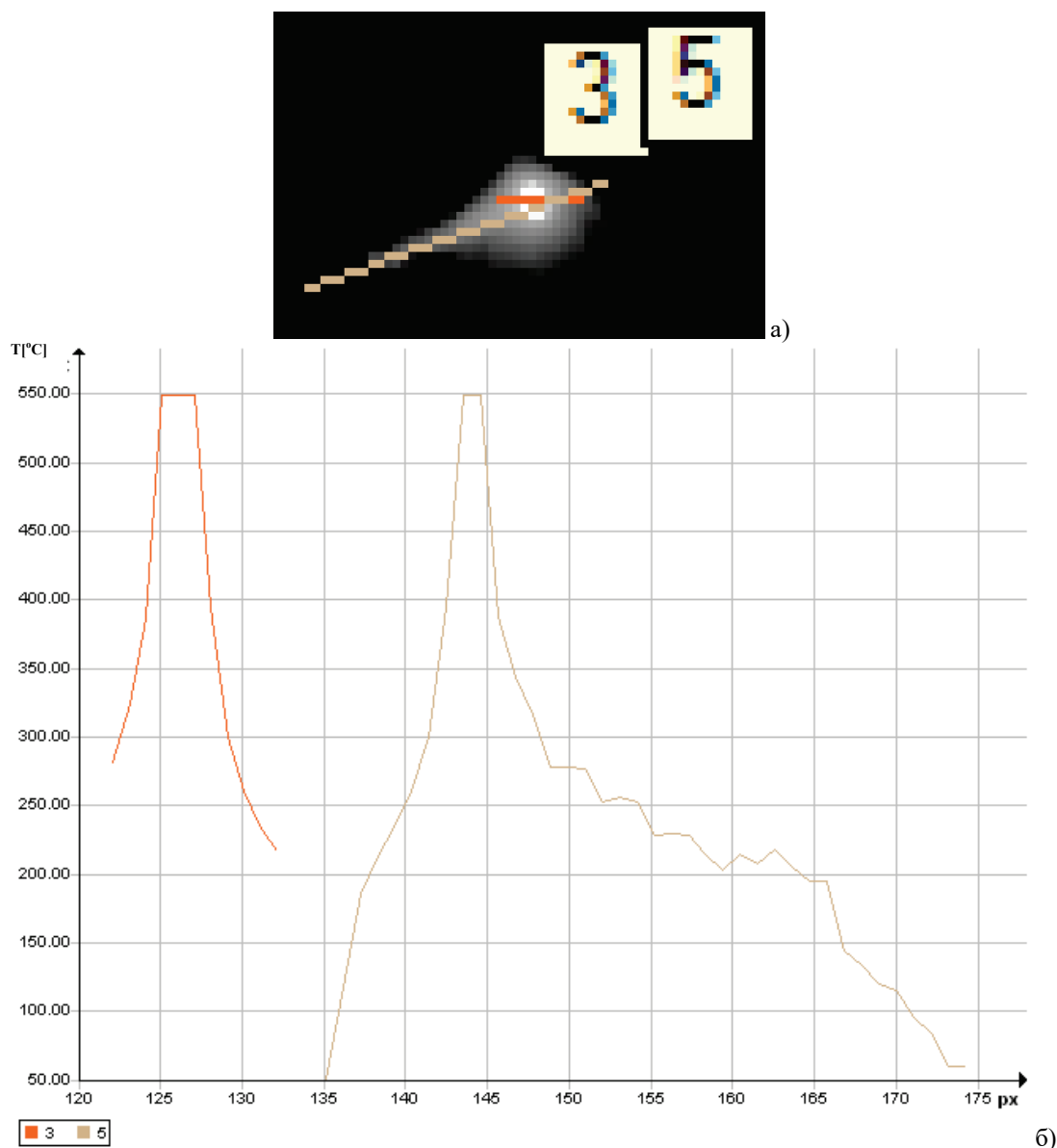
Сл. 10 а) Кадар термовизијског снимка са мерном линијом, и б) Профил просторне расподеле температуре према мерној линији на слици а).

После ове верификације, процењена је и температура суперсоничног авиона током лета у три просторне позиције на различитим растојањима, што је приказано на сл. 11-13.



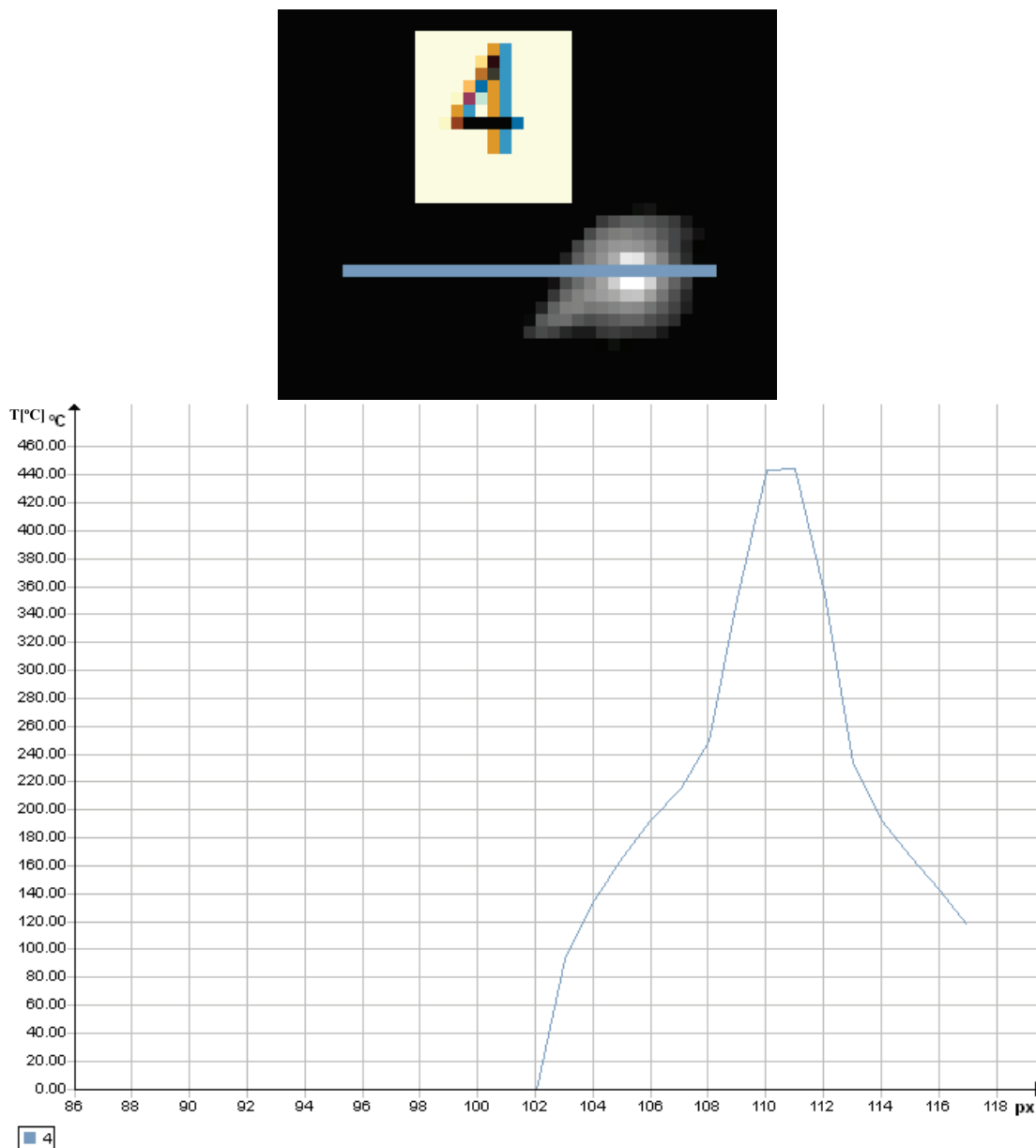
Сл. 11 а) Кадар термовизијског снимка са мерном линијом дуж млаза продуката сагоревања бочно, и б) Профил просторне расподеле температуре према мерној линији на слици а) [31].

У оквиру ИЦ снимка издвојен је кадар са бочном позицијом суперсоничног авиона, где се може проценити ефективна температура продуката сагоревања и њој одговарајућа површина (сл. 11). Температуре су испод 300 °C. Пресек млазнице се не види. У оквиру истог снимка, издвојен је кадар авиона на већој удаљености од тачке посматрања и другачије оријентације у простору, где је пресек млазнице знатно отворен ка термовизијској камери (сл. 12).



Сл. 12 а) Кадар термовизијског снимка са мерним линијама дуж млаза продуката сагоревања, и б) Профил просторне расподеле температуре према мерним линијама на слици а).

Дуж мерних линија на позицијама које одговарају пресеку млазног мотора потврђена је температура од 550 °C. На још већој удаљености за нову оријентацију авиона у простору и режим рада мотора, потврђена је температура око 450 °C (сл.13).



б)

Сл. 13 а) Кадар термовизијског снимка са мерном линијом, и б) Профил просторне расподеле температуре према мерној линији на слици а).

## 2.4. Анализа радијансе циља и позадине

Током мерења је јасно уочено издвајање главних извора зрачења летелице, који се односе на аеродинамичко загревање оплате услед одговарајућих режима лета и температуре на пресеку млазнице и самих продуката сагоревања. Анализа, приступ и сагледавање начина, како да се препознате вредности што веродостојније моделују и да се при томе очува природа запажених својстава реалног циља у њиховом динамичком односу, захтева више времена и додатна истраживања у том правцу.

Претпоставимо да радијансу неба можемо представити радијансом АЦТ за температуру слоја атмосфере на висинама од 2 km до 3 km у вертикалном профилу атмосфере. Авиони који се крећу брзинама мањим од 0,75 M, услед аеродинамичког

загревања имају мању разлику температуре од 9,8% вредности температуре слоја ваздуха у околини летелице.

Размотримо пример лета идентичних летелица у хоризонталом лету константним брзинама од 0,75  $M$ , на различитим висинама од 2  $km$ , 4  $km$  и 6  $km$  за горе наведену претпоставку. Ако је температура слојева ваздуха на нивоу земље 293  $K$ , температуре слојева ваздуха на наведеним висинама износе 280  $K$ , 267  $K$  и 254  $K$ , редом. Температурни допринос услед аеродинамичког загревања на наведеним висинама редом износи приближно 27  $K$ , 26  $K$  и 25  $K$ . Дакле, вредности температуре циља услед аеродинамичког загревања у односу на висину лета износе 307  $K$ , 293  $K$  и 279  $K$ , редом. Ако усвојимо да вредност радијансе неба одговара вредности радијансе температурних слојева ваздуха на висини 2  $km$ , разлика температурних доприноса услед аеродинамичког загревања циља и температуре која одговара радијанси неба за дефинисане висине лета износи:

- 27  $K$  за висину од 2  $km$ , и није потиснута,
- 13  $K$  за висину од 4  $km$ , делом је потиснута (не види се температурна разлика од 26  $K$ ), и
- за 1  $K$  је нижа од најниже температуре у посматраној ИЦ сцени (температуре неба од 280  $K$ ), сигнал је потиснут у црно и не види се.

Нашим мерењима су потврђене температуре од 350  $^{\circ}C$  до 550  $^{\circ}C$  на пресеку млазнице авиона за различите режиме рада мотора, маневре и кретања летелица. То се уклапа у процене наведене у литератури [2, 3, 30], те се може усвојити средња вредност температуре продуката сагоревања 450  $^{\circ}C$  приликом одговарајућих прорачуна. Минимална температура током рада мотора која се наводи у литератури [2, 32] износи 300  $^{\circ}C$  а потврђује се мерењима у ситуацији ваздушног реланта (рад мотора на најмањем броју обртаја). Температура која одговара пресеку млазнице и зоне високотемпературног излазног млаза продуката сагоревања, представља температуру, која одговара високој радијанси циља, која неће бити потиснута радијансом неба. Дакле, могуће је проценити параметре ИЦ мете, тако да, за тражене параметре лета, тип летелице и њену удаљеност, буде уочљива и када је просторни угао под којом се види циљ мањи од просторне резолуције сензора.

Током изведених снимања у дневно/ноћним условима (летње небо), постојала је добра метеоролошка видљивост. За ИЦ сигнатуру позадине, најчешће је забележено ведро небо у пуном кругу осматрања по азимуту, а у ређим случајевима, постојала је облачност до 3/8 са нехомогеном густином и у неуједначеном просторном распореду. Постојали су делови видног поља са израженом до потпуном облачношћу.

Имајући у виду сложеност и променљивост конфигурације облака и њихову различиту: структуру, густину, нехомогеност, оријентацију закривљених површина у односу на камеру и др., оба издвојена извора ИЦ зрачења (оплата и пресек млазнице са продуктима врелих излазних гасова) авиона су детектована на различит начин. Захваљујући високој температури излазних гасова, приликом њиховог посматрања из позиција задње хемисфере авиона, они су успешно детектовани и када су једним делом били заклоњени облаком. На висинама испод 2 $km$  и релативно блиској удаљености субсоничног авиона (на око 5 $km$  до 6 $km$  у односу на сензор), могућност ИЦ детекције оплате на бази појавног контраста препознаје се у три случаја:

- хладнија је од дела структуре облака у њеној позадини и уочљива је,
- топлија је од дела структуре облака у њеној позадини и уочљива је, и
- температура оплате је блиска температури дела структуре облака у њеној позадини и није уочљива (потиснута је у „сиво“).

У случају мрежноцентричног надзора, постоји могућност јасног уочавања летелице и у оваквим метеоролошким условима, с обзиром да овај концепт обезбеђује пар сензора који могу да прате летелице и/или преузму даље праћење од другог пара сензора и да постоји



доминантни извор зрачења, а то је пресек млазнице са врелим продуктима сагоревања [11, 12]. Ограничења појединачног сензорског система и особине примењене мреже за надзор, нису разматрани у овом истраживању. Наравно, уз присуство облака поред њиховог сопственог зрачења, постоје и ефекти рефлексије других извора од њихове структуре, ефекти секундарног расејања и др.

Имајући у виду и друге тактичке предности чистог неба (без облака), од посебног значаја је разматрање такве позадине. Поред слабљења у атмосфери, које је повезано са одговарајућим метеоролошким условима, годишњим добом, климатским условима и добом дана и ноћи, значајно је и позадинско зрачење неба. Радијанса неба ће се знатно разликовати од правца осматрања неба, када се тај правац мења по елевацији, из разлога што до сензора долазе температуре различитих слојева атмосфере, њихових густина и дебљина. Ако је радијанса неког објекта у сцени нижа од радијансе неба коју види сензор, постоји могућност да такав сигнал буде потиснут у „црно“. Анализирајући радијансу неба у околини летелице, која представља позадинско зрачење у појавном контрасту у односу на радијансе које долазе од посматраног авиона, претпостављено је да се та радијанса може апроксимирати температуром АЦТ за температурне слојеве ваздуха који се налазе на висини између 2 *km* и 3 *km* од површине земље. Прецизно дефинисање карактеристичног слоја неба, чије би се зрачење могло представити зрачењем АЦТ за средњу температуру која описује тај слој и да је са друге стране еквивалентна радијанси неба, зависи од више услова који се односе на различите особине, у непосредним околинама појединачних температурних слојева, које нису довољно изучене да би се могли извести потребни закључци. Из тог разлога, подаци о радијанси неба се и даље преузимају из експерименталних резултата за познате услове мерења и пореде се са резултатима развојних нумеричких модела.

## 2.5. Слабљење ИЦ зрачења при проласку кроз атмосферу

Флуks ИЦ зрачење летелица слаби током простирања кроз атмосферу због процеса: апсорпције на молекулима, расејања на аеросолима и слабљења на атмосферским гасовима (континуум) [3]. У зависности од стања атмосфере, метеоролошких и климатских услова за различито доба дана и ноћи одређеног поднебља, геометрије посматрања, димензија честица и посматраног спектралног опсега зависи који ће од ових процеса више доминирати.

У односу на правац простирања до слабљења енергије зрачења у атмосфери долази због два процеса који се одвијају на молекулима и аеросолима (грануласта структура која може бити чврста или течна - најчешће се састоји од чврстог језгра око кога се налази грануласто везани молекули воде).

Међу најзначајније утицаје атмосфере на слабљење инфрацрвеног зрачења летелица [3], а самим тим и смањивање контраста у односу на позадину, могу се издвојити следећи:

- *Апсорпција ИЦ зрачења* летелица на различитим састојцима атмосфере. Највећи део флуksа апсорбују молекули водене паре ( $H_2O$ ), угљен диоксида ( $CO_2$ ) и у извесним слојевима озон ( $O_3$ ). На великим растојањима између извора зрачења и пријемника, уочава се и утицај споредних састојака, као што су азот диоксид ( $N_2O$ ), метан ( $CH_4$ ), угљен моноксид ( $CO$ ) и „тешка вода“ ( $HDO$ ). Утицај главних састојака атмосфере, азота ( $N_2$ ), кисеоника ( $O_2$ ) и аргона ( $Ar$ ), се може занемарити, јер изузетно мало утичу на апсорпцију.
- *Зрачење атмосфере* које потиче од молекула водене паре ( $H_2O$ ), угљен диоксида ( $CO_2$ ), озона ( $O_3$ ) и азот субоксида ( $N_2O$ ).

- *Расејање зрачења циља* из путање на молекулима гаса и аеросолима - чврстим честицама и капима течности.
- *Расејање нежељеног зрачења позадине* унутар видног поља пријемника.
- *Турбуленције у атмосфери* (атмосферски оптички шум).

Земаљска атмосфера за MWIR се може моделовати неким од једноставних модела са претпоставком константне густине појединачних састојака атмосфере, градуираног притиска у складу са барометарском формулом, хомогене структуре, са планарним слојевима ваздуха у које се може увући структура облака и да се радијанса чистог неба може представити параметрима јединствене емисивности и температуре. Са порастом угла посматрања у односу на ниво мора (елевације), дужина оптичког пута кроз атмосферу расте, као и ефективне вредности емисивности сопственог зрачења, док апсорпција сопственог зрачења опада.

За одређивање мере ИЦ спектралног зрачења за различите видове позадина коришћена је мобилна спектрографска лабораторија [27]. Добијене спектралне расподеле потврђују доминантност рефлектованог зрачења Сунца и неба за  $\lambda \leq 3 \mu\text{m}$  и топлотног зрачења на таласним дужинама  $\lambda > 3 \mu\text{m}$ . Тако се разликују спектралне области, где доминирају:

- процеси расејања,  $\lambda \leq 3 \mu\text{m}$ , и
- топлотно зрачење,  $\lambda > 3 \mu\text{m}$ .

Састав атмосфере чине смеша гасова као и велики број сублимираних честица које су различитог хемијског састава и димензија. Ситуација се усложњава тим више, имајући у виду да атмосфера није ни хомогена ни статична по висини у времену и простору.

Количина водене паре је у атмосфери различита. Њена садржина у одређеној запремини ваздуха, расте са температуром, а мења се у зависности од метеоролошких услова, годишњег доба, висине и географске локације у широким границама. На основу дугогодишњих метеоролошких осматрања, статистичком анализом, могуће је добити средње услове за неко подручје. Измена количине водене паре у чистом ваздуху опада са висином. У почетку, на малим висинама та измена је знатна, док на висинама већим од 10 km садржај водене паре у чистом ваздуху постаје незнатан [35].

Вода се у ваздуху налази поред облика водене паре и у облику капљица (аеросола). За таласна подручја рада термовизијских уређаја, када се вода налази у облику водене паре, доминантно слабљење енергије зрачења потиче од апсорпције молекула водене паре, док за капљичаст облик појављивања воде у атмосфери, доминира слабљење енергије зрачења због расејања на капљицама (аеросолима) воде.

Угљен диоксид изразито утиче на простирање зрачења у области 3  $\mu\text{m}$  до 5  $\mu\text{m}$  и најјачи је апсорбер у атмосфери после водене паре. Емисија продуката сагоревања фосилних горива летелица углавном потиче од загрејане смеше гасова која се састоји од угљен диоксида, водене паре и угљен монооксида. Како у смеси врелих гасова доминира угљен диоксид, јасно је да је тешко детектовати ово зрачење, јер загрејани гасови зраче углавном на истим таласним дужинама на којима и апсорбују зрачење. Концентрација угљен диоксида је константна до знатних висина (споро се мења са временом) и не мења се услед вертикалних струјања. Она у руралним областима запремински износи око 0,029%, док у градовима и индустријским областима може достићи и 0,5%. Слабљење инфрацрвеног зрачења услед апсорпције при проласку кроз угљен диоксид не зависи од метеоролошких услова.

Утицај озона је најизраженији на инфрацрвено зрачење од 20 km до 30 km где је његова концентрација и највећа. Налази се на висинама од 10 km до 40 km.

Остали гасови у атмосфери који утичу на апсорпцију ИЦ зрачења долазе до изражаја у горњим слојевима атмосфере. Угљен диоксид и озон су основни апсорбери ИЦ зрачења у

овим слојевима атмосфере. Поред њих, значајније апсорбују и  $N_2O$ ,  $CH_4$  (равномерно распоређен),  $CO$  и тешка вода, иако су у незнатним концентрацијама.

У чврсте и течне аеросоле, које замућују атмосферу, убрајају се дим, прашина, цветни прах, честице соли, водене капљице и кристали леда и срећу се у доњим слојевима атмосфере. Расподела ових честица по висини, директно зависи од њихове брзине.

Прашина и дим у великим урбаним срединама и индустријским предузећима се обично простиру од 500 *m* до 700 *m* висине, док у случају интензивних вертикалних струјања могу достићи и веће висине.

На слабљење у приземним слојевима атмосфере, поред прашине, дима и водене паре, знатно утиче и присуство магле (хидрометеора - нестабилних аеросола; нестабилне грануласте структуре). Приликом кондензације засићене водене паре на датој температури и максималне вредности парцијалног притиска водене паре у ваздуху, образује се магла. Хигроскопске примесе у ваздуху, чине језгра кондензације магле. Појава магле нагло замућује атмосферу.

У зависности од замућења атмосфере, разликује се сумаглица (оптичка видљивост од 1 *km* до 10 *km*) и магла (оптичка видљивост је мања од 1 *km*). Сумаглица и магла се састоје од водених капљица, које се крећу од десетих делова микрометара до неколико десетина, и слабљење ИЦ зрачења зависи од њихових димензија. Сумаглица је почетни стадијум развијања магле и описује се капљицама величине мањих од 1  $\mu m$  са концентрацијом 10 до 40 капљица у запремини од 1  $cm^3$ , док у воденим маглама капљице имају димензије 0,1  $\mu m$  до 50  $\mu m$  – 60  $\mu m$ . Знатан део ових примеса има улогу центара кондензације водене паре и тако утиче на формирање облака и магле. У условима сумаглице, могућност откривања ваздушних циљева у блиском ИЦ спектралном опсегу је знатно већа у односу на видљиви спектрални опсег. Ако оптичка видљивост постане мања од 1 *km*, услед веће концентрације крупнијих водених капљица (магла), у средњем и далеком ИЦ спектралном опсегу, могуће је открити циљеве који се налазе на два до четири пута већем растојању од актуелне оптичке видљивости, док је сигнал у блиском инфрацрвеном спектралном опсегу потиснут.

До слабљења инфрацрвеног зрачења при проласку кроз облаке и кишу, долази услед неселективног расејања и апсорпције на воденим капљицама. Облаци и киша се састоје углавном од водених капљица или честица леда већег пречника, од 50  $\mu m$ , а могу бити и до 100  $\mu m$ . Дијаграми расејања за сферне честице леда полупречника већег од 50  $\mu m$ , израчунавају се путем анализе процеса дифракције, рефлексије и преламања [36]. Ове честице су непрозирне у спектралном опсегу рада термовизијских уређаја. Мера могуће видљивости зависи од густине и дебљине слоја ових аеросола, који делом заклањају авион у облаку (да ли су се створили услови за неселективно расејање или постоји и даље оптички пут за ИЦ зрачење авиона ка термовизијском осматрачком систему)

За моделовање облака, неопходно је познавање оптичких својстава честица облака, њихова просторна расподела, температура облака, температура и садржај водене паре између облака и посматрача. На основу исцрпних и захтевних мерења, сложених математичких модела и статистике, постоје описи танких цируса.

Већина облака се налази на висини испод 10 *km*. У облацима и киши инфрацрвена спектрална подручја за детекцију циљева у ваздуху су погодна само на кратким растојањима (Овде је незнатно преимућство инфрацрвених спектралних подручја у односу на видљиво спектрално подручје.).

Ледене честице цируса су ефикасни топлотни ИЦ извори, због апсорпционих особина честица великих димензија и могу значајно да охладе ваздух у непосредној околини. Загрејан ваздух испод охлађеног слоја цируса, може довести до нестабилних брзих промена температуре ваздуха са висином, до конвективног мешања и турбуленције.

Према последњим искуствима у извођењу ваздушних удара сила НАТО алијансе у свету, уочава се да се она изводе по сувом и мирном времену. У односу на стелт технологију, примећено је да се ове летелице користе само у условима у атмосфери који задовољавају умерену температуру, ниску влажност и мале падавине. У строжијим условима се не примењује термовизијска техника [3].

### 2.5.1. Слабљење услед апсорпције

За таласне опсеге рада термовизијских уређаја, од значаја је апсорпција на молекулима, која дефинише атмосферске прозоре трансмисије кроз атмосферу. Код овог процеса, упадна енергија зрачења прелази у неки други вид енергије. Највећи губици услед молекуларне апсорпције, настају због присуства водене паре ( $H_2O$ ),  $CO_2$ ,  $O_3$ , док мањи губици настају због  $CH_4$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2O$  и других гасова у атмосфери. У MWIR области спектра атмосфере, ово слабљење се дешава на молекулима водене паре и  $CO_2$ . Молекуларна апсорпција настаје услед квантно-механичке резонанције ових молекула и има значајан ефекат на ширење ИЦ сигнатуре авиона. Молекули апсорбују и емитују зрачење на својим природним резонантним фреквенцијама, чиме настају спектралне области у којима се апсорбује целокупан или значајан део извора ИЦ зрачења. Дубина и спектрална ширина апсорпционих области, зависе од концентрације молекула на оптичком путу. За већу оптичку дужину пута и на нижим надморским висинама (већа је густина ваздуха) ширина апсорпционе области је већа. Док је концентрација  $CO_2$  директна функција притиска, густина водене паре је функција и притиска и температуре. Са порастом надморске висине, концентрација молекула водене паре дуж оптичког пута опада брже од концентрације молекула  $CO_2$ , јер је густина водене паре мање засићена на нижим температурама, тако да се на надморским висинама преко 9 *km*, апсорпција на молекулима водене паре практично може занемарити. Спектрални коефицијент слабљења на овим молекулима се одређује преко познатих линијско-апсорпционих спектра молекула, водећи при томе рачуна о концентрацији молекула на оптичком путу јер то утиче на прорачун.

### 2.5.2. Слабљење услед расејања

За таласне опсеге рада термовизијских уређаја, слабљење енергије зрачења услед расејања, има често већи утицај него слабљење услед молекуларне апсорпције и највише утиче на укупну трансмисију унутар атмосферског прозора. Расејање на аеросолима је спектрално неселективно, зависи од таласне дужине, ефективног полупречника сфере аеросола и расподеле концентрације аеросола по ефективним полупречницима у простору. Код овог процеса, долази до скретања таласног фронта упадне енергије. Разликујемо три врсте расејања:

- Рејлијево (Rayleigh), које настаје на аеросолима ефективног пречника мањег од таласне дужине светлости. Утиче на слабљење до таласних дужина од 1  $\mu m$  (у UV област). Присутно је и у чистој атмосфери, јер се на молекулима атмосфере расејање не може избећи. На краћим таласним дужинама је узрок феномену плавог неба и црвене боје сунца на заласку.
- Миово (Mie), када су ефективни пречници аеросола упоредиви са таласном дужином зрачења. Ова теорија је примењива и за аеросоле мањих димензија од таласне дужине светлости (резултати блиски резултатима добијеним на основу Рејлијеве теорије). Миово расејање је присутно у спектралној области примене термовизијских уређаја. Миова теорија претпоставља да су честице међусобно

независне, а да се интензитети расејане светлости могу сабрати и да се вишеструко расејање искључује (честице осветљене само примарном светлошћу).

- Неселективно, када су димензије аеросола знатно веће од таласне дужине зрачења (феномени рефлексије и дифракције на честицама, као и преламање зрачења са или без унутрашње рефлексије).

### 2.5.3. Атмосферска трансмисија

Атмосфера је спектрално селективна у односу на зрачења различитих извора, који се кроз њу простиру. MWIR карактеришу области дубоких апсорпција, које раздвајају области релативно високог пропусног спектралног опсега, тзв. атмосферски прозори. Апсорпција и расејање се обично представљају јединственим параметром слабљења кроз атмосферу:

$$\sigma(\lambda) = \alpha(\lambda) + \gamma(\lambda), \quad (3)$$

где су:  $\sigma(\lambda)$  спектрални коефицијент слабљења,  $\alpha(\lambda)$  спектрални коефицијент апсорпције и  $\gamma(\lambda)$  спектрални коефицијент расејања. Спектрална трансмисија  $\tau(\lambda)$  кроз атмосферу за коефицијент слабљења  $\sigma(\lambda) [km^{-1}]$  дуж растојања  $R[km]$  се процењује на основу:

$$\tau(\lambda) = e^{-\sigma(\lambda)R}. \quad (4)$$

Трансмисија се оцењује применом различитих нумеричких модела као што су LOWTRAN, MODTRAN, HITRAN, FASCODE, OPAQUE и др. LOWTRAN [2, 3, 32] је најчешће коришћен и цитиран за различите процене параметара. Коришћен је и за процену коефицијента слабљења у нашој атмосфери [3].

### 2.5.4. Атмосферске турбуленције

Губици услед турбуленције у атмосфери настају када се мешају топле и хладне ваздушне масе. Мешањем ових маса, појављују се локалне промене: температуре ваздуха, њихове влажности, густине, индекса преламања, атмосфере, итд. Зато при проласку светлосног (или ласерског) снопа кроз турбулентну атмосферу долази до реакције снопа са вртложењем, расејања и случајних промена у амплитуди и фази сигнала. Све ове промене се одвијају у времену и простору, тако да се услед турбулентног кретања ваздуха стварају нехомогености у атмосфери. При томе, растојање тачака, у којима се параметри ваздуха за дати износ мењају, може износити од неколико милиметара до пар стотина метара [37]. Тако, турбуленција атмосфере или вртложење, представља нехомогену средину у којој је индекс преламања функција простора и времена и може се представити као да се састоји од великог броја области променљивих димензија, за које треба усредњити индекс преламања. Ове случајности побуђују ефекте који нагињу ка деградирању перформанси светлости, која се простира кроз атмосферу. Ови ефекти су најизраженији у односу на простирање ласерског снопа, па се и мерења атмосферских вртложења највише врше коришћењем ласерског снопа.

Мада су ови ефекти блиско повезани, овде ће се конкретно набројати следећи засебни ефекти:

- *Кривљење снопа*: улазни снап може одступати од линије нишањења (управљања ласерског снопа ка циљу), повећавајући губитак снаге пријемне апертуре.
- *Играње слике*: промене у углу доласка примљеног таласног фронта ће узроковати да слика буде фокусирана у различитим тачкама фокалне равни пријемне оптике.

- *Ширење снопа*: мали угао расејања преко нехомогености шири енергију сигнала преко широких области.
- *Замућење (замаглење) слике*: нарушавањем фазне кохерентности дуж снопа, брзе промене фазе са положајем, воде замућењу слике.
- *Бљескање (сцинтилација)*: разарање интерференције унутар снопа даје локалну флукуацију у амплитуди, тако да се преко снопа појављује светла и црна област у поређењу са средњом вредношћу. Ово води флукуацији у пријемној снази која строжије зависи од димензија пријемне апертуре. Такође, и о времену промене ових флукуација, мора се водити рачуна у АМ (амплитудно модулисаним) системима.
- *Флукуација фазе*: промена времена у фази производи лажну модулацију која интерферише са модулисаним сигналом, а просторна промена тежи да уништи модулисани сигнал у АМ системима.

Сви горе наведени ефекти описују флукуацију амплитуде и фазе и дају квантитативан опис нама неопходног избора таласних једначина са граничним условима подесним за ласерски снап. Мада овај проблем у догледно време неће бити егзактно решен, овде је уложен рад да се приближе блиски проблеми. Држећи се тога, користимо се аргументима заснованим и на геометријској и на таласној оптици и упоредити теоријске резултате са расположивим експерименталним резултатима.

#### 2.5.5. Усвојени коефицијент слабљења

Да би ИЦ средства, у оквиру наоружања, могла успешно да се користе у домену својих крајњих могућности, остварујући при томе и друге тактичке предности, услови њихове примене подразумевају ведро небо и добру трансмисију атмосфере [5], тако да је позадина ведрога неба основна поставка код одређивања опсега вредности коефицијента слабљења у атмосфери.

У литератури су такође за потребе процене и утицаја слабљења у атмосфери [2, 3, 32], коришћени коефицијенти слабљења,  $\sigma < 0,1 \text{ km}^{-1}$  [5], (вариране вредности од  $0,02 \text{ km}^{-1}$  до  $0,08 \text{ km}^{-1}$ ; у одређеним условима атмосфера се може сматрати апсолутно транспарентном).

### 2.6. Формирање модела ИЦ зрачења циља авиона

Због одговарајуће геометријске симетрије и идентичних услова мерења у оквиру једног кадра, могуће је квалитетно пратити разлике температура одговарајуће упарених делова површина са којих се емитује парцијално ИЦ зрачење пара авиона [31], дубински померених неколико километара један од другог, који се могу видети под истим просторним углом. Оваквим поступком је могуће контролисати вредности истраживаних температура преко вредности параметра слабљења атмосфере за сваки појединачни кадар, који се анализира. Одговарајући кадрови добијени праћењем једног авиона се условно могу поредити упаривањем кадрова на одговарајућим даљинама који испуњавају услове методе приказане у Прилогу 2. Температура позадине се одређује мерењима.

Нумеричка процена енергија зрачења циљева у ваздуху и постојећих енергија зрачења у позадини је извршена применом Планковог закона зрачења [1, 2, 3, 6, 32], тако што је екситанса  $M_{e\lambda} = M_{e\lambda}^{ACT}$  изражена преко спектралне густине енергије зрачења црног тела,  $w_{e\lambda}$ :

$$M_{e\lambda} = M_{e\lambda}^{ACT} = \frac{c}{4} \cdot w_{e\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} \quad (5)$$

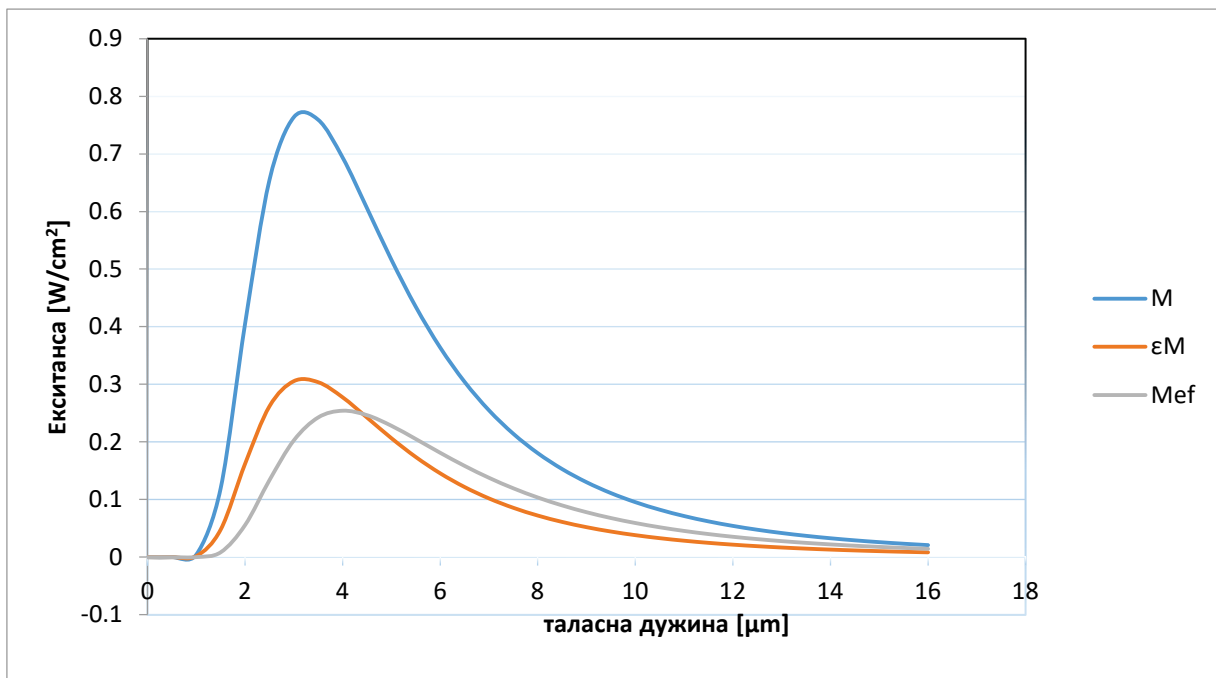
односно:

$$M_{e\lambda} = M_{e\lambda}^{CT} = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad (6)$$

где су  $c_1$  и  $c_2$  радијационе константе.

Планкова једначина приказује спектралну расподелу енергије зрачења АЦТ. Са порастом температуре расте вредност израчене енергије, а са њом и емисиона моћ у свим деловима спектра у различитом степену.

На сл. 14 је дат општи пример, који говори о природи извора зрачења. Уколико се промени вредност емисивности, интензитет зрачења ће опасти, али позиције максимума ће остати на истим вредностима таласних дужина. Ако један извор зрачења сивог тела енергетски еквивалентирамо другим извором АЦТ на одговарајућој температури, други извор ће имати максимум померен ка већим таласним дужинама.



Сл. 14 Приказ расподеле зрачења за извор одређене температуре без утицаја емисивности,  $M(T_1)$ , са утицајем емисивности,  $\epsilon M(T_1)$  и расподелом извора АЦТ еквивалентног укупног зрачења,  $\epsilon M(T_1) = M_{ef}(T_2)$ ,  $T_1 > T_2$ .

Када је интензиван извор зрачења довољно удаљен и тренутно видно поље под којим се види мање од просторне резолуције система којим се врши детекција, објекат ће бити у домену детекције, све док је укупна енергија, која долази из дела простора захваћеног просторном резолуцијом система у којој се налази циљ, већа од енергије прага осетљивости система за детекцију. Код процене домета детекције, у оваквим случајевима је оправдано да се еквивалентира укупна енергија система, иако долази до померања максимума енергије зрачења циља ка већим таласним дужинама. За формирање модела ИЦ зрачења циља, корисније је да се у оваквим ситуацијама укупна енергија која долази на детектор разматра као збир доприноса зрачења самог извора са његовим природним својствима и дела утицаја зрачења позадине која доспева на детектор (тренутно видно поље под којим се уочава циљ, мање је од тренутног видног поља детектора).

Када се авион посматра као ИЦ циљ, у најједноставнијем облику, разликују се два случаја посматрања:

- мрежноцентричним сензорским системом, и
- термовизијским нишанским уређајем.

Имајући у виду тактичку употребу авиона, њихове димензије, брзине и облике маневра, од интереса је да се овакви ИЦ циљеви детектују на што већој удаљености од ракетних система за дејство по оваквим циљевима на растојањима већим од  $20\text{ km}$ . Ако претпоставимо да је површина ИЦ циља авиона  $8\text{ m} \times 2\text{ m}$ , према Џонсоновом критеријуму за препознавање [1, 2, 3, 6, 20, 30, 38], онда нишански систем треба да има тренутно (непосредно) видно поље (IFOV)  $0,067\text{ mrad}$  за препознавање овог циља на растојању од  $20\text{ km}$ . Претпоставимо ли да захват ИЦ циља авиона треба да буде на  $30\text{ km}$ , долази се до строжијег захтева за просторном резолуцијом од  $0,044\text{ mrad}$ , што указује на потребу за изразито уским видним пољем, већим објективом и захтевнијом нишанском справом. Моделовањем концепта нишањења према Џонсоновом критеријуму за детекцију, један линијски пар овог циља би могао да се детектује на растојању од  $30\text{ km}$  са IFOV од  $0,133\text{ mrad}$ . У зависности од температурне осетљивости нишанске справе и IFOV од  $0,133\text{ mrad}$ , за критеријум детекције од пола линијског пара по ширини циља, крајњи домет детекције износио би  $60\text{ km}$ . Нишанска справа са IFOV од  $0,133\text{ mrad}$  има веће укупно видно поље и мање димензије објектива у односу на нишанску справу са IFOV од  $0,044\text{ mrad}$ . У прилог овом концепту, за детекцију на великим удаљеностима иде и врели млаз продуката сагоревања, као најдоминантнији извор ИЦ зрачења авиона.

Асиметрични мрежни термовизијски осматрачки систем пружа рационалну, растреситу, динамички покретљиву сензорску мрежу, која увек располаже са бар једним паром сензора за аквизицију одређеног броја авиона у оквиру својих зона претраживања [39,40]. У оваквим мрежама се могу примењивати осматрачки сензорски системи са IFOV од  $0,2\text{ mrad}$  и  $0,5\text{ mrad}$ . Мрежни концепт надзора омогућава класификацију и препознавање детектованих летелица на основу групног праћења њихових позиција у реалном времену у низу сукцесивних позиција.

Упрошћен модел ИЦ зрачења циља авиона за мрежноцентрични сензорски надзор представља површина  $2,4\text{ m} \times 1,2\text{ m}$  и температурна разлика од  $200\text{ }^\circ\text{C}$  између циља и позадине, посматрано из задње хемисфере у односу на правац кретања авиона, односно латерално  $10\text{ m} \times 1,2\text{ m}$  и температурном разликом од  $150\text{ }^\circ\text{C}$  између циља и позадине. Температура позадине се експериментално потврђује у зависности од локације, климатских, метеоролошких и дневно-ноћних услова.

Када се ИЦ циљ посматра стандардном термовизијском нишанском справом:

- за удаљеност субсоничног авиона од  $5\text{ km}$  до  $20\text{ km}$ , који се види унутар угла од  $\pm 45^\circ$  у односу на правац кретања авиона посматрано из задње хемисфере, упрошћен модел ИЦ циља авиона може да се представи површином  $2,4\text{ m} \times 1,2\text{ m}$  са температурном разликом до  $200\text{ }^\circ\text{C}$  између циља и позадине.
- за удаљеност мању од  $5\text{ km}$  субсоничног авиона, посматрано из задње хемисфере, упрошћен модел ИЦ циља авиона може да се представи површином  $2,4\text{ m} \times 1,2\text{ m}$  са температурном разликом до  $200\text{ }^\circ\text{C}$  између циља и позадине.
- за удаљеност мању од  $5\text{ km}$  субсоничног авиона, посматрано из предње хемисфере под углом мањим од  $30^\circ$  у односу на правац кретања авиона, упрошћен модел ИЦ циља авиона може да се представи величином површине од  $8\text{ m} \times 2\text{ m}$  са температурном разликом до  $10\text{ }^\circ\text{C}$  између циља и позадине.
- за суперсоничне авионе са  $v > 1,24\text{ M}$ , могуће је детектовати његово ИЦ зрачење и преко загрејаних металних површина  $8\text{ m} \times 2\text{ m}$  са температуром разликом од  $16\text{ }^\circ\text{C}$  између циља и позадине и/ или преко млаза продуката сагоревања са површином



2,4 m x 1,2 m и температурном разликом до 300 °C између циља и позадине, до удаљености ИЦ циља од 50 km.

Минимално ИЦ зрачење авиона се може проценити и на основу минималне температуре током рада мотора и у ситуацији ваздушног реланта (критеријум за ИЦ главе ракете). Према мереним резултатима и подацима из литературе, температура која одговара АЦТ за минималну радијансу ИЦ зрачења циља се може окарактерисати температуром на пресеку млазнице од 300 °C. За површину попречног пресека млазнице, усваја се површина 0,366 m<sup>2</sup> (0,6 m x 0,6 m за квадратни облик мете или за кружни облик са полупречником  $r = 0,341$  m, односно пречником  $D = 0,68$  m). Такође, је разматрана увећана површина попречног пресека за 14,75% и за једну и за две млазнице (0,42 m<sup>2</sup> односно 0,84 m<sup>2</sup>).

Као и код осматрачког мрежноцентричног сензорског система, температура позадине се експериментално потврђује у зависности од локације, климомеханичких, метеоролошких и дневно ноћних услова.

## 2.7. Резиме

Приказом различитих варијанти борбеног поретка лета авиона, указано је да се авиони приликом извршавања својих задатака, појављују на небу као појединачни циљеви у пару или групи. У смислу тактичке примене летелица, анализирани су извори зрачења позадине чистог неба или са 3/8 облачношћу укључујући и мерења и анализу статистичке обраде података на узорку радијансе летњег неба у условима наше атмосфере. Мерењима је потврђена тачност података из литературе о изворима ИЦ зрачења авиона, као и оправданост да се модели ИЦ зрачења авиона заснивају на њиховим доминантним изворима зрачења. Описано је слабљење ИЦ зрачења током простирања кроз атмосферу са освртом на MWIR. Дато је неколико модела ИЦ зрачења циљева авиона у односу на карактеристичне правце налета и начине посматрања (мрежно – осматрачки) или нишански). Значајан рад у овој области се односи на истраживања материјала и техника за потискивање ИЦ зрачења летелица. По питању оплате и других материјала за њихове конструкције, уводе се лакши материјали са већом механичком отпорношћу и мањом емисијом ИЦ зрачења са површина летелица. Највећи допринос се очекује у потискивању топлотног зрачења мотора.

### 3. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА IRST

IRST системи представљају функционално дефинисану класу ИЦ система са циљем да поуздано детектују, лоцирају и прате ИЦ емисију објеката и циљева у присутном зрачењу позадине и других сметњи. Провера лажног аларма код IRST, обично не зависи од процене човека, јер користи аутоматску обраду података у смислу да ли извор постоји као реалан циљ или клатер. IRST системи раде у спектралном опсегу од  $1 \mu m$  до  $15 \mu m$ , са посебним наглашавањем опсега дефинисаних атмосферским прозорима од  $3 \mu m$  до  $5 \mu m$  и од  $8 \mu m$  до  $12 \mu m$ .

Ови термовизијски системи су превасходно намењени за војне примене и интегришу се преко јединственог командно информационог система (КИС-а) оружаних снага државе. У анализи страних решења анализирани су КИС Финске [39], КИС Италије [40], КИС САД (консултовани су C4ISR/AFLockheedMartin-a, 2002. И C3I систем САД)

Специјалне примене IRST система укључују сателитски надзор, ваздушно осматрање и праћење више променљивих циљева у односу на позадину неба, земље и мора (водених површина). Специјалне примене укључују земаљске и бродске системе за детекцију авиона и ракета у односу на позадину клатера. Најспецифичније примене војне оријентације укључују одбрану брода, авиона и земаљских циљева од претњи дејствима непријатељских ракета или авионских платформи, генерално посматрано, са великих висина или се примене односе на сателитски надзор, препознавање и рано упозоравање од летелица у ниском лету и крстарећих ракета.

Генерална линија одвајања ИРСТ система од других ИЦ система је висока осетљивост, већи домет на релативно великим даљинама у односу на најчешће ваздушне тачкасте циљеве и широку искоришћеност простора, времена и спектралне обраде сигнала за елиминисање клатера и смањења односа лажног аларма.

#### 3.1. Концепт модела IRST система

Уопштени концепт модела IRST система приказан на сл.15 састоји се од следећих подсклопова: оптички систем са системом за скенирање, детектор система са системом за хлађење, електроника за обраду слике и рачунар за обраду података, њихово преусмеравање и управљање системом. Од оперативних захтева, који су интересантни за разматрани концепт су: велико видно поље  $360^\circ \times 40^\circ$ , величине IFOV од  $0,5 mrad$  и  $0,2 mrad$ , време претраживања видног поља од  $1 s$  до  $2 s$ , MWIR, висока температурна осетљивост, термовизијска слика високе резолуције, 2 бајта по пикселу, откривање покретних, квази груписаних, ваздушних циљева у сложеној позадини са вероватноћом бољом од 0,95 и потискивање лажног аларма (False Alarm - FA).



Сл. 15 Приказ Блок дијаграм система IRST

### 3.1.1. Оптички систем са системом за скенирање

Оптичким системом се сакупља емитована енергија из ИЦ сцене на детектор посредством скенера. Начин конструкције оптичког система зависи од спектралног опсега рада и намене самих термовизијских уређаја. Спектрални опсег рада се дефинише преко спектралног опсега осетљивости детектора или на основу захтева за спектрални опсег осетљивости термовизијског система.

Скенирајући телескоп је пројектован да прикаже слику примљеног зрачења ИЦ сцене око оптичке осе посматрања у обе или некој од спектралних области рада термовизијских уређаја и система [1, 3].

Висок индекс преламања код материјала за израду оптичких елемената захтева израду танких антирефлексионих слојева, како би се смањили рефлексioni губици. Тражени квалитет и карактеристике антирефлексионих слојева обезбеђује се током међуфазне контроле током производње уређаја и тако су на имплицитан начин садржани у захтеву за спектрални опсег и трансмисивност оптичког система. Поред антирефлексионих слојева, на оптичке материјале за израду оптичких елемената наносе се и танки тврди заштитни слојеви због мекоће оптичких материјала који се користе. Приликом избора оптичких материјала, води се рачуна да имају спектрални опсег сагласан спектралном опсегу детектора уз што бољу трансмисију кроз сам материјал [1, 3, 41].

### 3.1.2. Детектор система са системом за хлађење

Конверзију енергије инфрацрвеног зрачења у електрични сигнал обезбеђује детектор, те самим тим представља кључно место сваког термовизијског уређаја. Код IRST система, детектор је по структури више елементни, формиран у облику детекторског низа или

матрице детектора. За MWIR област се израђује у InSb материјалу. Ради на криогеним температурама са затвореним Стирлинговим (Stirling) циклусом.

Технологијом израде детектора, која је постала је сложенија, дефинисани су: димензија детектора, начин читавања сигнала, електрична кола са одговарајућом технологијом израде, криогена околина за рад детектора и сложен оптички систем за скенирање. Криогена температура је неопходна ради издвајања тренутне промене концентрације електрона (шупљина) услед упадног зрачења од основне структуре материјала, како не би дошло до генерисања носилаца случајном вибрацијом решетке у концентрацији, која би достигала промену концентрације настале услед упадног зрачења (користан сигнал) [1,3,41].

### 3.1.3. Електроника за обраду слике

Једна од две основне функције, коју обавља блок електронике код термовизијских уређаја је кондицирање (предпојачавачи и појачавачи) и обрада сигнала детекторских елемената у повољан облик за приказивање на дисплеју. Обрада сигнала подразумева трансформацију сигнала по амплитуди и временском формату.

Друга функција, коју обавља блок електронике је обрада информације која садржи форматиран сигнал ради побољшања квалитета слике или аутоматске селекције информација од значаја за изабран начин приказивања односно употребе [3, 41].

Током електронске обраде електричног сигнала, битна су два процеса контроле сигнала која утичу на изглед термовизијске слике [1]:

- температурни ниво - појачање (сјајност), којим се потискује позадина ради лакшег уочавања малих разлика контраста у сцени одузимањем једног нивоа једносмерног референтног сигнала од детекторског сигнала и
- температурни прозор - контраст, који обезбеђује опсег вредности напонског сигнала по једном нивоу сивог кога дисплеј може приказати.

### 3.1.4. Рачунар

Рачунар служи за подршку рада IRST система у реалном времену:

- као контролно - управљачка јединица система (функције контроле промене нивоа сигнала прага детекције, потискивање FA, праћење),
- за преформатирање и усмеравање векторских података у оквиру сензорског дела мрежноцентричног система,
- анализу података у реалном времену (сопственог система и у оквиру триангулације упаривањем података са одговарајућим системом),
- приказивање синтетичке слике.

Показивач и друге излазне функције, нису од утицаја на преносне модуларне карактеристике код IRST система. [41-43]

## 3.2. Особине преносне и температурне резолуције IRST система

### 3.2.1. Модуларна преносна функција

Концепт модуларних преносних функција (*MTF* - Modulation Transfer Function) IRST се разликује у односу на FLIR из следећих разлога [2,42,43]:

- човек, као пост филтер, пост обрада сигнала и фактор одлучивања је искључен;

- комплети подсистема који доприносе преносу, уобличавању и прилагођавању издвојеног контраста људском оку, као пост сензору, је искључен;
- иза детектора постоји изван блок програмабилне електронике са одређеним филтерима и предпојачавачима и другим колима за обраду слике која се контролише и којом се управља преко надређеног рачунара. Посматрано од система ка сцени, функције рачунара се односе: на контролне и управљачке сигнале ка блоку програмабилне електронике за обраду сигнала, на размену података између рачунара и програмабилне електронике за обраду сингла, на функције прекорачења прага, на алгоритме за праћење, анализу, процену и одлучивање о претњи/ лажном аларму;
- од рачунара ка спољашњости (више се не налази у петљи подсистема) преносе се обрађени подаци одговарајућег формата ка дефинисаним корисницима сигнала и/или се приказују на показивачу као синтетичка слика.

Овде се  $MTF$  систем односи на оптички систем са системом за скенирање, детектор система са системом за хлађење, електронику за обраду слике.

$$MTF_{sys} = MTF_{opt} \cdot MTF_{kre} \cdot MTF_{detp} \cdot MTF_{dett} \cdot MTF_{el}, \quad (7)$$

где су са  $MTF$  означене модулатионе трансфер функције, а са индексима:  $sys$  – система,  $opt$  – оптике,  $kre$  – кретања,  $detp$  – детектора (просторна),  $dett$  – детектора (временска), временске константе,  $el$  – електронике.

Опис парцијалних  $MTF$  груписан и приказан је испод у складу са литературом [4,47]:

а) Модулатиона трансфер функција оптике:

$$MTF_{opt} = MTF_{dif} \cdot MTF_{aber} \cdot MTF_{defo}, \quad (8)$$

где су ознаке индекса:  $dif$  – дифракција,  $aber$  – аберација,  $defo$  – дефокусирања.

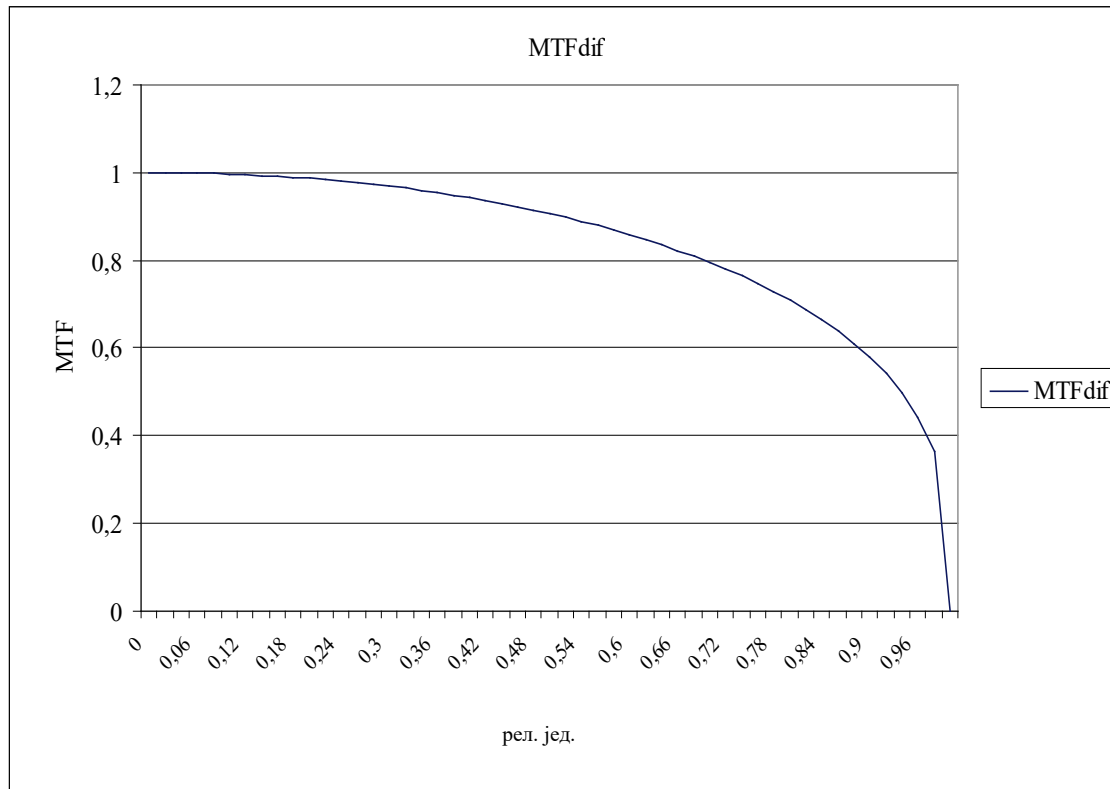
За потребе полазног модела разматраће се  $MTF_{dif}$  и  $MTF_{aber}$ :

$$MTF_{dif} = \frac{2}{\pi} \cdot \arccos \left[ \left( \frac{f_x}{f_{oco}} \right) - \left( \frac{f_x}{f_{oco}} \right) \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{f_x}{f_{oco}} \right)^2} \right], \quad (9)$$

где је  $f_x$  просторна учестаност у правцу скенирања, а  $f_{oco}$  просторна гранична фреквенција.

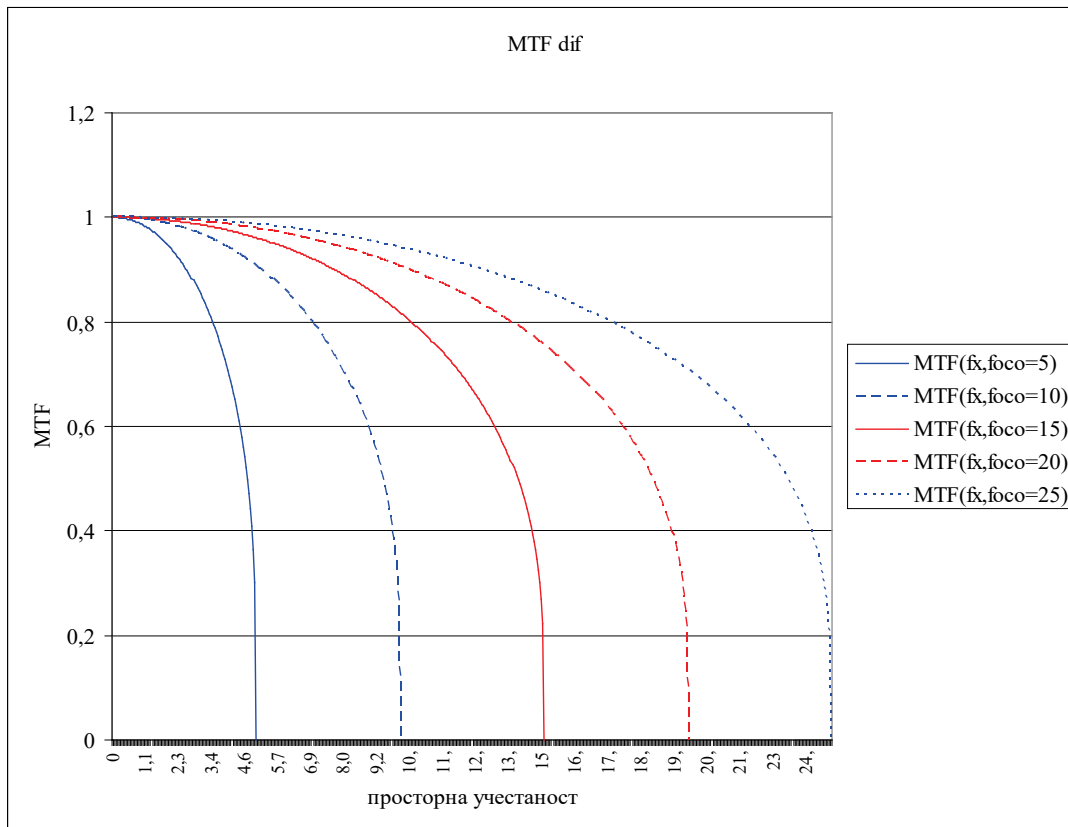
$f_{oco} = D_o / \lambda$ ,  $D_o$  величина апертуре,  $\lambda$  таласна дужина на средини посматраног таласног опсега

На сл. 16 приказана је промена  $MTF_{dif}$  у зависности од релативне промене просторне учестаности, на којој се јасно види облик криве.



Сл.16  $MTF_{dif}$  у односу на релативну промену просторне учестаности

На сл. 17 је приказана промена  $MTF_{dif}$  у зависности од просторне учестаности за различите просторне граничне фреквенције  $f_{oco}$ .

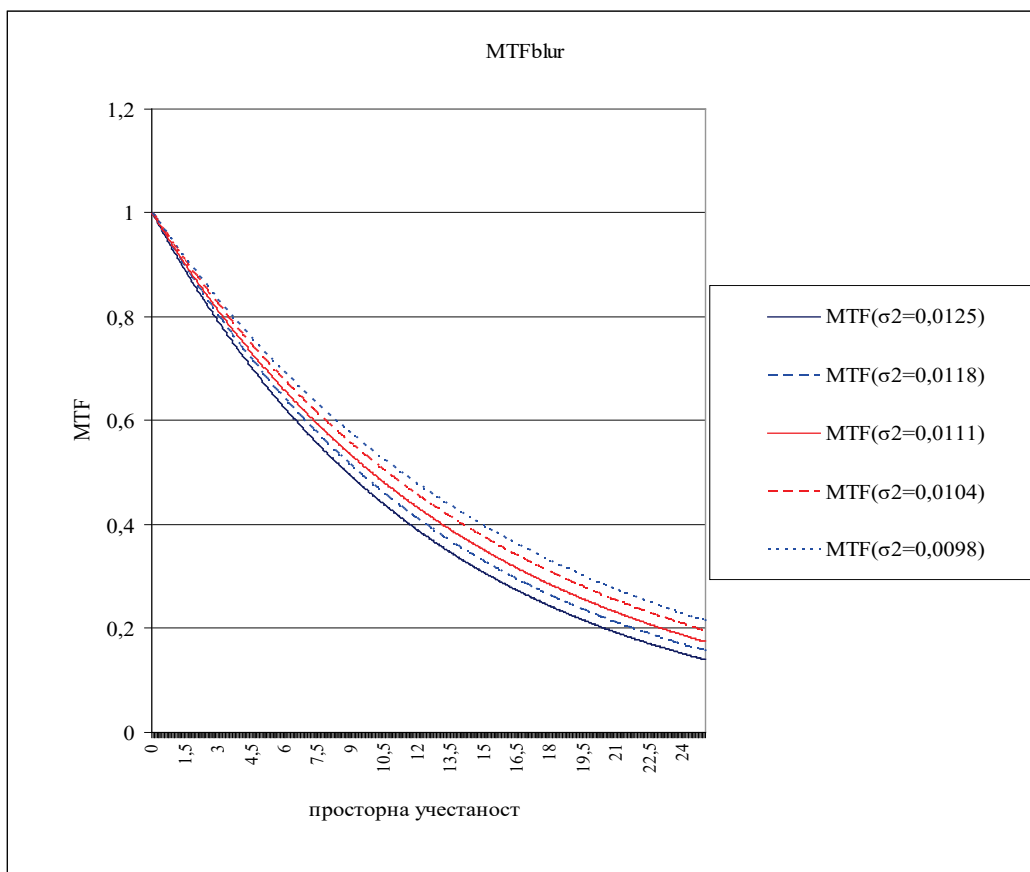


Сл.17 Промена  $MTF_{dif}$  у односу на просторну учестаност за различите просторне граничне фреквенције

$$MTF_{aber} = \exp(-2\pi^2 \sigma_{det}^2 f_x^2), \tag{10}$$

где је  $\sigma_{det}$  димензија дијаметра блура.

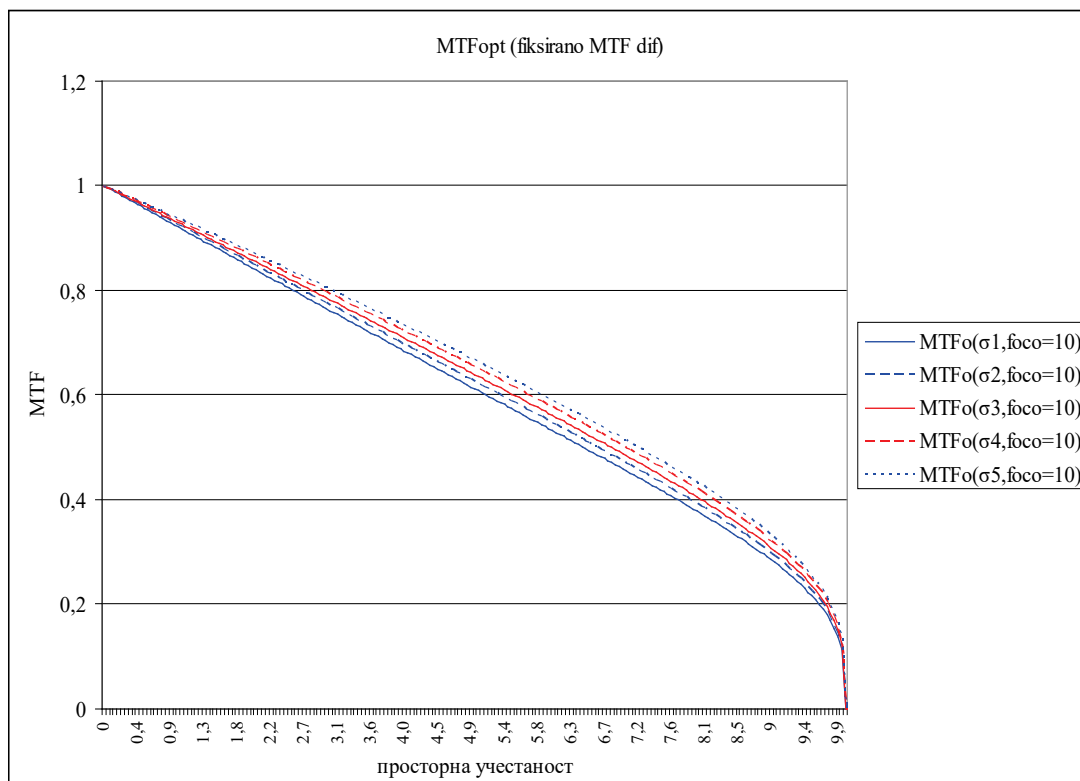
На сл. 18 је приказана промена  $MTF_{aber}$  у зависности од просторне учестаности за различите димензија дијаметра блура  $\sigma_{det}$ .



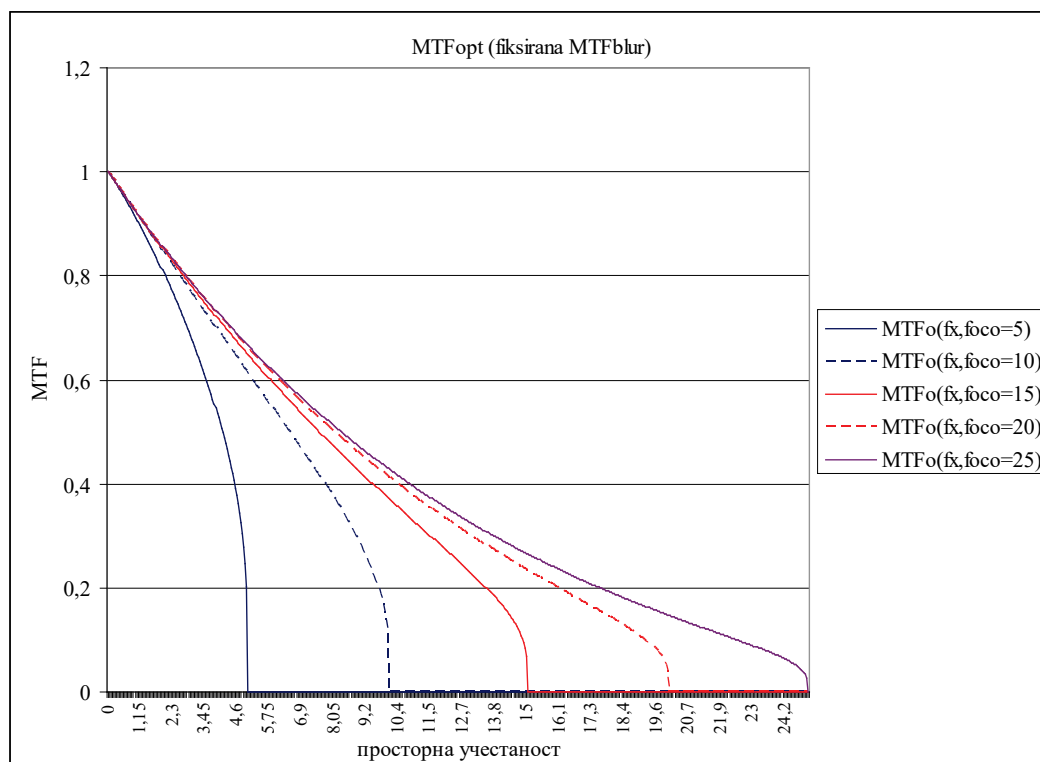
Сл.18 Промена  $MTF_{aber}$  у односу на просторну учестаност за различите димензија дијаметра блура

На сл. 19 и 20, приказане су  $MTF_{opt}$ , тако што је у првом случају разматрана  $MTF_{dif}$  за једну просторну граничну фреквенцију, а вариране су вредности  $MTF_{aber}$  за различите димензија дијаметра блура, док је у другом случају разматрана  $MTF_{aber}$  за једну димензију дијаметра блура, а вариране су вредности  $MTF_{dif}$  за различите просторне граничне фреквенције.





Сл.19 Промена  $MTF_{opt}$  у односу на просторну учестаност за фиксирану  $MTF_{dif}$  и  $MTF_{aber}$  за различите димензија дијаметра блура



Сл.20 Промена  $MTF_{opt}$  у односу на просторну учестаност за фиксирану  $MTF_{aber}$  и  $MTF_{dif}$  за различите просторне граничне фреквенције

б) Модулациона трансфер функција кретања:

$$MTF_{kre} = MTF_{lin} \cdot MTF_{sin} \cdot MTF_{asp}, \quad (11)$$

где су ознаке индекса: *lin* – линеарно кретање, *sin* – синусоидално кретање, *asp* – апериодични случајни померај.

$$MTF_{lin} = \frac{\sin(\pi a_l f_x)}{\pi a_l f_x}, \quad (12)$$

где је  $a_l$  угаоно растојање помераја,  $a_l = v_r t_{int}$  и  $v_r$  релативна угаона брзина између сензора и мете у хоризонталном правцу,  $t_{int}$  време интеграције.

$$MTF_{sin} = J_0(2a_s \pi f_x), \quad (13)$$

где амплитуда осцилаторног кретања  $a_s$  представља једну половину амплитуде блура слике. Ако се MTF прати до  $f_{dco}$  (детекторске граничне фреквенције), може се увести апроксимација  $a_s \leq DAS$  (просторни угао који одговара односу површине детектора и ефективне жижне даљине). Ако извршимо смену  $x = 2a_s \pi f_x$  и за  $x \leq 3$ , Беселова функција прве врсте се може апроксимирати полиномом:

$$J_0(x) = 1 - \frac{x^2}{4} + \frac{x^4}{64} - \frac{x^6}{2048} + \frac{x^8}{147456} \quad (14)$$

$$MTF_{asp} = \exp(-2\pi^2 \sigma_r^2 f_x), \quad (15)$$

где је  $\sigma_r$  угаона димензија случајног помераја.

в) Модулациона трансфер функција детектора:

– једноструки паралелни детекторски низ:

$$MTF_{jdet} = MTF_{detp} \cdot MTF_{dett} \quad (16)$$

$$MTF_{detp} = \text{sinc}(\pi \alpha f_x), \quad (17)$$

где је  $\alpha$  тренутно видно поље

$$MTF_{dett} = \text{sinc}(1 + (2\pi \tau_d f_x)^2)^{-1/2}, \quad (18)$$

где је  $\tau_d$  временска електронска константа детектора

– TDI детекторски низ:

$$MTF_{detpTDI} = \text{sinc}(\pi N_{TDI} \alpha_{err} f_x), \quad (19)$$

где је  $N_{TDI}$  број TDI елемената у TDI режиму, а  $\alpha_{err}$  ефективна угаона грешка [4, 47] центрирања одабирања

– SPRITE детекторски низ:

$$MTF_{detp} = MTF_{ele} \cdot MTF_{diff}, \quad (20)$$

где су ознаке индекса: *ele* – детекторски елемент, *diff* – дифузија детектора.

$$MTF_{ele} = \text{sinc}(\pi L_{rd} f_x), \quad (21)$$

где је  $L_{rd}$  дужина читавања у милирадијанима и за највећи број SPRITE детектора дужина читавања је  $50 \mu m$ , (у *mrad* је то  $50 \mu m /$  ефективна жижна даљина).

$$MTF_{diff} = (1 + (2\pi Q f_x)^2)^{-1/2}, \quad (22)$$

где је  $Q$  дужина амбиполарне дифузије и за највећи број SPRITE детектора дужина читавања је  $25 \mu m$ , а (у *mrad* је то  $50 \mu m /$  ефективна жижна даљина).

– нехлађени детекторски низ:

$$MTF_{detp} = MTF_{detn} \cdot MTF_{ter} \cdot MTF_{elk}, \quad (23)$$

где су ознаке индекса: *detn* – нехлађени детектор, *ter* – термална компонента временске константе, *elk* – електрична компонента временске константе.

$$MTF_{deln} = \text{sinc}(\pi \alpha f_x), \quad (24)$$

где је  $\alpha$  тренутно видно поље, као што је то у случају једноструког паралелног детекторског низа

$$MTF_{ter} = (1 + (2\pi \tau_t f_e)^2)^{-1/2}, \quad (25)$$

где је  $\tau_t$  однос топлотног капацитета и термалне проводности, а  $f_e$  представља временску фреквенцију и повезана је са просторном фреквенцијом преко брзине скенирања,  $f_e = v f_x$

$$MTF_{elk} = (1 + (2\pi\tau_e f_e)^2)^{-1/2}, \quad (26)$$

где је  $\tau_e$  електрична временска константа детектора

– фокална матрица детектора:

$$MTF_{detp} = MTF_{detm} \cdot MTF_{pre}, \quad (27)$$

где су ознаке индекса: *detm* – детектор FPA, *pre* – пренос.

$$MTF_{detm} = sinc(\pi\alpha f_i f_x), \quad (28)$$

где је  $\alpha$  тренутно видно поље дефинисано у односу на растојање центара детектора (димензија једне ћелије), а  $f_i$  фактор испуњења матрице

$$MTF_{pre} = exp(-N_{pre}(1-\epsilon)[1 - cos(2\pi\alpha f_x / f_{ts})]), \quad (29)$$

где је  $N_{pre}$  тотални број набоја наелектрисања које се преноси од детектора до излазног појачавача,  $f_{ts}$  просторна фреквенција „клока“, а  $\epsilon$  ефикасност преноса наелектрисања

### г) Модулациона трансфер функција електронике:

Преносна функција електронике, предпојачавача и филтера, описана је на следећи начин:

$$MTF_{elk} = (1 + (2\pi\tau_e f_e)^2)^{-1/2}, \quad (30)$$

где је  $f_{ge}$  [Hz] гранична учестаност електронике (тачка 3-dB RC - филтера).

### 3.2.2. Осетљивост

Осетљивост система карактеришу величине, као што су: шум еквивалентан температурној разлици (Noise Equivalent Temperature Diference - *NETD*), одзивност детектора, код система малих низова - на пример специфична детективност, а код система великих низова - на пример то су фотонски шум, струја мрака (тамне струје), фиксни шум узорка, мултиплексер фокалне матрице и слично.

*NETD* строго зависи од температуре, која преовладава у сцени и преставља меру температурне осетљивости топлотног зрачења у ИЦ делу ЕМ спектра. Одговара сигналу температуре упадног зрачења који је еквивалентан унутрашњем шуму детектора, тако да је однос сигнал/ шум једнак јединици. Најсадржајније обједињује параметре који утичу на осетљивост и може се сматрати значајном мером осетљивости система. [1,2,3,17-19,41-45]. Уколико је однос интензитета и температуре добро дефинисан дуж спектралног опсега, као за случај црног тела, онда је *NETD* практично скалирана вредност са NEP (Noise-Equivalent Power - *NEP*). Ако је детектор ограничен Џонсоновим шумом, онда се *NETD* може смањити повећањем времена интеграције.

*NETD* је важан прорачунски параметар за пројектовање и анализу термовизијских уређаја. Не узима у обзир карактеристике целокупне електронике и нема зависност од просторне учестаности, па се не може узети за поуздану меру квалитета целог система. Може се изразити [16]:

$$NETD = \frac{2\sqrt{\pi} \cdot (F^\#)^2}{\sqrt{A_D} \cdot \tau_o \cdot \tau_a \cdot D_{\lambda_p}^* \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial M_{e\lambda} \cdot D^*(\lambda)}{\partial T} \cdot D_{\lambda_p}^* d\lambda} \cdot \sqrt{\frac{N_{ps} \cdot F_s \cdot \eta}{n_s \cdot n_p \cdot \rho \cdot p l}}, \quad (31)$$

где је:  $D^*(\lambda)$  специфична детективност,  $D_{\lambda_p}^*$  вршна детективност,  $N_{ps}$  број инфрацрвених пиксела у слици,  $F^\#$  -  $F$  број (однос жишне даљине и пречника објектива,

$F^{\#} = \frac{f_o}{D_{tu}} = \frac{1}{2 \cdot NA}$ ),  $M_{e\lambda}$  спектрална екситанса,  $F_s$  учестаност понављања слика,  $\tau_o$  трансмисија оптике,  $\tau_a$  трансмисија атмосфере,  $A_D$  површина детекторског елемента [ $cm^2$ ],  $n_p$  број детектора везаних паралелно,  $n_s$  број детектора везаних серијски,  $\rho$  коефицијент ефикасности скенера,  $\eta$  коефицијент уметања линија (interlace) и  $p_l$  коефицијент преклапања линија.

### 3.2.3. Системске карактеристике модела

У системске карактеристике модела спадају: однос сигнал шум ( $S/N$ ), процена домета детекције ( $R^D$ ), минимална разложива температурна разлика (Minimal Resolvable Temperature Diference -  $MRTD$ ), минимална разлика температуре, која са може детектовати (Minimal Detectable Temperature Diference -  $MDTD$ ) и друге. За потребе модела су разматране  $MRTD$  и  $MDTD$ .

$MRTD$  обједињује параметре просторне и температурне резолуције и омогућава процену домета уређаја за детекцију и препознавање реалних циљева у датим атмосферским условима. То је основни и најважнији показатељ квалитета термовизијског уређаја. Изражава се у  $K$  у односу на одговарајуће просторне учестаности тест слике.  $MRTD$  представља најмању разложиву разлику температуре неопходну за разлагање стандардне слике за препознавање узорка четири траке (односно 3,5 линијска пара) са односом 7:1 гледано вертикално у односу на скенирања на улазној апертури, коју посматрач може да уочи.  $MRTD$  је функција просторне фреквенције трака и може се оценити одмах по израчунавању  $MTF_{sys}$  и  $NETD$  [1, 2, 3, 5, 16, 41-48].

$MRTD$  се описује зависношћу [5]:

$$MRTD(f_x) = \frac{3.142 NETD}{MTF_{sys}(f_x)} \cdot \sqrt{\frac{1}{t_e \cdot F_s}}, \quad (32)$$

где је  $t_e$  време интеграције система.

$MDTD$  се дефинише за унапред познате просторне учестаности. Мери се уз коришћење стандардне тест слике за детекцију, тако да димензија слике одговара траженој просторној учестаности.  $MDTD$  представља минимум температурне разлике између квадратне или кружне мете и неопходне позадине, како би посматрач могао да опази извор коришћењем уређаја.  $MDTD$  је таква функција величине мете, да представља праг моћи детективности система [1, 2, 3, 5, 41-48].

$MDTD$  се дефинише са [3]:

$$MDTD(f_x) = 2,145 \cdot MTF_{sys}(f_x) \cdot MRTD(f_x). \quad (33)$$

## 3.3. Резиме

Главне предности које издвајају IRST у односу на друге пасивне ИЦ системе су детекција и праћење циљева на великим удаљеностима, имуност на RF локацију сензора, имуност на дејство противрадарских ракета и панорамско претраживање. Описује се системским карактеристикама модела, које се састоје од модуларне преносне функције система, шума еквивалентног температурној разлици, односом сигнал/ шум, минималне разложиве температурне разлике, као и минималне температурне разлике, која се може детектовати.

#### 4. ПРОСТОРНО-ВРЕМЕНСКО ПРЕДФИЛТРИРАЊЕ

Даљинско праћење и препознавање различитих објеката у дефинисаном простору представља комплексан мултидисциплинарни проблем. У зависности од одабране сцене која се истражује (величина и динамика кретања објекта од интереса, времена потребног за обраду података и процену) и од изабраног оптоелектронског система, постоји више решења [1-5]. За теренски рад и пасивно даљинско откривање најприкладнија је примена инфрацрвених оптоелектронских уређаја [49].

Класични триангулациони поступци одређивања позиција подразумевају укључивање прорачуна о припадности објеката одређеној области у простору, где је неопходно утврдити пресеке детектованих делова простора у којима се објекат налази. Уколико би се примењивале операције за обраду дигиталних фотографија у анализи кретања, који су засновани на логичким и скуповним операцијама, могуће је извршити предпроцесирање података за триангулацију и утврдити много мање колекције података за поступак утврђивања просторних пресека детектованих објеката добијених са различитих уређаја са формирањем слике (триангулациони поступак).

У претходном делу рада, разматрана је позадина ИЦ сигнатуре летелица и описан модел појединачног циља. Издвајање података о детекцији групе циљева у разматраној позадини у широко захваћеном простору  $360^\circ \times 40^\circ$  подразумева:

- Праћење и поређење информација из добијених записа о флукуацијама неба из суседних кадрова слике.
- Праћење и поређење информација из добијених записа о групама летелица из суседних кадрова слике.

За различите висине, брзине, маневре и просторну оријентацију једног авиона, у односу на термовизијску камеру којом се прати њено кретање, у области од граничног домета детекције до блиских удаљености од камере у складу са захтевима система који се пројектује, процењена је мера просторног одступања летелице у односу на суседне кадрове слике. Ова одступања су усклађена очекиваним одступањима код система IRST.

Група летелица, уопштено, које се детектују као јединствен распоред тачака у простору у односу на суседне кадрове слике, доста добро чува њихов међусобни геометријски однос, дајући индицију њиховог међусобног релативног помераја и даљих трендова промене позиција који су предвидљиви, тако практично представља стабилну групу тачака у динамичкој сцени.

Постоји доста радова са различитим приступом за откривање и праћење тачкастих циљева, тродимензионалну визуелизацију, одговарајуће филтрирање (филтер брзине, тест секвенцијалне хипотезе, динамичко програмирање, [50]), корелација високог реда [51], wavelet трансформације [52, 53], критеријум кодираног суседства [54], итд. Највећи резултати су постигнути у области детекције засноване на таласним трансформацијама, као и изразито добрим резултатима у израчунавању и чувању података у оквиру сложене и робусне електронике. Други поступци, као што је то метода алгоритама заснованим на суседствима имају ограничења у откривању ниско контрастних циљева. Модификовани алгоритам детекције на основу анализе кретања, треба да открива замрљани тачкасти циљ услед великог кретања из кадра у кадар. У литератури се могу наћи наводи другачијег приступа, као што су то: алгоритми за откривање тачкастих циљева комбиновањем одговарајућих филтера [55], аналитичке методе откривања тачкастог циља [56], алгоритми за праћење тачкастих циљева хиперспектралним секвенцама слика [57], метод детекције

малих ИЦ циљева, базиран на визуелној теорији Болеанових мапа [58], као и алгоритми за пасивно одређивање удаљености циља од сензорске станице [59].

У тези је представљен модел заснован на логичким и скуповним операцијама над дефинисаним областима суседства унутар текућег кадра и неколико наредних. Овај модел успешно решава проблем лажног аларма и код ниско контрастних циљева.

#### 4.1. Математички модел групе циљева

Формирајмо просторни модел распореда летелица над одређеним делом неке територије. Ћелије сензора су умрежене у зависности од концепције КИС-а. Унутар једне ћелије, структура и хијерархија повезивања су специфични за сваки одређени модел. Свакој ћелији се додељује одређена област неба, која ће се посматрати, стога ће се добити расподела летећих објеката. За сваку ћелију и његову област, дефинисани су следећи вектори:

- Парцијални скуп  $C_p$  летелица, описаних векторима  $C_{pi}$ , које се надзиру над претпостављеном ћелијом у једном прецизно дефинисаном делу простора [60-64]:

$$C_p = \{C_{p1}(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1}, t_1), C_{p2}(x_{p2}, y_{p2}, z_{p2}, t_2), \dots, C_{pk}(x_{pk}, y_{pk}, z_{pk}, t_k)\}, \quad (34)$$

где је  $k$  број летелица у парцијалном скупу. Скуп  $C_p$  је представљен низом од  $k$  вектора који су дефинисани Декартовим координатама  $x_{pi}, y_{pi}, z_{pi}$  ( $i=1,2,\dots,k$ ) захваћених летелица у тренутку  $t_i$  изнад разматраног дела простора и тренутком  $t_i$ ,  $p$  је број парцијалних скупова, који одговара укупном броју ћелија унутар мреже просторног распореда пасивних сензора за надзор ( $p=1,2,\dots,l$ ). Тако је укупан број свих захваћених летелица над целокупним простором од интереса:

$$C = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_l, \quad (35)$$

- Скупови пројектованих слика парцијалног скупа летелица унутар разматране ћелије су:

$$S_p = \{C_{pp1}(\alpha_{pi1}, \beta_{pi1}, t_i) P_{p1}, C_{pp2}(\alpha_{pi2}, \beta_{pi2}, t_i) P_{p2}, \dots, C_{ppk}(\alpha_{pik}, \beta_{pik}, t_i) P_{pk}\}, \quad (36)$$

где је  $S_p$  ознака за скупове пројектованих слика; индекс  $p$  има исто значење као индекс  $p$  у изразу (34);  $P_{pj}$  ( $j=1,2,\dots,k$ ) је вероватноћа присуства одређене летелице у слици;  $P_{pj}$  је једнако 1 за присутну летелицу;  $P_{pj}$  је једнако 0 за заклоњену летелицу или потиснуту услед слабљења сигнала у атмосфери;  $i=a,1,2$ , где индекс  $a$  означава главну сензорску станицу унутар наведене ћелије (у мрежи, станице су укључене у више ћелија и у одређеним ћелијама имају улогу главне, а у другим улогу помоћне сензорске станице), а индекси 1 и 2 означавају помоћне сензорске станице;  $C_{pp1}, \dots, C_{ppk}$  представља пројекцију векторског низа парцијалних скупа од  $k$  летелица захваћених над дефинисаним простором разматране ћелије;  $\alpha$  означава вредност азимута, а  $\beta$  вредност елевације, док први индекс  $p$  уз  $\alpha$  и  $\beta$  означава парцијални скуп, други означава скуп пројектованих слика за одговарајућу сензорску станицу  $i=a,1,2$ , а трећи нумерацију летелице у парцијалном скупу.

Сензори раде синхронно и претражују простор у смеру раста азимута. Издвојени сигнали детектованих летелица нумеришу се редом од виших вредности параметра елевације ка нижим за одговарајућу вредност азимута, такође у смеру раста азимута.

Очигледно је да нумерација елемената скупа  $S_p$  неће једнозначно одговарати нумерацији у скуповима  $S_i$ , нити ће нумерација унутар једног од скупова  $S_i$  одговарати нумерацији нека друга два скупа  $S_i$ . То представља један од проблема у процесу просторне триангулације. Услед стохастичких промена у атмосфери немогуће је на једнозначан начин пратити локалне промене контраста од сегмента до сегмента слике. Поред ове неодређености, постоји и неодређеност у детекцији (вероватноћа детекције већа од 50%) веома удаљених објеката, која указује на присуство лажног сигнала (сигнала лажног аларма).

Услед сигнала лажног аларма у слици сваке сензорске станице, појавиће се скуп лажно детектованих сигнала (лажно присуство летелица у разматраној сцени унутар једног кадра пасивног система са формирањем слике):

$$L_p = \{L_{i1}(\alpha_{i1}, \beta_{i1}, t_i), L_{i2}(\alpha_{i2}, \beta_{i2}, t_i), \dots, L_{iq}(\alpha_{iq}, \beta_{iq}, t_i)\}, \quad (37)$$

где  $L_p$  представља скуп лажно детектованих летелица, индекс уз  $L$  означава на коју се сензорску станицу односи скуп лажно детектованих летелица,  $i=a, 1, 2$ ;  $L_{ij}$  представља један елемент скупа лажно детектованих летелица, где  $j=1, 2, \dots, q$  у тренутку  $t_i$  изнад разматраног дела простора; у истом смислу су и индекси уз вредности азимута и елевације,  $\alpha$  и  $\beta$ , лажно детектованих летелица.

Генерално, скуп пројектованих слика парцијалног скупа летелица за сваки од 3 сензора у разматраној ћелији, укључујући и генерисање лажних сигнала, има следећи облик:

$$S_p = \{L_{i1}(\alpha_{i1}, \beta_{i1}, t_i), \dots, L_{iq}(\alpha_{iq}, \beta_{iq}, t_i), C_{pp1}(\alpha_{pi1}, \beta_{pi1}, t_i) P_{i1}, \dots, C_{ppk}(\alpha_{pik}, \beta_{pik}, t_i) P_{ik}\}. \quad (38)$$

У процесу просторне триангулације за једну разматрану ћелију, потребно је:

- да се јасно разликује сигнатура стварно летећих објеката од лажних сигнала у скупу пројектованих слика парцијалног скупа;
- да се издвоје координате сигнатура присутних летелица над разматраном ћелијом из скупа пројектованих слика парцијалног скупа летелица, од координата лажних сигнала из истог скупа;
- да се одреди растојање до сваке од детектованих летелице;
- да се изврши трансформација координата у Декартов координатни систем.

Координате сензорских станица у ћелији (и целој мрежи) одређене су на једнозначан начин и времена кашњења су дефинисана и кратка (време формирања слике, време израчунавања параметара захваћених летелица у кадру слике, време потребно за формирање података о летелицама захваћеним у једном кадру слике итд.).

Како нисмо у стању да на једнозначан начин добијемо и број и расподелу лажних и истинитих сигнала на слици, скуп пројектованих слика парцијалног скупа летелица са сликама лажних сигнала (једначина 38), може се из практичних разлога и начина израчунавања приказати на следећи начин:

$$S_p = \{s_{i1}(\alpha_{i1}, \beta_{i1}, t_i), \dots, s_{iw}(\alpha_{iw}, \beta_{iw}, t_i)\}, \quad (39)$$

где је  $s_{ij}$  ознака елемента разматраног скупа,  $i=a, 1, 2$  (објашњено раније);  $j=1, 2, \dots, w$  и  $w$  представља број укупно детектованих сигнала по једном кадру слике. Време  $t_i$  је карактеристично за један скуп података издвојен из једног кадра слике. То време се шаље са подацима о летелицама и њиховим координатама као „системско време“ и оно је битно за праћење трајекторије појединих летелица. Азимут и елевација се у процесу просторне триангулације узимају и као „адреса потенцијалне летелице“ у меморијској локацији

рачунара. На крају процеса, лажни сигнали ће бити потиснути. На основу податка о удаљености летелице од сензора, извршиће се трансформација координата детектованих летелица у Декартове координате, чија ће вредност представљати нову адресу летелице у меморијској локацији рачунара. Поред координата летелица и „системског времена“, са скупом података шаље се и параметар поузданости за сваку детектовану летелицу. Коначно, излазни скуп података о захваћеним летелицама у разматраном простору и временском тренутку унутар једне зоне може се представити новим векторским низом:

$$S_p = \{s_{p1}(x_{p1}, y_{p1}, z_{p1}, T_{p1}, t_i), \dots, s_{pm}(x_{pm}, y_{pm}, z_{pm}, T_{pm}, t_i)\}, \quad (40)$$

где су  $T$  параметар поузданости, а  $m$  коначан број детектованих летелица.

## 4.2.Опис процеса

Имајући у виду да су времена скенирања простора  $360^\circ \times 40^\circ$  код IRST система око једне секунде, приликом формирања панорамске слике, могућност квалитетног предфилтрирања слике је од велике користи. У мрежној апликацији одређивање координата циља се најједноставније одређује класичним триангулационим поступцима [65], који подразумевају укључивање прорачуна о припадности објекта области у простору и где је неопходно утврдити пресеке детектованих делова простора у којима се објекат налази. У овом раду су приказани резултати тестирања симулационог нумеричког модела развијеног за предфилтрирање, који се заснива на:

- аналитички добијеним статистичким параметрима ИЦ сигнатуре неба у MWIR области спектра (средњој вредности, стандардној девијацији, скјунесу и куртозису) за измерене карактеристичне сигнатуре летњег неба термовизијском камером SC 7200 FLIR, пред залазак Сунце и после његовог заласка,
- симулираним случајним вредностима улазног вектора сигнала реалних циљева и лажног аларма, и
- упоредивим временским параметрима извршења појединих фаза рада симулационог нумеричког модела код два система панорамских претраживача неба са резолуцијом: 33MB (12566 x 1396 x 2 бајта) за IFOV 0,5mrad и 209MB (31416 x 3491 x 2 бајта) за IFOV 0,2 mrad.

У оквиру ове методе детекција уоченог објекта – летелице, обавља се како примарном екстракцијом по интензитету у односу на позадину, тако и суперконтролом, сагледавањем захваћене површине у кругу до 250 пиксела у односу на положај центра са претходног фрејма (сл. 21). То значи да се практично конструише зона суседства за задати фрејм, а да се у следећем фрејму за сваки објекат у зони суседства са претходног фрејма сматра да испуњава услов суперконтроле (поновљивости - постојаности). Постојање већег броја објеката у зони суседства не спречава потврду о постојању мете [10-12]. Зона суседства не разликује растојања до мете.





Сл.21. Сукцесивни фрејмови са детектованим тачкама [29]

Одређен је гранични број пиксела по фрејму за границу реалне ситуације, као и могући број издвојивих објеката за подразумеване брзине скенирања за тренутна видна поља од  $0,5 \text{ mrad}$  и  $0,2 \text{ mrad}$  редом.

Током развоја симулационог нумеричког модела, варирани су следећи улазни параметри IRST система:

- За процену улазног вектора сигнала у тези су усвојене мете циља описане површином:  $4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$  са променом средње ефективне температуре циља у односу на позадину  $100 \text{ K}$  и  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  са променом средње ефективне температуре циља у односу на позадину од  $200 \text{ K}$ . Радијансе ових мета су вариране за различите удаљености од осматрачког система (до  $50 \text{ km}$ ), различите услове потискивања и заклањања сигнала за потребу развоја софтвера за предфилтрирање улазног вектора сигнала.;
- Средња вредност коефицијента слабљења радијансе у атмосфери је варирана за услов  $\sigma = 0,3$ ;
- $NETD < 0,01 \text{ K}$  [3]; и
- $MTF > 0,5$  [3].

Вредност изабраних параметра је варирана у односу на литературу [3, 41]:

- Видно поље IRST (FOV):  $360^\circ \times 20^\circ$ ,  $360^\circ \times 40^\circ$  и  $360^\circ \times 60^\circ$ ;
- Време претраживања FOV:  $1 \text{ s}$ ,  $2 \text{ s}$  и  $4 \text{ s}$ ;
- Дијаметар апертуре:  $254 \text{ mm}$ ;
- $F^\# = 1$ ;

- Скенирајући мод;
- Спектрални опсег  $3 \mu m$  до  $5 \mu m$ ;
- Специфична детективност детектора:  $2 \cdot 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2}/W$ ;
- FOV:  $0,2 \text{ mrad}$ ,  $0,35 \text{ mrad}$  и  $0,5 \text{ mrad}$ ; и
- Дужина детекторског низа: 1024, 2048 и 4096 детектора.

Апликација је развијена на сопственом коду, модификацијом кода за карактеризације тачкастих (spot) објеката на снимцима добијеним ултрабрзом камером [12]. Разлика није у алгоритму, већ у формату кадра (frame format). Наиме, апликација је била прилагођена обради сигнала видео записа од  $1000 \text{ fps}$  ( $224 \times 56$ ), редом,  $120 \text{ fps}$  ( $640 \times 480$ ) итд., али у суштини може да огради сигнал било којег видео записа. У овој тези генерисани су „видео записи“ са величином кадра  $12566 \times 1396$  и  $31415 \times 3490$  (формално видео запис није ових димензија, већ су то димензије низа фотографија - кадрова). Појединачни кадар је настао агрегацијом (мозаиком) мноштва малих фрејмова који су обрађени постојећим алгоритмом.

Развијени нумерички модел за предфилтрирање (Прилог 3) се састоји из више целина:

- Испитивање неба и дефинисање флуктуација,
- Формирање вештачког неба са уносом циљева,
- Предфилтрирање.

#### 4.2.1. Испитивање неба и дефинисање флуктуација

У многим приказаним апликацијама до данас, позадина је процењивана на основу средње вредности температуре позадине [15], која представља параметар од важности за карактеризацију позадинске сцене. Анализом сцене неба на основу добијених резултата мерењима летњег неба термовизијском камером SC 7200 FLIR, на локацији приближно око  $45^\circ$  северне географске ширине и приближно око  $22^\circ$  источне географске дужине (умерено континентална клима), пред залазак Сунца и по његовом заласку, указују на то да изнад угла елевације од  $50^\circ$  карактеристике неба постају константе, док небо испод  $50^\circ$  има својство експоненцијалног опадања температуре са висином (елевацијом). Код одређивања ИЦ сигнатуре циља, у термовизијском домену, до данас су примењиване различите методе, од оних које су базиране на мерењима [13] у посматраној сцени или на мерењима непосредног објекта од интереса [14]. Позиција и препознавање облика се процењује на основу контура типског објекта који се тражи [21] или сложеним алгоритамским поступком, на бази праћења трајекторије, одузимањем позадине [22].

Да би се формирао симулациони модел неба, приступило се елементарној статистичкој анализи параметара снимака неба добијених термовизијском камером (Поглавље 2.2). У статистичкој анализи испраћена су четири момента у дводимензионалном простору, карактерисаним  $x$  и  $y$  правцима израженим кроз азимут и елевацију.

##### **Елевациона зависност:**

- Добијена средња вредност садржи моменте првог реда и на добијеним графицима промене температуре са елевационим углом, примећена је експоненцијално опадајућа зависност;
- Стандардна девијација показује знаке независности у функцији висине и битан је параметар за изградњу стохастичког симулационог модела;
- Скјунес даје нагомилавање тачака у асиметрији профила померен више у лево са десне стране Гаусове расподеле; и
- Куртозис је наглашен у односу на Гаусову расподелу и углавном је инваријантан на елевацију.

**Азимутна зависност:**

- Средње вредности прате карактеристике рељефа, при чему се допринос рељефа смањује с висином;
- Стандардна девијација показује знаке независности за више углове елевације; и
- Скјунес и куртозис су слични као код елевационе зависности.

За случај динамичког посматрања с делимично облацима прекривеним небом (динамике су најизраженије код парцијално прекривеног неба), добијени су статистички параметри који битно мењају своје вредности у зонама облака. Средња вредност за позицију облака у зони топлих облака диже потенцијално ниво сивог у пикселу слике који одговара температури изнад прага осетљивости у ширем просторном опсегу. Код нимбусних облака, температура се значајно спушта.

Стандардна девијација у зони облака се смањује у односу на карактеристичну стандардну девијацију околине због емисионих односа топлотно проводних карактеристика водене паре, док за скенирање неба које садржи парцијално распоређене облаке, даје у просеку израженије стандардне девијације.

Скјунес и куртозис у зони облака су спљоштени. За цело небо ова два параметра показују асиметрију и издигнуће у односу на чисто небо.

У нумеричком моделу, облаци се уводе као „слој“ преко сметње у односу на небо без летелица (најмање 100 x 100 квадратних пиксела)

#### 4.2.2. Прављење вештачког неба са уносом циљева

Циљеви на вештачком небу, у нумеричком моделу, се појављују као „слој“ зрнастих објеката и састоје се из два дела: један испред и један иза облака, тако да бар две станице од три у оквиру елементарне ћелије за триангулацију могу да виде објекат, што је довољно да буде виђен и у систему (логика дисјунктивног прилаза). Практично имамо два „слоја“, предњи план (foreground) и позадину (background), који у односу на „слој“ облака садрже само тачкасте објекте до 50 x 50 квадратних пиксела. „Слојеви“ предњег плана и позадине немају статистички наглашене промене статистичких момената у односу на основни позадински „слој“. За „слој“ предњег плана важе статистички параметри трајне постојаности, док позадински „слој“ директно зависи од позиције облака. Аналитиком „слојева“ облака, решава се проблем одређивања позиције објеката на позадинском „слоју“.

Средња вредност температуре у зони летелице је већа у односу на средњу вредност околине. Стандардна девијација, скјунес и куртозис су знатно увећани, асиметрични и издигнути у зони објекта

Апликација за тестирање мери брзину промене кадра (frame rate) у јединицама  $f_{ps}$  за задату величину коначног frame-a. Поред тога, на основу задатог параметра усвојене вредности прага (CTV – contract threshold value), који индиректно одређује број карактеристичних пиксела на основу нивоа сивог (и према околини и у односу на целу слику – два критеријума), пиксели захваћени аквизицијом пролазе овај критеријум ради оцене припадности неком осветљеном објекту. Практично, параметар CTV је сложен улазни параметар у систему одлучивања о прихватљивости сигнала нивоа сивог на пикселу детектора и он интегрално представља:

- карактеристике камере (осетљивост, контраст, резолуција и др.),
- карактеристике позадине - небо (контрасти, структура позадине неба, дистрибуција температуре и др.), као и
- карактеристике објеката у сцени (број детектованих објеката укључујући лажни аларм, величина димензије детектованих објеката и др).

То значи да је у функцији параметра CTV у резултатима дата комплетна анализа и да су добијене изворне зависности. Урађена је и имплицитна анализа међузависности осталих параметара, при чему су добијене за нас битне карактеристике.

#### 4.2.3. Предфилтрирање

Поступак детектовања тачкастог објекта у поступку предфилтрирања из предњег и предзадњег „слоја“, добија се на бази више узастопних слика које пролазе тест са атхеренцијама. Подаци, који су прошли предфилтрирање формирају улазни вектор података за симулациони нумерички модел триангулације у оквиру кога се добија излазни вектор података о циљевима са утрошеним временом за потребна израчунавања.

Анализа објеката на индивидуалном фрејму, подразумева да се издвоји сваки пиксел који се у контрасту истиче у односу на  $x$ -у средњу вредност околине за тестирање најближих суседстава у испитивању конективности. Тестирани су случајеви координационих бројева 4 и 8 (координациони број 4, подразумева конективност: лево, десно, испред и иза, а координациони број 8 поред тога подразумева и конективности по дијагоналама). Конективност код 4 је реализована ако је:

$$abs(i - i') + abs(j - j') = 1, \quad (41)$$

а ако је конективност 8:

$$abs(i - i') < 2 \text{ и } abs(j - j') < 2. \quad (42)$$

Све тачке које рекурзивно испуњавају услов најближег суседства припадају једном истом објекту. Процес сегментирања објеката представља једну од најспоријих компоненти система.

Следећи тест је тест величине објекта, који се примењује на све издвојене објекте мање од 50 пиксела, и сваки од њих који испуњава овај услов је кандидат за детектовани објекат по индивидуалном фрејму.

Уколико је периода за генерисање панорамске слике 1 s, тада до 200 пиксела сматрамо  $\epsilon$  (епсилон) околином летелице (30 пута корен величине објекта) за авион, а преко 250 пиксела за ракету у путањи нормалној у односу на камеру. За неколико ASCII вредности, мења се вредност интензитета код долазног циља који иде директно ка камери.

Скуповне операције за сетове пиксела детектованих објеката се примењују тако да се дисјунктивним поступком одстрањују лажни аларми. Ово поред сегментирања спада у најспорије операције у детекционом поступку. И варирање стопе раста, зависиће управо од наведене граничне брзине промене кадра.

За сваки детектовани објекат, који за 4 узастопна фрејма испуњава услов  $\epsilon$  околине (сукцесивно), сматра се да је детектован, осим уколико парцијално нема маркирање „слоја“ са облацима. Позиције азимута и елевације, као и брзине по азимуту и елевацији, узимају се као параметри улазног вектора по детектованој летелици са последњег фрејма. Брзине, убрзања и промене убрзања, добијају се као параметри у аналитичкој обради позиција добијених са претходно детектованих фрејмова.

Улазни вектор по једној летелици има 12 димензија (4 позициона параметра, горе наведена, друга 4 су параметри величине - тренутна величина, промена величине и њихове даље две промене вишег реда, трећа 4 су параметри осетљивости - осветљеност у односу на околину, промена осветљености и њихове даље две промене вишег реда).

Станице за триангулацију имају дефинисане параметре своје позиције, које представљају разменске параметре са осталим станицама у триангулацији, имају синхронизовано време претраживања простора и све станице почињу да претражују простор из правца севера (све су „усеверене“).

Принцип размене података у процесу триангулације три станице иде на следећи начин. Свака станица после последњег фрејма предаје свој улазни вектор података свом десном суседу, ради поступка триангулације података за тај пар осматрачких станица. Добијени излазни вектори се шаљу главној станици у триангулационој тројци, где се формира коначни излазни вектор на дисјунктивном принципу (ако је летелица детектована бар од једног пара осматрачких станица, она се сматра детектованом и преузимају се њени параметри за даљу обраду и анализу). У нашем симулационом нумеричком моделу, прати се више различитих времена карактеристичних за процес израчунавања и размене података.

На основу времена за које је извршен процес и добијену меру тачности, врши се пондирање квалитета симулационог нумеричког модела.

У апликацији је могуће варирање времена за размену података и триангулациони поступак. Оно што ограничава комплетан детекциони систем је брзина промене кадра на индивидуалном фрејму, односно на једној станици. У складу са наведеним ограничењима, могуће је варирати услове конективности,  $\epsilon$  околине, начина преклапања слика узастопних фрејмова (уместо комплетне слике у обраду иду адекватни репрезенти - граница и величине објекта, чиме се добија оптимално време трајања операција и не долази до прекидања тока сигнала или кашњења). Оптимална времена за размене података су реда 1  $s$  и мање.

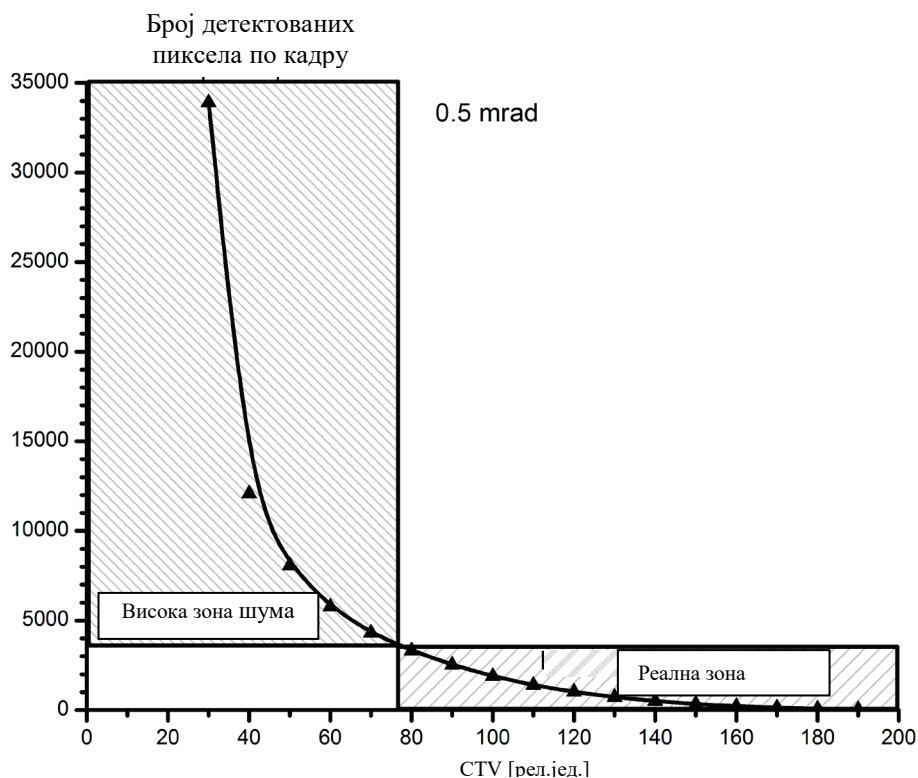
Развијени алгоритам детектује пикселе, који испуњавају услов осветљености (контраста). Затим се групе тачака по алгоритму најближег суседа групишу у објекте и за један фрејм се формира колекција објеката, која испуњава просторни услов. После тога, методама математичке морфологије [21-23], сваком од објеката у колекцији се обезбеђује раст (размазивање, конволуција, као симулација кретања до следећег фрејма, тј. уколико се датом облику објекта, са јасним границама, придода проширење са сваке стране у правцу могућег раста објекта, добија се зона у којој се потенцијално може наћи објекат услед кретања у наредном фрејму) и то се понавља у сваком следећем фрејму с тим да се увек за последња четири фрејма (референтно у односу на актуелни фрејм, који је у фази предфилтрирања) ради временска анализа преклапања конволуираних објеката (услов постојања у времену). Тест преклапања се обавља скуповним операцијама пресека.

Развијена апликација је тестирана у следећем хардверском окружењу: рачунар Lenovo T530 са i5 процесором, 8 MB RAM меморије, 2 SSD диска Patriot Blast 240 GB (за оперативни систем) и Patriot Ignite 240 GB (за податке), Nvidia Quadro NVS 5400M (сопствена меморија 1 GB) и Intel HD 4000 (дељена меморија) графичким процесорима са 64 - битним Windows 7 оперативним системом.

Коришћене су софтверске компоненте: *nativne* Microsoft Windows multimedia video и multimedia I/O библиотеке – multimedia SDK, Open CV и Free Image за обраду видео записа и слика, GSL библиотека за нумеричку анализу. Комплетна апликација је развијена коришћењем Bloodshed Dev C++ компјлера (64 bit) у single-thread варијанти. Нису коришћене могућности паралелне обраде сигнала ни на процесору ни на графичким интерфејсима.

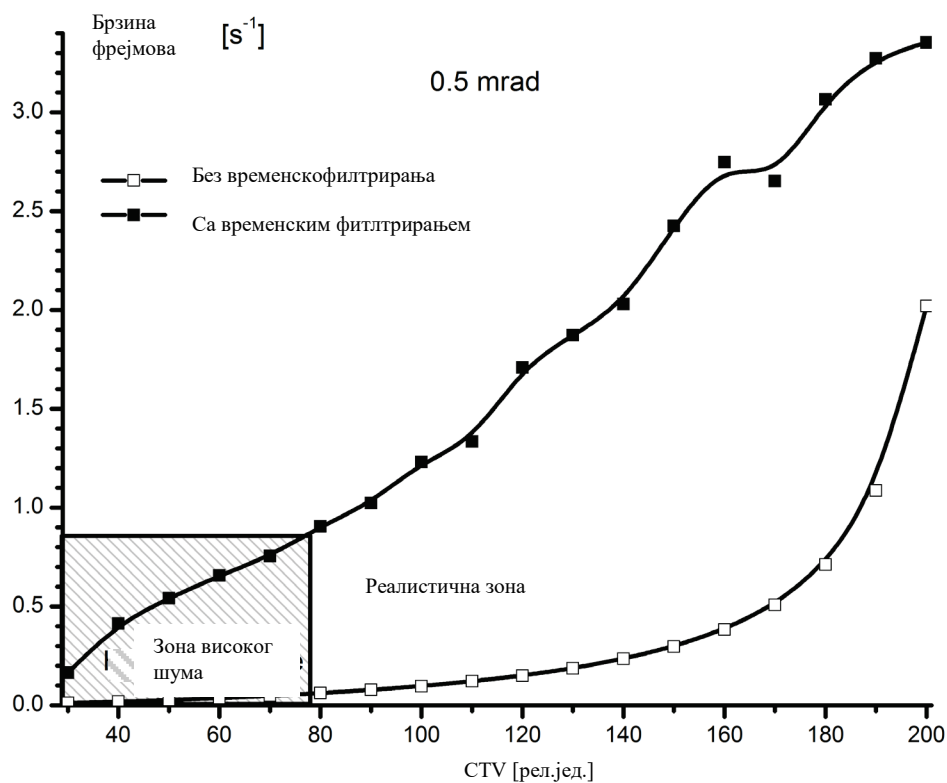
### 4.3. Симулациони резултати

CTV представља NETD [14, 17] као неопходан параметар са осмобитним опсегом (од 0 до 255). Служи за додатно појачање, истицање, сигнала на пикселу и њиме се индиректно одређује број карактеристичних пиксела за обраду сигнала у оквиру предфилтрирања. Граница од 3500 пиксела по фрејму је граница реалне ситуације, при којој шум и артефакти нису виђени високом осетљивошћу камере, као податак (сл. 22). Уједно, та граница је у нашој претпоставци релевантна, јер подразумева детектовање очекиваног броја тачкастих (spot) објеката у фрејму.



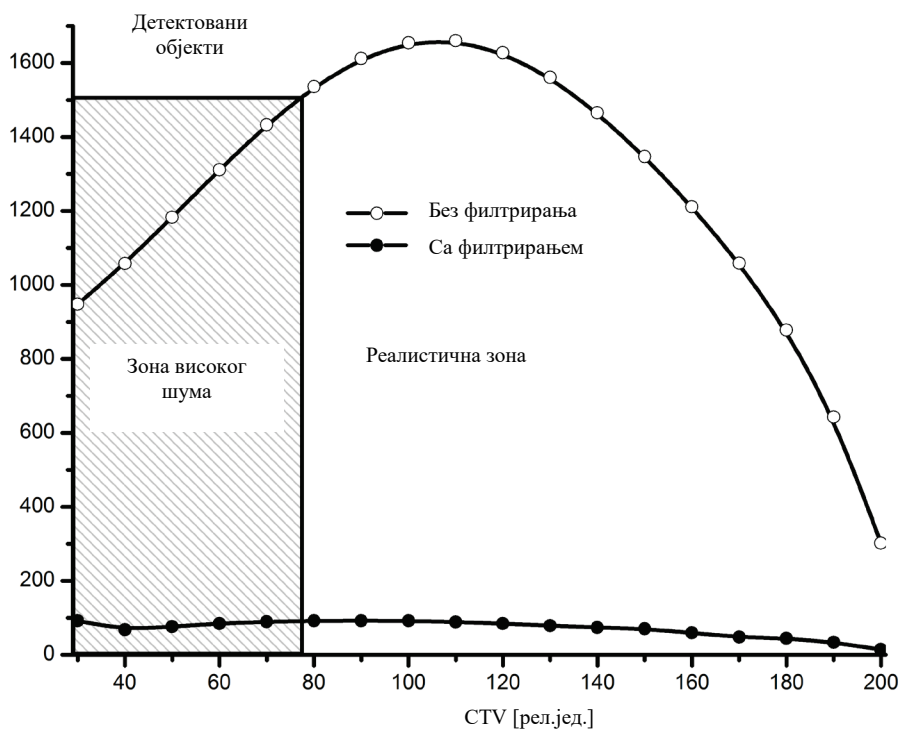
Сл.22. Број детектованих пиксела по кадру у зависности од CTV у релативним јединицама [рел.јед.] мерено са контрастом у резолуцији од 8 бита [31]

Са променом вредности параметра CTV, који је повезан са температурном осетљивошћу сензора (NETD), мења се осетљивост система за детекцију тачкастих објеката чији ниво сигнала превазилази ниво шума (сл.23). Уочава се да се са временским филтрирањем значајно повећава брзина обраде података и да је изводљива у реалном времену. За случај, када се не примењује временско филтрирање, обрада података у реалном времену је изводљива само у зони ниске осетљивости.



Сл.23. Зависност учестаности слика од CTV за IFOV 0,5mrad са и без временског филтрирања [31]

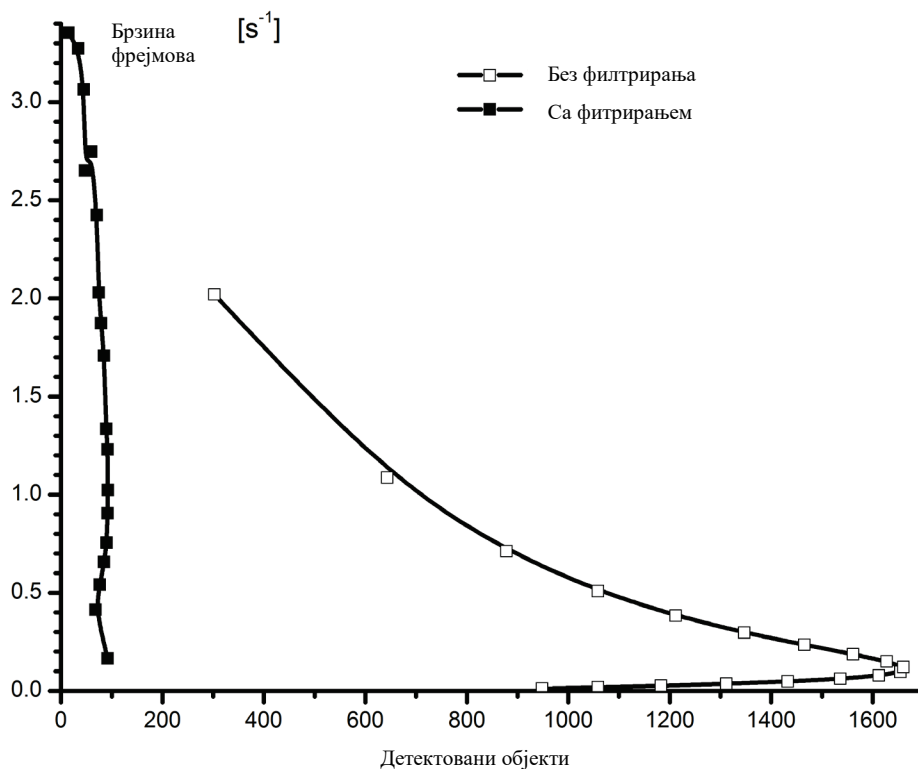
На сл.24 је приказана квантификација узрока пада брзине обраде података. Уколико нема временског филтрирања, апликација генерише 10 до 20 пута већи број објеката, чије просторно филтрирање заузима значајни ресурс рачунара (CPU време).



Сл.24. Број откривених објеката у односу на CTV за IFOV 0,5mrad са и без временског филтрирања [31]

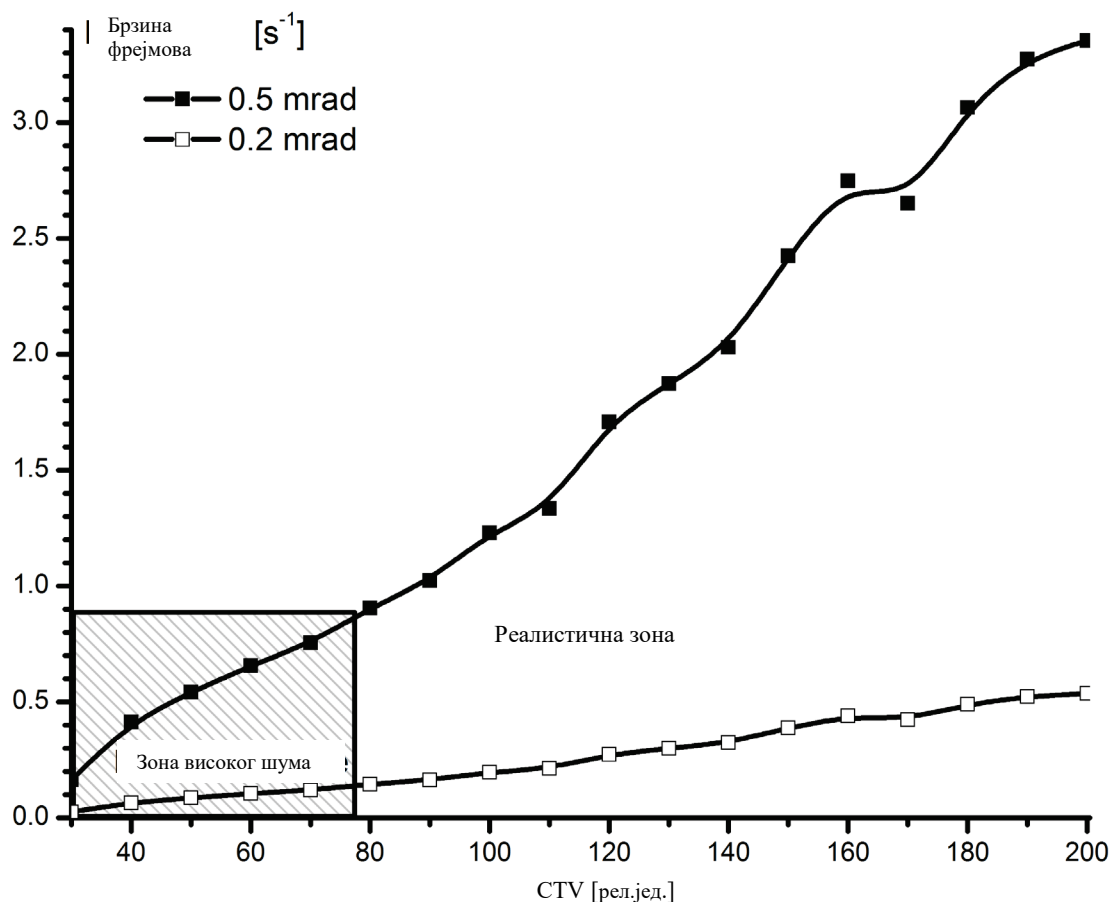
Сл. 25 представља сублимацију резултата приказаних у претходне две слике (сл. 23 и 24). Ово је и реалан показатељ за неоснованост обраде података само у просторном домену, јер ни у једној ситуацији без привременог филтрирања не настаје реалан број детектованих објеката (претпоставка је да не треба да постоји више од 100 објеката, као што крива w (width) са временским филтрирањем показује).





Сл.25. Зависност брзине промене кадрова од броја детектованих објеката са и без временског филтрирања [31]

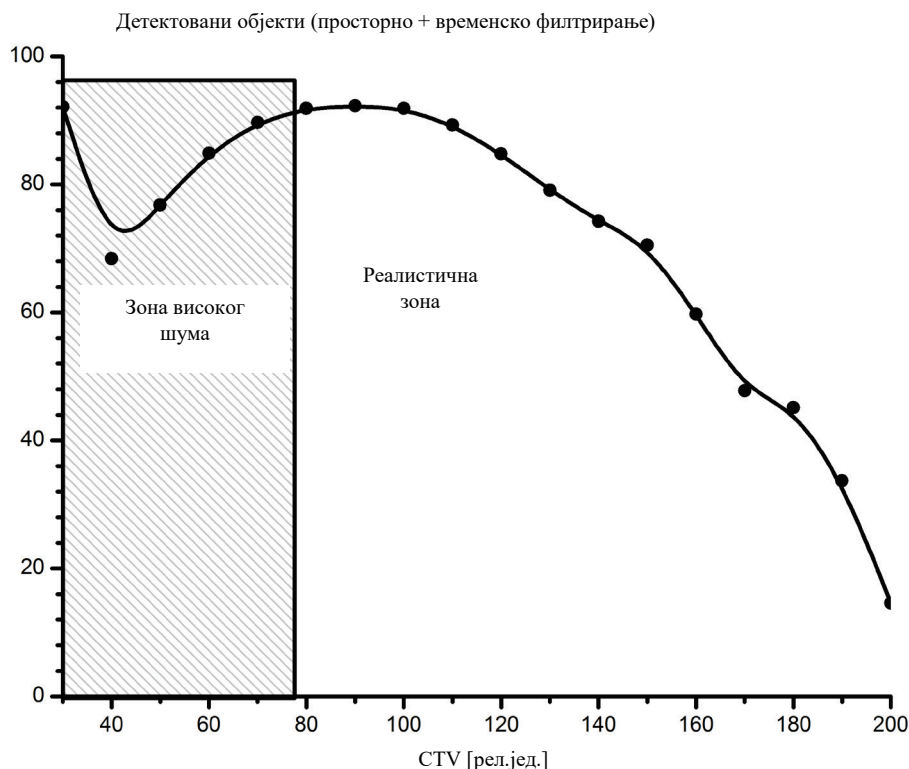
Обрада података током предфилтрирања (у овом софтверском решењу) се врши различитим брзинама обраде података, у зависности од вредности параметра CTV. Овај параметар значајно утиче на број карактеристичних тачака за анализу (сл. 26). Примећује се да фреквенција слике прелази потребну границу за обраду сигнала током предфилтрирања у реалном времену за реалне услове мерења. Наиме, за подразумевану брзину скенирања 1 Hz за тренутно видно поље IFOV = 0,5 mrad, свака брзина обраде у предфилтрирању, која је већа или једнака брзини скенирања задовољава услов рада у реалном времену.



Сл.26. Зависност брзине промене кадрова од CTV за IFOV 0,5 mrad и IFOV 0,2 mrad са временским филтрирањем [31]

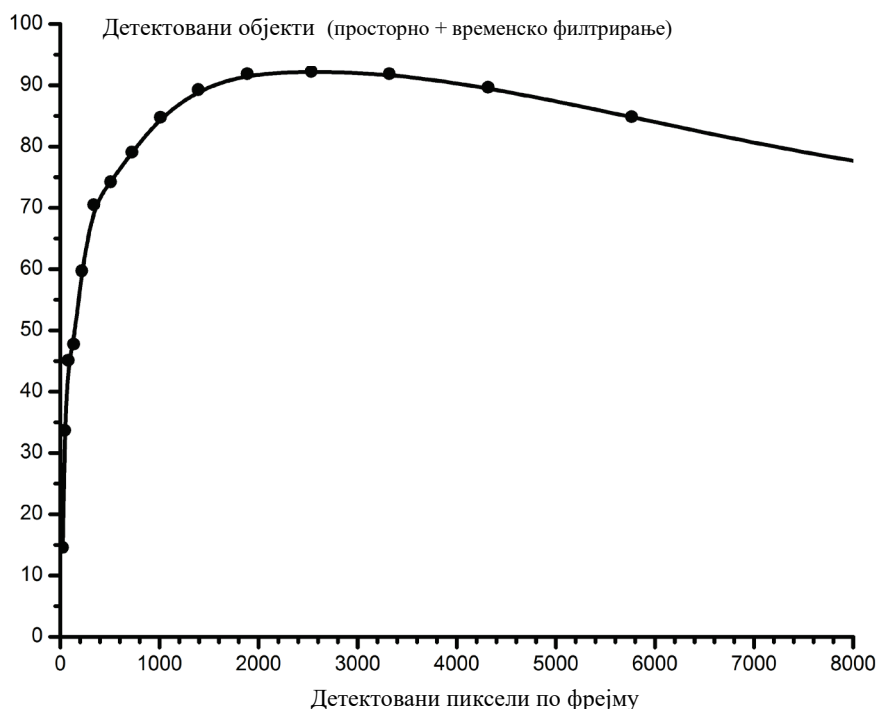
За брзине скенирања видног поља  $360^\circ \times 40^\circ$  IRST са IFOV 0,2 mrad, брзина обраде података постаје много мања. На основу теста, процењује се да је у овом случају обрада података у реалном времену могућа само у смислу чистијих сцена са мање летелица и брзином скенирања од 0,5 Hz.

У функцији параметра CTV могуће је извести и анализу броја издвојених објеката који су прошли просторни филтер (осветљеност, појављивање у групи) и временски филтер (постојање у 4 узастопна фрејма). На сл. 27 се види да је могуће издвојити до 90 објеката који испуњавају дати услов у реалним оквирима. Број детектованих објеката се смањује код високих вредности CTV, јер су у задатим условима сцене чистије - са мање објеката. Код ниских вредности параметра CTV долази до смањења броја објеката, јер у мноштву детектованих тачака постоји доминантан шум који не испуњава услов временског филтрирања. У зони високог шума могућа су статистички значајна нестационарна понашања у односу на број детектованих објеката, јер постоји њихове попречне повезаности које са малом променом контраста значајније мењају број детектованих објеката и нису мерно поновљива. То је разлог појаве „депа“ на слици. У зони смањеног шума (повећаног контраста, дакле мања је и попречна повезаност објеката) постоји стационарно стање које је потпуно реално.



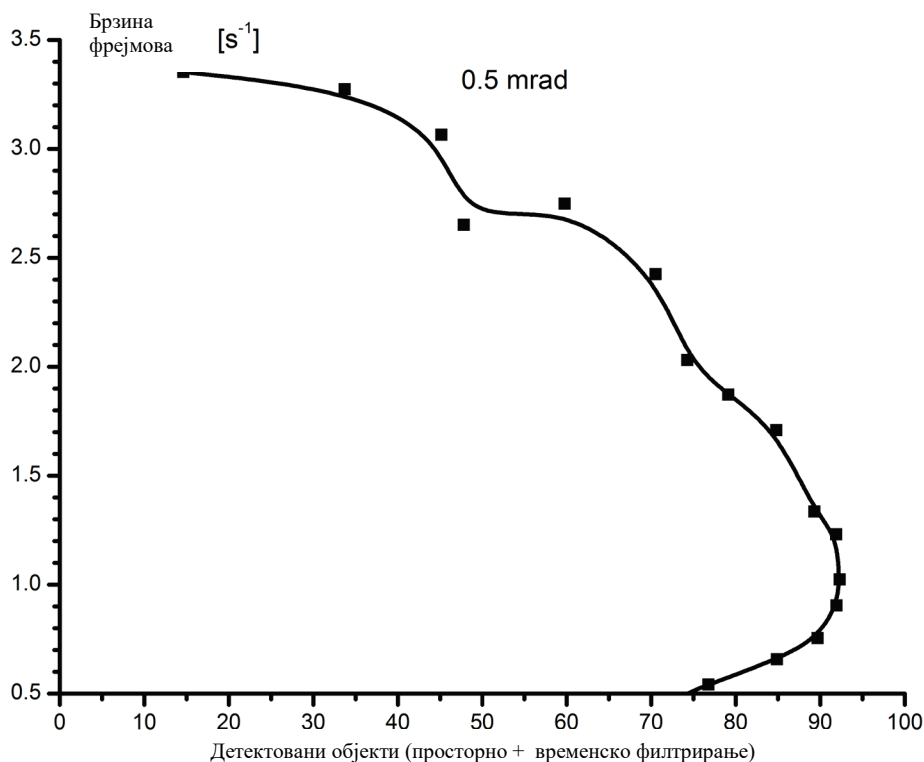
Сл.27. Зависност броја детектованих објеката од СТВ после просторног и временског предфилтрирања [31]

На сл. 26, анализирана је само реална зона вредности параметара СТВ. Све што је претходно наведено током дискусије приказаних резултата у овом поглављу, потврђује чињеницу да у изузетно чистим сценама постоји јасна контрастна детекција мањег броја објеката, али и да то одговара реалним ситуацијама. Примећује се стационаран режим веома постојане контроле од неколико десетина до стотину објеката који је практично инваријантан за различити опсег осетљивости односно броја детектованих пиксела. Постојање платоа (практично линеаран, заравњени део функционалне зависности на сл. 28), омогућава сигурну анализу задатог броја објеката и фину регулацију брзине обраде сигнала. То значи да можемо разликовати детектоване објекте према облику, брзини, надморској висини, итд.



Сл.28. Зависност броја детектованих објеката од детектованих пиксела по фрејму после просторног и временског предфилтрирања [31]

На крају, у овој анализи је дата брзина обраде података у функцији броја детектованих објеката (сл. 29). Примећује се да свака обрада података испуњава задате услове у реалном времену (до 90 објеката који испуњавају и просторни и временски услов). Овај број објеката представља реалне циљеве који су добијени издвајањем након предфилтрирања и већи је од физички остваривог броја објеката у зони аквизиције  $360^\circ \times 40^\circ$  IRST система на растојањима до  $50km$  са IFOV  $0,5 mrad$ . У тези је показано да је за ову зону очекивано да се захвати 100 авиона, а да при томе не буде конфликта у ваздуху. Теоријски не може да их буде више, а овде је показано да се толико и детектује без лажног аларма. На овај начин је показано да развијени алгоритам испуњава услове за реалну примену у оквиру IRST система.



Сл.29. Зависност брзине промене кадрова од броја детектованих објеката након просторног и временског предфилтрирања [31]

#### 4.4.Анализа резултата

IRST уређаји и системи током формирања панорамских слика захтевају више времена за компензацију кашњења, која је близу једне секунде. С друге стране, обрада података панорамских слика захтева значајне рачунарске ресурсе и додатно CPU време. Додатно време ствара нежељена кашњења и као последицу немогућност обраде у реалном времену. У овој ситуацији, могућност предфилтрирања у каснијој обради слике, може бити од велике користи у укупним анализама динамичке сцене.

Полазећи од претпоставке да се поступком предфилтрирања може знатно смањити улазни вектор података код осматрачких уређаја и система, развијен је симулациони нумерички модел за ту намену и приказан је део резултата његовог тестирања који се односи на потврђивање овог поступка.

Применом логичких и скуповних операција за обраду дигиталних фотографија, извршена је припремна обрада сигнала (предпроцесирање) вектора улазних података, у оквиру мрежне апликације за одређивање координата циља летелица, при скенирању простора  $360^\circ \times 40^\circ$  термовизијским уређајима и системима са тренутним видним пољима од  $0,5mrad$  и  $0,2mrad$ . Тиме је добијена знатно мања колекција улазних података у реалном времену, са којом се знатно скраћује време потребно за утврђивање просторних пресека детектованих објеката на различитим камерама.

Потврђено је да су карактеристике неба изнад  $50^\circ$  практично константне. Зона неба изнад ових углова елевације одговара захвату летелица, које су изразито близу и налазе се дубоко у зони непосредног дејства или балистичким ракетама, које нису у оквиру детекционог система (треба их уочити знатно раније). Испод  $50^\circ$  карактерисано небо има својство експоненцијалног пада температуре са висином (елевацијом), које у области ниског неба има обресе рељефа, чак и у зони десетак степени изнад хоризонта. Сва термовизијска мерења сигнатуре неба у MWIR спектралној области су рађена на познатом небу поднебља и показало се да је за сваку радну станицу потребна калибрација у односу на небо у пуном опсегу азимута пре почетка рада термовизијског система за осматрање простора  $360^\circ \times 40^\circ$ .

Главне карактеристике развијене апликације су:

- 3500 пиксела по фрејму представља границу реалне ситуације и подразумева детектовање очекиваног броја тачкастих (spot) објеката у фрејму.
- За подразумевану брзину скенирања од  $1Hz$  са тренутним видним пољем, IFOV од  $0,5mrad$ , свака брзина обраде података која је већа или једнака брзини скенирања задовољава услов рада у реалном времену и могуће је издвојити до 90 објеката у реалним оквирима.
- За веће величине фрејмова, које одговарају тренутном видном пољу IFOV од  $0,2mrad$ , добија се зависност истог карактера као и за IFOV од  $0,5mrad$ , па је изводљива обрада података у реалном времену за услове чистијих сцена са мање објеката при брзини скенирања од  $0.5Hz$  и могуће је издвојити до 180 објеката у реалним оквирима.
- У изузетно чистим сценама постоји јасна контрастна детекција мањег броја објеката, што у неборбеним условима представља најреалније стање сцене.
- Могућа је прецизнија анализа детектованих објеката према његовим карактеристикама (облик, брзина, трајекторија итд.).

## 4.5. Резиме

На основу приказаног, јасна је неопходност примене просторног и временског предфилтрирања улазног вектора података пре поступка одређивања координата система у оквиру мрежног сензорског система.

Показали смо да је просторно и временско предфилтрирање улазних векторских података неопходно пре одређивања координата циљева, применом умреженог осматрачког система са више IRST система, посебно, ако је потребно да откријемо вишеструке циљеве у области претраживања. Ова апликација је развијена за обраду ИЦ кадра слике, међутим развијени симулациони нумерички модел се може користити и за обраду слика у видљивом делу спектра.

## 5. ПРОЦЕС ТРИАНГУЛАЦИЈЕ

Праћење вишеструких тачкастих циљева у моделу асиметричног ИЦ сензорског мрежноцентричног система, анализиран је у економски прихватљивом моделу са одабраном несофистицираном скромном опремом и добром проценом [21-23, 65-67]. Нумерички експеримент се изводи на сопственом симулационом нумеричком моделу, заснованом на принципима просторне триангулације за ову намену у којем се нереални случајеви аутоматски елиминишу током процене излазног вектора података. Овде се примењује метода Гаусове расподеле. Просечна израчуната времена, која су резултат симулације, била су краћа од симулираних вредности увећаних за 3  $\sigma$ .

### 5.1. Избор метода

Код праћења сигнатура летелица у реалном времену, најтеже се долази до поузданих информација о њиховој просторној позицији у реалном времену, што зависи од методологије, концепта и приступа проблему. Један од начина да се повећа прецизност постављеног система односи се на начин избора сензора и њиховог повезивања у систем, као и примењеног метода за аквизицију детектованих летелица. Променљивост карактеристика сигнатуре летелице током лета у спектралном опсегу рада изабраног сензора, зависе од промене њених структуралних параметара (и геометријских и емисионих) у односу на релативан положај летелице и тачке посматрања, који се мењају.

Излазни вектор података о циљевима код осматрачких пасивних ОЕ система, а садржи само угаоне координате позиције летелице у реалном времену. Код активних ОЕ система, као што је лидар [64,68,69], слично радару, излазни вектор података садржи све елементе за потпуну аквизицију захваћених циљева. У зависности од изабраног теоријског модела, нивоа технологије мерних уређаја, архитектуре и капацитета рачунарског система или математичке трансформације [70] за изабрану методу, мерна несигурност може да расте. Време захвата подлеже законима вероватноће с обзиром на променљиву брзину циља и константну угаону брзину ротације платформе. Проблем једнозначне детекције је изражен када долази до маневра (промена курса, брзине, висине, нагиба, оријентације и сл.). Ово се превазилази методом статистичке обраде података кретања циља повећањем вредности стандардне девијације (дисперзија,  $\sigma$ ) [71]. Избор проблема покретног циља се заснива на добро познатој методологији модела вишеструког филтрирања (ИММ - Interactive multiple model) [72]. Савремени аспекти се ослањају на вероватноћу градијента заснованог на ИММ алгоритму [73]. Нека нова истраживања обухватају алгоритме просторног кластеровања који су засновани на триангулацији Делонеја (Delaunay) [74]., итд.

Имајући у виду да IRST припада пасивним ИЦ системима и да је излазни вектор података дводимензионалан, трећа координата о удаљености циља одређује се методом просторне триангулације [2, 26, 59-71, 75-79]. Изабран је, развијен и реализован симулациони нумерички модел [70], заснован на овом методу, с обзиром да поред високе тачности резултата омогућава и елиминацију лажних аларма. Оптимални концепт [77, 78] код овог симулационог модела, зависи од температурне осетљивости и просторне резолуције IRST система интегрисаног у сензорску мрежу осматрања. У оквиру сензорске мреже IRST функционише независно од других сензорских система током аквизиције циљева, што се разликује од модела ИММ и ИММ-МНТ (ИММ са алгоритмом тестирања вишеструке хипотезе) [79].

Један од приступа проблему је заснован на методама нацртне геометрије конструисања пресечница равни (у ортогоналним пројекцијама и просторном тродимензионалном моделу) у којима леже правци посматрања са одговарајућих станица ка циљевима - летелицама. Применом кружних пресека једнограног елиптичног хиперboloида са триангулационом мрежом, сачињен је динамички геометријски тродимензионални модел [12, 80], у коме се са две станице на Земљи посматрају две летелице у одређеном временском интервалу. Конструисана решења су геометријска места лажних циљева за претпостављени тип кретања летелица и изабрани положај станица у постављеном тродимензионалном моделу. Анализа решења је показала да избор положаја треће станице, у сваком од испитаних модела је довољан за тачно одређивање координата циља - летелице. Решења геометријских модела представљају базу за развој алгоритама и њихову практичну примену у оквиру креирања адекватног софтвера за задату проблематику.

## 5.2. Концепт сензорске мреже заснован на IRST

Сензорска мрежа за просторну триангулацију детектованих летелица у реалном времену заснива се на КИС-у, која има следеће предности [66]:

- економичнија реализација коришћењем комерцијалних уређаја и система;
- економична реализација утиче на густину мреже и њен квалитет;
- уређаји и системи се умрежују у случају посебних захтева;
- флексибилност система;
- контрола и управљање системом са малим бројем стручног особља; и
- тренутна детекција и праћење великог броја удаљених летелица.

Флексибилност система се огледа у релативно једноставној структури дисперзивно постављених сензорских ћелија система. Садашњи ниво развоја сензора омогућава једноставно и брзо успостављање мреже према захтеваној ситуацији. Сензорске ћелије се састоје од три до шест IRST сензорских система у облику саћа (симетрични системи) или квази – саћа (асиметрични системи) [81-83]. Сваки IRST систем се поставља на мобилну платформу сензорске станице. Сензорску станицу IRST система чине комуникациони уређаји и комерцијални рачунар обезбеђен софтверским пакетом неопходним за функционисање станице до најнижих елемената КИС-а. Минималан број састављених IRST система који учествују у триангулацији [65] дефинише се на основу структуре КИС-а [84-88]. и траженог степена поузданости.

Приликом моделовања сензорских ћелија разматране су различите структуре од по три сензорска система постављена у углове једнакоугаоног троугла до шест сензорских система постављених у углове једнакоугаоног шестоугла. Појавили су се следећи захтеви:

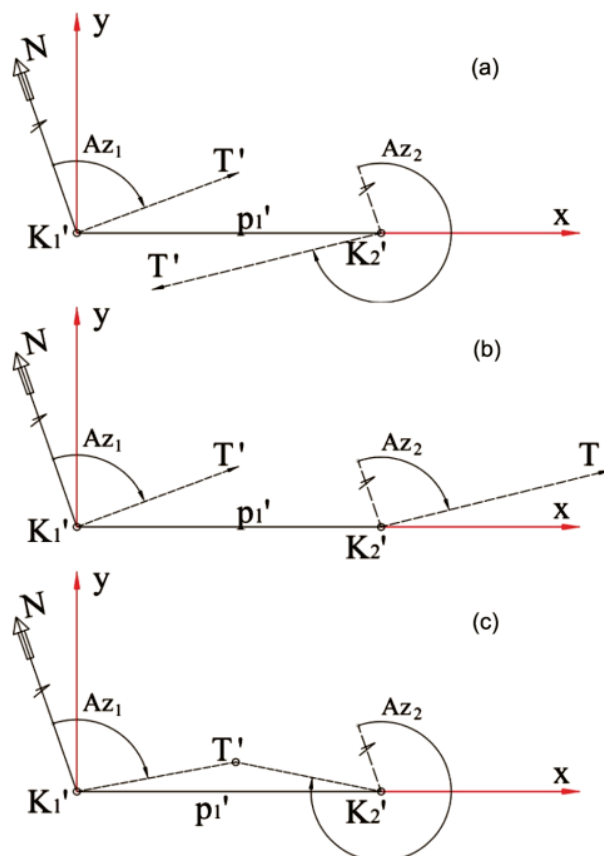
- Да се подручје за претраживање додељено појединачном сензору претражи у што краћем временском интервалу;
- Да се одржава висока поузданост током рада;
- Да се сензорска ћелија организује са што мање сензора;
- Да се разматрају и анализирају парцијалне брзине одзива система (време потребно за сортирање улазних података и прилагођења улазних вектора података симулационом нумеричком моделу за триангулацију);
- Да се у оквиру симулационог нумеричког модела врши провера израчунатих растојања до циља пре формирања излазног вектора података;
- Да се формира излазни вектор података који обезбеђује оперативни рад КИС-а.



Разматране су разне сензорске мреже са симетричним и асиметричним ћелијским архитектурама, а карактеристике мреже су анализирани у односу на потребан одзив ка КИС-у. Рад поједностављене сензорске ћелије, моделован је у оквиру симулационог нумеричког модела за просторну триангулацију и резултати су приказани у [65]. Разматрана сензорска ћелија се састоји од три неколинеарно постављена IRST система на међусобном растојању од  $2\text{ km}$  до  $4\text{ km}$ . Сензорска ћелија, према моделу опсервације, је формирана са три пара спојених IRST система (практично стереовизијска).

### 5.3. Модел са усвојеним принципом триангулације

Када се у оквиру сензорске ћелије након првог циклуса претраживања простора (један скен), изврши додељивање улазних вектора са суседних станица (нпр. прослеђивањем у „десно“), на свакој станици постоје по два улазна вектора за свако стереовизијско посматрање. У оквиру процедуре симулационог програма за процену удаљености поједине летелице, приступа се кориговању вредности вектора улазних података на свакој станици у односу на азимут северног правца. Затим се врши прва селекција вектора улазних података и елиминишу циљеви који одступају за  $\pm 5^\circ$  од азимута [70] у односу на правац који пролази кроз позиције пара IRST система (посматрано из тачке на том правцу која је подједнако удаљена од обе станице - сл. 30).



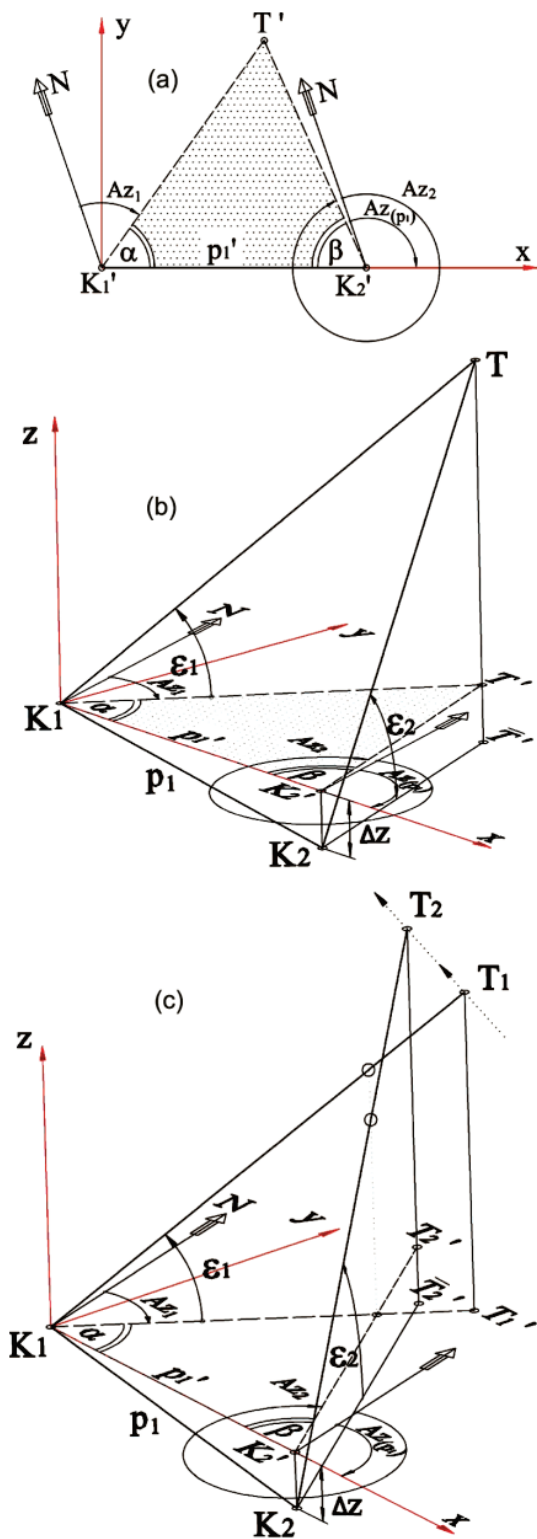
Сл.30. Геометрија за елиминацију малих углова; а)  $A_{z1} \ll A_{z2}$ ; б)  $A_{z1} \approx A_{z2}$ ; в)  $A_{z1} \gg A_{z2}$  [70]

Развијени и примењени модел триангулације се заснова на два улазна вектора са матрицом која може да се „сажима“. Начин израчунавања је такав да се попуњеност

матрице смањује са сваком елиминацијом (упаривањем) парова који одређују јединствену тачку у простору [60-62].

Посматране летелице у ваздуху је неопходно детектовати бар једним паром сензора постављеним на ротационе платформе, да би се одредила позиција захваћених циљева. Сваки од упарених сензора понаособ захваћене циљеве приказује у различитом распореду са различитим тренуцима појављивања (због међусобне просторне измештености пара осматрачких станица). Овде се стичу услови за претпоставку Гаусове расподеле. Током верификације постојања циља, уместо строге једнакости за надморску висину, усваја се толеранција од  $3\sigma$  (вероватноћа 99,7%). Овај случај одговара линијама, које се мимоилазе на сл. 30 (с). Изложени принципи објашњавају приступ, којим се остварује смањена сложеност израчунавања.

Аналитичка разматрања [65] могу да дају представу стварног стања, међутим сваки сензор није у могућности да види све циљеве, а детектоваће и лажне аларме. Расподела захваћених циљева и лажних аларма је случајна. Примењена метода анализира улазне векторе, који су настали претраживањем истог простора са мало смакнутих позиција сензора и практично истим тренуцима парова. После адекватних координатних трансформација, добијени излазни вектор је без лажних аларма са одговарајућим нивоом поузданости.



Сл.31. Геометријски модели за процес триангулације; основни пар елементарне ћелије (а): поглед у-ху равни, (б): 3D приказ; (с) случај када се линије правца детекције циља мимолазе, посматрано са две упарене сензорске станице [70]

Једноставни 3D геометријски модел елементарне ћелије (сл. 31 б) за триангулациони метод детекције циљева, постављен је у Декартовом координатном систему са две сензорске станице са IRST системима у тачкама  $K_1$  и  $K_2$ , на различитим надморским

висинама и претпостављеним циљем (тачка  $T$ ). Модел је дефинисан ртогоналном пројекцијом  $K_1'K_2'T'$  троугла  $K_1K_2T$  у  $xу$ -равни, са угловима  $\alpha$  и  $\beta$ , укључујући и углове елевације  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  за сваки вектор ( $K_1T$  и  $K_2T$ ), што је приказано на сл. 31 б. Други означени параметри на слици представљају:

- $K_1'$  и  $K_2'$  су пројекције пара тачака из којих се врши осматрање циља;
- $A_{z(p1)}$  је азимут повезан са правцем  $p_1$ , где је  $K_1K_2 = p_1$  и  $K_1'K_2' = p_1'$  се поклапа са  $x$ -осом;
- $A_{z1}$  и  $A_{z2}$  су азимути циља  $T$  у односу на правац севера; и
- $\alpha$  и  $\beta$  су одговарајући углови у  $xу$ -пројекционој равни у процесу симулације.

Модел са нумеричком симулацијом је дизајниран да изврши неколико задатака:

- процени време за израчунавање циљних координата једне хелије, и
- елиминише лажне циљеве стварањем скупа мета и лажних аларма нормализованих до максималне могуће густине циљања.

У анализи модела су извршене симулације методом случајних узорака. За различите густине појављивања стварних и лажних циљева, мерена су два периода: време за елиминацију лажних циљева и време за одређивање координата стварног циља. Ова симулација је неопходна како за прецизну селекцију стварних циљева и њихових угаоних координата, тако и за одређивање времена потребног за израчунавање удаљености појединачног циља од референтне станице и трансформацију из сферног у Декартов координациони систем. Ово је од великог значаја за системски одзив код једновременог праћења више циљева. Код савремених технолошких захтева сматра се да је за овај процес потребно време мање од једне секунде. То се односи искључиво за аквизицију, што значи да системи са ротационим платформама имају ниску угаону резолуцију и малу брзину скенирања. Геометријска поставка за триангулацију је приказана на сл. 31(а) и односи се на основни пар сензора елементарне хелије. Приказани су неки карактеристични случајеви.

Упаривање елемената векторских низова улазних вектора, који се односе на исти појединачни циљ, није једноставно одредљиво. Представљени модел је поједностављен и прилагођен брзом израчунавању са траженом тачношћу и садржи разне тестове у својим унутрашњим петљама. Прво се врши процена удаљености пројектованих циљева у равни азимута, што укључује појаву вишеструких циљева. Потенцијалне удаљености између елемената улазног вектора израчунавају се применом синусне теореме (формира се матрица парова тих удаљености) [59-61, 65, 70]:

$$\begin{cases} R_{1i}^* = \frac{p_{pS1S2} \cdot \sin(\alpha_{pj}^*)}{\sin(\alpha_{pi}^* + \alpha_{pj}^*)} \\ R_{2j}^* = \frac{p_{pS1S2} \cdot \sin(\alpha_{pi}^*)}{\sin(\alpha_{pi}^* + \alpha_{pj}^*)} \end{cases} \quad (43)$$

Ознаке у једначини: \* се односи на кориговану вредност,  $R$  означава растојања од објекта на једну од две станице,  $i$  и  $j$  одговарају пару координата објекта у матрици парова, а  $p_{pS1S2}$  представља пројекцију удаљености између две станице у равни азимута главне станице.

Ваљаност добијеног пара података се проверава у зависности од разлике вредности њихових параметра висине у односу на дозвољено одступање по висини (толеранције грешке,  $h_{gr}$ ), према следећем:

$$R_{1i}^* \cdot tg(B_{pi}) - [R_{2i}^* \cdot tg(B_{pj}) - (z_{S1} - z_{S2})] < h_{gr} \quad (44)$$

Нови параметар  $z$  означава надморску висину појединачних станица (у индексу  $z$  је ознака пара станица  $S_1$  и  $S_2$  у односу на чије векторе улазних података се врши процена удаљености).

Испуњавање услова једначине (44) значи, да је специфичан пар елемената векторских низова пронађен у различитим улазним низовима вектора, који се пореде да би се пронашао пар чији параметри одређују потенцијалну летелицу. Матрица парова је фиктивна матрица, која треба да се формира сукцесивно проверавањем упарености елемената векторских низова који се пореде. Уколико, пролазећи редом, векторски елемент једног векторског низа не може да се упари, он представља лажни аларм (и брише се). Уколико се пронађе одговарајући пар елемената у векторским низовима, који могу да се упаре, њихове координате се трансформишу у координате Декартовог координатног система и тако се сукцесивно формира низ излазног вектора података. Претраживање у матрици парова се смањује, с обзиром да се из низа са којим је поређен појединачни елемент другог низа, после уписа у излазни вектор података брише и неће се појавити током другог читања података. Ако постоји више летелица које заклањају једна другу и које описује актуелни векторски елемент поређења, током поређења са низом, који се контрахује, избациће при једном пролазу више елемената низа (уписаће све циљеве, који су се видели као заклоњени). С обзиром да се проблем посматра просторно (три пара станица у ћелији), услед „брисања“ једног елемента из низа са којим се пореди, неће доћи до губитка циљева који се за актуелни пар станица може појавити као вишеструки (да постоје низови летелица једних иза других и да ближа заклања остале), јер то неће бити случај за друга два пара станица. Излазни вектор се формира на нивоу ћелије дисјунктивном процедуром уврштавања векторских елемената препознатих циљева са све три станице у један низ. Тако се број пролаза кроз елементе матрице парова услед тестирања смањује (ефективно се у најгорем случају пролази кроз све елементе троугаоне матрице – број израчунавања је смањен на пола у најнеповољнијем случају) и ефективно добијамо димензионално контраховану дијагоналну матрицу парова у односу на полазну. Подаци постоје само за елементе дијагонале, која у суштини представља излазни векторски низ појединачне станице за дати тренутак упаривања података по једном скену. Када метод не би дозвољавао да се матрица димензионо смањује, после сваког успешног упаривања, имали бисмо потпуну сложеност, јер је број операција са нумеричким серијама квадратно зависан. То се одражава и на време израчунавања и на грешку (поготово код модела матричног рачуна са великим димензијама, где је поузданост доведена у питање у односу на нумеричке моделе израчунавања прилагођене рачунарима).

Уколико се води рачуна о понављању елемената свих парова станица током упоређивања њихових парцијалних излазних вектора, може се извршити и њихово пондерисање у смислу „видљивости“ у односу на осматрачке станице једне ћелије. Ако летелицу види само један пар, верификациони фактор  $T_p$  има вредност 1, а ако је виде сва три пара, вредност фактора је 3. Овај параметар је уведен ради одређених процена и сортирања података. С обзиром да се елементи излазног вектора формирају по дисјунктивном принципу, све што смо препознали као једнозначну вредност (координате циља без понављања) улази у елементе излазног низа вектора података ( $T_p = 1$ ), што је довољан критеријум по питању детекције. Коначни вектор излазних података се преноси у форми дефинисаној векторским низом (40).

Садржај теста за проверу симулационог нумеричког модела:

- Нумеричка процедура случајног генерисања Декартових координата летелица унутар подручја посматрања сензорске ћелије; максималан број летелица за претпостављени концепт је унапред дефинисан и треба да буде мањи од сто;

- Нумеричка процедура за расподелу координате летелица ка станицама, у зависности од вероватноће појаве лажног аларма;
- Нумеричка процедура случајног генерисања Декартових координата лажних објеката унутар подручја посматране сензорске ћелије, у зависности од вероватноће појаве лажног аларма (за сваку станицу сензорске ћелије); максимална вероватноћа лажног аларма по сензорској станици је 50%;
- Нумеричка процедура за трансформацију свих изабраних Декартових координата претпостављеног циља са лажним алармима у сферне за сваку од станица;
- Поступак формирања улазних вектора (без параметра удаљености) за сваку од станица;
- Одређивање тренутка покретања симулационог нумеричког модела за процену растојања применом триангулације на свакој станици;
- Мерење временских интервала у односу на тренутак покретања симулационог модела за извршење појединих фаза израчунавања током целог процеса; и
- Верификација излазних података (тј. провера валидности симулационог модела).

#### 5.4. Симулациони резултати

Постоји неколико математичких метода које могу бити прихватљиве за предпроцесирање и обраду детектованих сигнала параметара циља. Методе су различите сложености и често се за добијање одговарајућих резултата користи више од једне методе. Ово је важно из неколико разлога:

- комплексне природе података,
- изобличења због шума различитог порекла,
- различитих метода скенирања,
- утицаја временских услова, и
- ИЦ сигнатуре летелица, методологије праћења (статичка или динамичка) са различитим проценама.

Кључно је да се позиције летелица и даље процењују на основу меморисаних информација о тренутном и претходном стању (због аквизиције из примењеног облика претраживања сцене. Позиције покретних објеката се процењују упоредним узастопним линијама скенирања или на основу дозвољених атхеренција појединачних тачака слике познатих карактеристика. Најчешће се примењују следеће методе: линеарна метода најмањих квадрата, метод најмањег линеарног одступања квадрата, свођење на методу најмањих квадрата, метода максимума најмањих квадрата и метод најмањег квадратног одступања од средње вредности.

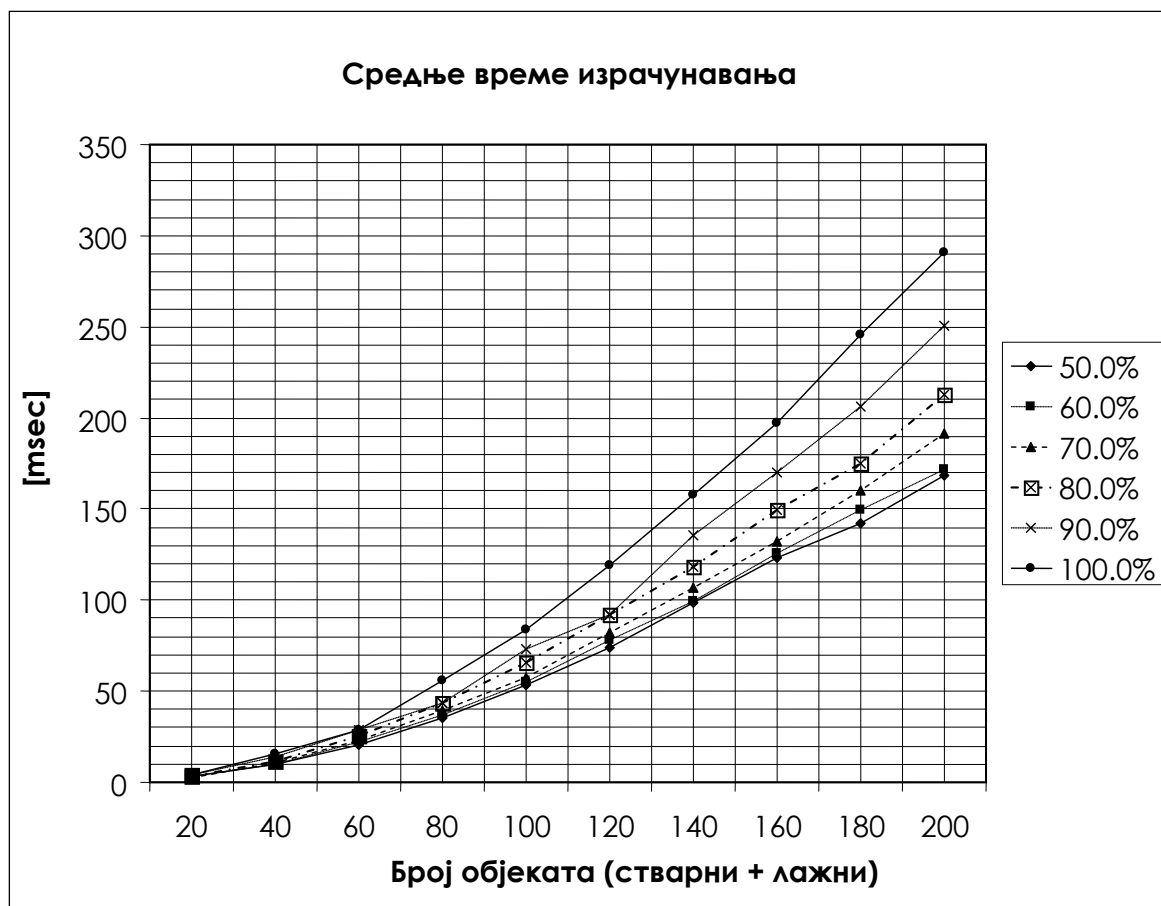
У нумеричкој симулацији, примењена је **метода најмањих квадрата**. Како је стварна зависност представљена трансформацијама координата, ова метода одређује оптималну линију и тиме се добија линеарна зависност нових координата.

Под претпостављеним условима, теоретски се процењује да је  $\sim 100$  максималан број летелица које могу бити захваћене у простору претраживања једне сензорске ћелије, без могућности судара. У симулацији је број потенцијалних циљева нумерички вариран до 200. У оквиру ове апликације, могуће је предвидети високе вредности броја присутних летелица, али то нема физичког смисла у односу на могући простор претраживања једне ћелије, јер судар постаје изван догађај, када број летелица премашује 100. На основу искуства, ранијих израчунавања и података у литератури закључујемо то да за борбени авион треба простор од  $7 \text{ km}$  до  $7 \text{ km}$  у равнини азимута, за све висине лета [2, 3, 41]. За

један пар авиона у лету, ради поједностављења израчунавања времена, може се усвојити простор од 10 km до 10 km за све висине лета.

Узимајући у обзир физички смисао лажних аларма, у овој процени, претпостављено је да је укупан број детектованих циљева и лажних аларма на свим станицама приближно исти. Само је вариран однос њихове заступљености у простору.

У табели 2 и на сл. 32 је приказано средње време потребно за израчунавање растојања и формирања излазног вектора података (у ms), у зависности од броја потенцијалних циљева и од вероватноће захвата циљева. За сваки избор варирано је 20 различитих типова података.



Сл.32. Графички приказ укупног времена потребног за формирање излазног вектора података [70]

Табела 2. Средње потребно време у ms за израчунавање растојања и формирање излазног вектора података [65]

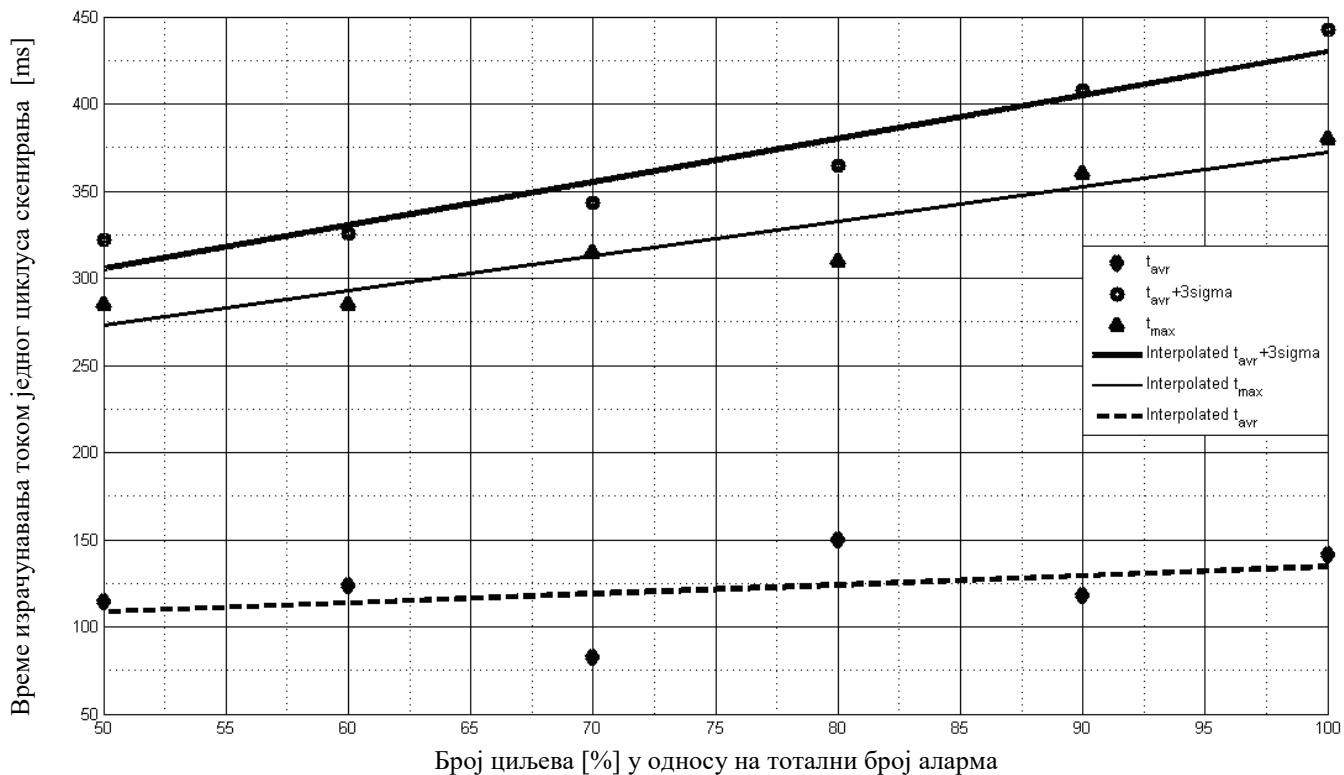
Израчунавање времена у [ms]		Вероватноћа захвата циљева у [%]					
		50	60	70	80	90	100
Варирање броја потенцијалних циљева	20	3.485	2.885	2.765	3.46	3.82	4.085
	40	9.995	10.25	11.025	11.91	13.65	15.4
	60	20.915	21.815	22.81	25.37	28.36	28.36
	80	35.105	36.77	39.405	43.47	43.47	55.525
	100	53.57	55.065	57.585	65.355	73.135	84.085
	120	73.605	77.78	82.335	92	92	119.43
	140	98.4	99.69	106.455	118.58	135.62	157.555
	160	123.04	125.955	132.115	149.805	169.77	197.375
	180	142.125	149.235	160.08	175.15	205.89	245.96
	200	168.025	171.605	191.41	212.755	250.78	290.75

Сprovedена метода израчунавања прогресивно смањује понављање програмских корака елиминацијом немогућих упаривања података, као и елиминацију упарених параметара у процесу формирања излазног вектора података. Иако, алгоритам зависи од количине и расподеле присутних циљева и лажног аларма, просечна времена израчунавања су увек краћа од свих симулираних вредности увећаних за  $3\sigma$ , где је  $\sigma$  стандардна девијација процењена Гаусовом методом расподеле за описани узорак.

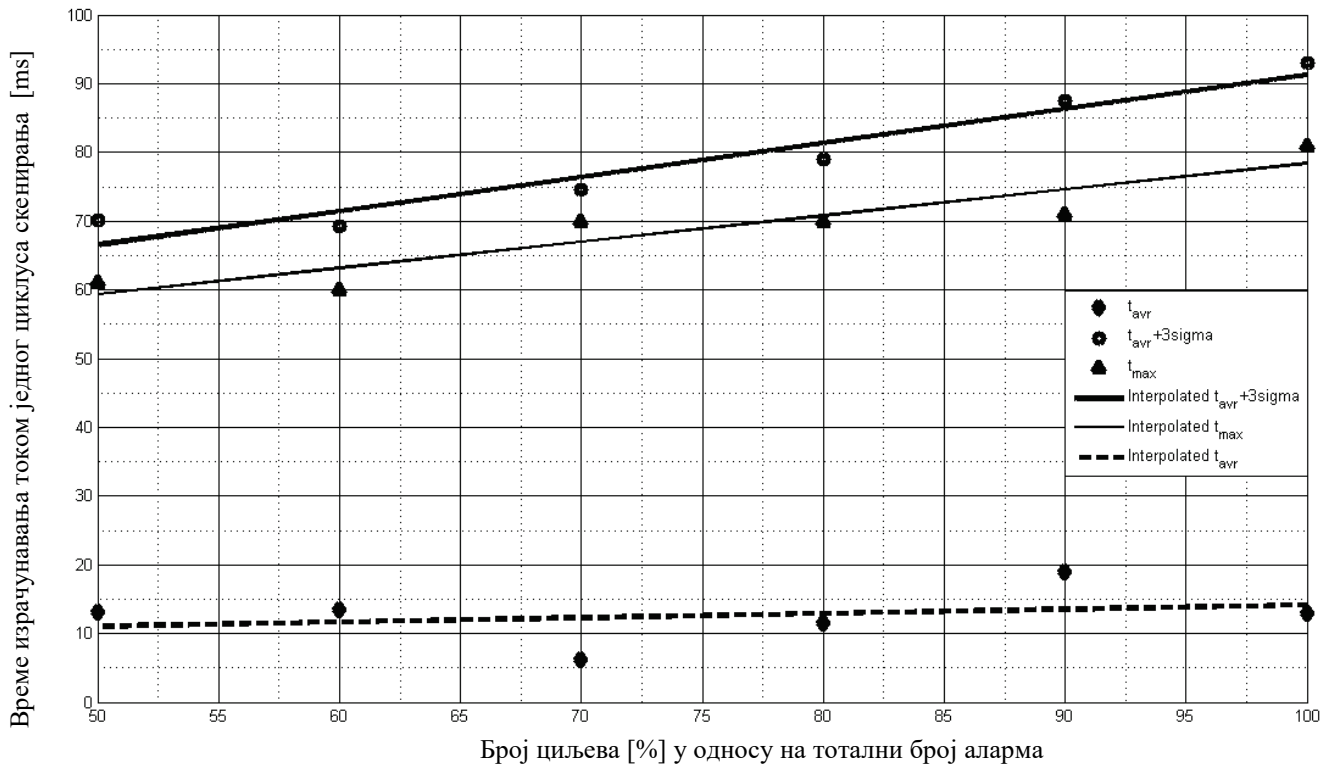
Са овим бројем узорака, помоћу  $3\sigma$  методе, односно додавањем  $3\sigma$  за просечно време триангулације, показано је да је максимална вредност израчунавања остварена са приказаним грешкама (термин грешка је употребљаван у складу са коришћеном литературом у овој области, не улазећи у дискусије мерненесигурности типа А и Б) у односу на максимална времена добијена од стране рачунара. Симулација се примењује на различитим врстама рачунарских платформи. Коришћени су рачунари са процесорима различитих генерација: Celeron (Intel Celeron CPU, clock 332.58, system bus clock 66.52), Pentium III (Intel Pentium III CPU, clock 840.56, system bus clock 98.89), AMD Sempron (AMD Sempron 2800+ CPU, clock 1584.94, system bus clock 198.23).

Резултати симулације са три компјутерске платформе, приказани су на сл. 33-35. За сваку од њих је приказана зависност максималног времена израчунавања у односу на проценат стварних циљева (200 циљева).

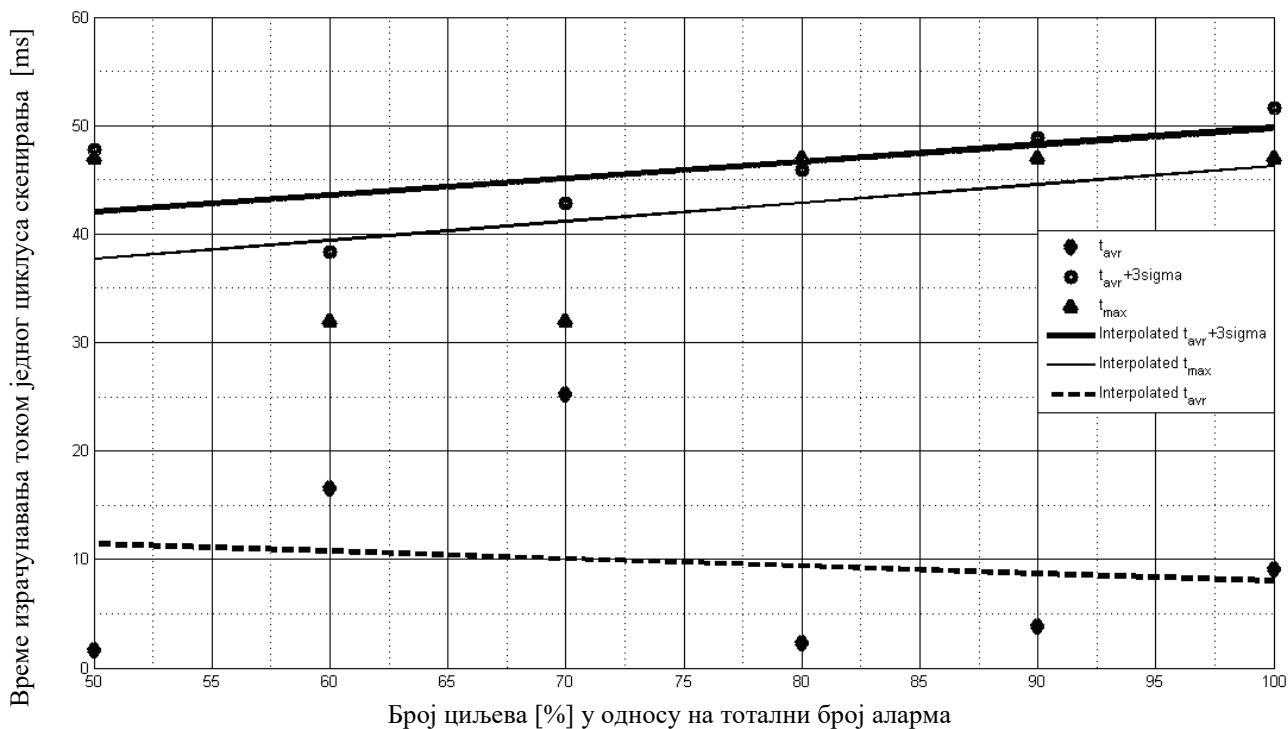




Сл.33. Зависност максималног времена израчунавања у односу на проценат стварних циљева (200 циљева за PII). [70]



Сл.34. Зависност максималног времена израчунавања у односу на проценат стварних циљева (200 циљева за РИИ). [70]

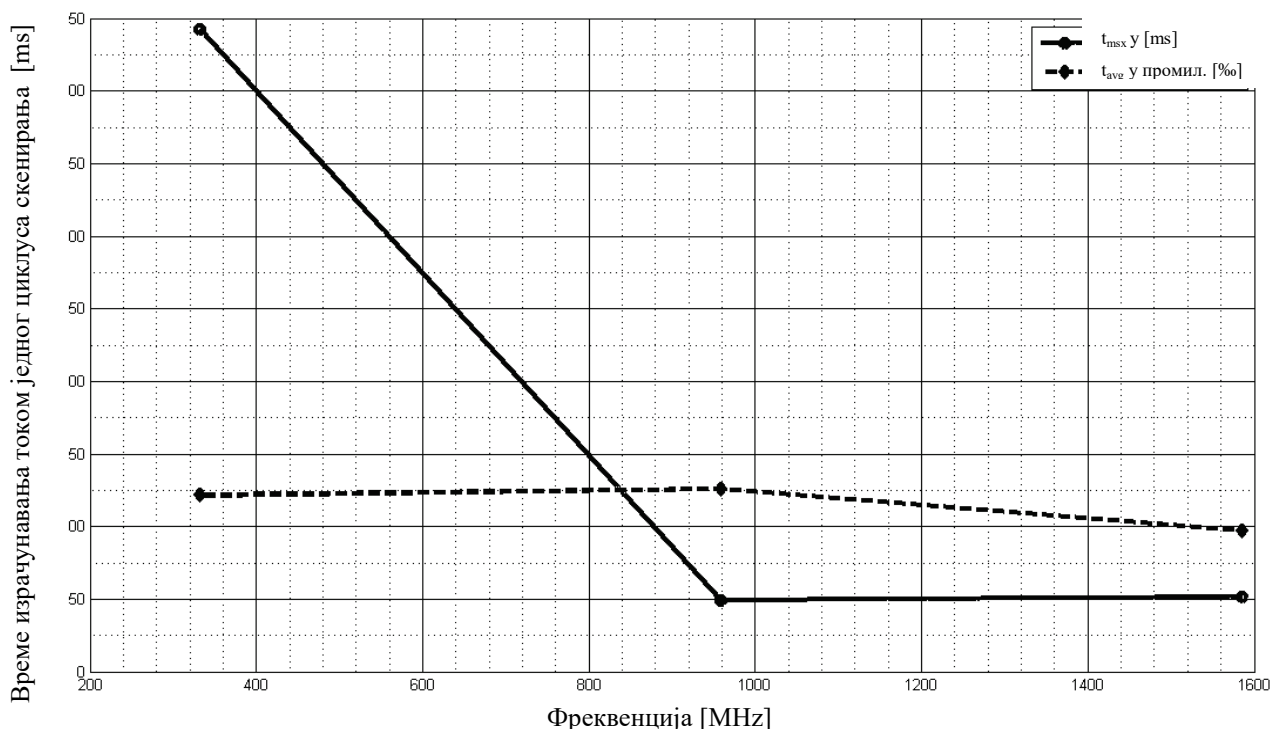


Сл.35. Зависност максималног времена израчунавања у односу на проценат стварних циљева (200 циљева за PIV). [70]

На сваком графикону (сл. 33, 34 и 35) је приказано време израчунавања по једном циклусу у зависности од процентуалног односа циљева прама укупном броју аларма. Доња крива представља просечно време свих симулација за дати процесор и за различит однос стварног броја циљева од укупног броја потенцијалних циљева, средња крива представља максимално време обраде циља за тренутни узорак, а горња крива представља средњу вредност симулираног узорака увећаног за  $3\sigma$ .

Дискретне тачке симулације са вероватноћама стварних циљева, у односу на укупан број аларма (стварни + лажни), тј. (20, 40, 60, 80, 100)%, се уводе на дати график, док су стварне нумеричке вредности добијене методом најмањих квадрата за одговарајуће тачке.

Спорији процесори захтевају више времена да би се добили поуздани подаци (сл. 36).



Сл.36. Зависност максималног времена израчунавања у односу на clock и тип процесора. [70]

Како се clock процесора повећава, време израчунавања се смањује готово линеарно, што је типично за процесоре од 800 MHz, због бржег израчунавања имплементираних процедура у софтверској симулацији. Даљим повећањем clock процесора, време израчунавања се не смањује. Ово је највероватније због засићења, где главни процеси троше много времена и постају стандардна комуникација са bus магистралом, са споријим компонентама рачунара и са другим периферним јединицама (тј. после сваке изведене симулације подаци се снимају на hard disk-у у облику ASCII file).

Крива добијених усредњених вредности тачних резултата практично је константна до clock-а од 800 MHz. Његова вредност се релативно смањује са повећањем clock-а, јер време за друге поступке током обраде података постаје занемарљиво.

Симулирани модел за израчунавање растојања захваћених циљева применом просторне триангулације не узима у обзир летелице које се виде унутар угла од  $5^\circ$  у односу на правац пројекције између две станице (где лежи  $p_{PSIS2}$ ). Параметри ових циљева се одређују другим паровима станица у оквиру сензорске ћелије. Дакле, грешка у одређивању удаљености циља је смањена. Следећа претпоставка нумеричког модела је да су грешке по висини и удаљености мање од 50 m. Сматра се да је време потребно да се простор претражи у једном прелазу (један скен) 1 s, док је минимално време одзива система (време од тренутка прве аквизиције циља до одзива крајњег корисника) мање од 7 s. Примењена апликација подразумева неопходне трансформације координата, као и њихово сортирање (по расту азимута, потом расту елевације).

Претпоставимо да постоји теоријска могућност бар једног лажног аларма за претражени простор у оквиру једног скена посматране сензорске ћелије након процеса просторне триангулације иако је ова вероватноћа мала. Вероватноћа да се исти догађај понови у следећем тренутку, после просторне триангулације следећег кадра, практично не постоји.

Постоји могућност да је број детектованих летелица мањи за бар једну, због заклањања од стране других летелица. У процесу континуиране просторне триангулације,

изведене за сваки скен, повећава се вероватноћа детекције таквог објекта (расподела објеката се динамички мења). Просторна триангулација приликом претраживања неба може да се користи за:

- праћење промена у атмосфери,
- праћење ваздушног саобраћаја,
- надзор заштићених објеката (зграда, подручје/ терен, итд.), и
- војне сврхе.

Од посебног је интереса примена ове методе у ваздушном саобраћају, где доприноси заштити од инцидената, без обзира на њихову природу (укључујући и намерне). Током редовног саобраћаја, летелице у зони претраживања се разликују по: величини, конструкцији, начину лета, приоритетима, важности терета (људи, робе ...), итд. Даљим разматрањем поменутог примера, очигледно је да сваки редовни лет има дозволу, одобрење, прецизно дефинисану линију лета, зону летења, дозвољена одступања од дефинисаних рута итд., што јесу елементи који улазе у препознавање позиције, планиране трајекторије лета и начине лета.

У случају наглог одступања летелице од предвиђене трајекторије лета, брза реакција је заиста потребна. Код савремених система осматрања, заштита од нежељених догађаја услед таквих одступања је релативно мала, јер је време реакције ових система веће од времена потребног да се инцидент догоди у ваздушном простору или ван њега (нпр. писта, стајанка). Концепт реакције који потискује могућност инцидента у територијалној области испод ваздушног простора који се посматра, претпоставља да је организација саобраћаја таква да су дозвољени летови (руте, зоне, итд.) удаљени од области објеката од посебног интереса, економских објеката и градских области. Над објектима од посебног друштвеног интереса, дозвољени су само посебни одобрени наменски летови, дефинисане трајекторије, са посебним средствима за идентификацију и контролу лета. Заштита објеката од посебног интереса предвиђа се КИС-ем за непосредну реакцију на претњу из ваздуха.

Други случај претпоставља појаву нежељене/ непознате летелице у зони осматрања. У овом случају, примена пасивног сензорског система КИС-а омогућава издвајање такве летелице на основу познатих трајекторија за дозвољене и одобрене летове, што јесте занимљиво и са становишта овог истраживања.

## 5.5. Резиме

Разматрани систем обезбеђује мерење сферних (угаоних) координата захваћених објеката, одређивање њихових удаљености од сензорске станице, трансформацију измерених и израчунатих координата објеката и њиховог тренутног праћења. Нажалост, доступност комерцијалних компоненти за интеграцију система осматрања, допушта софистицирано ометање ваздушног саобраћаја, како у зони осматрања, тако и ван ње.

## 6. ЗАКЉУЧАК

Термовизијски системи и савремена примена IRST система у оквиру сензорских мрежа за надзор су од великог значаја код многих система надзора у цивилној примени, као што су то различити видови саобраћаја, и истих за војне потребе. У војним применама, IRST системи су интегрисани у оквиру бродских, земаљских и ваздухопловних платформи. Од посебног интереса су асиметрични модели, који генерално укључују следеће факторе: виши ниво образовања становништва, његову равномерну распоређеност на територији земље, бројност и обученост резервног састава, величину земље, комуникационо-инфраструктурне мреже, рељеф, биљни покривач и метеоролошко климатске промене. Једно од тежишта савремених истраживања IRST система је откривање, праћење и класификација тачкастих објеката у високо структурираној позадини у оквиру претраживања ваздушног простора унутар дефинисане хемисфере и њене дубине.

Постоје у основи три међусобно повезане целине, код развоја и истраживања термовизијских уређаја, које је неопходно спровести да би развојни програм ових средстава био успешан. Прво је добро познавање ИЦ мете која је предмет детекције, па је стога неопходно формирати једноставан карактеристичан модел ИЦ сигнатуре објекта који се посматра. Потом је врло важно извршити целокупну карактеризацију IRST система с обзиром да је састављен од више делова. То се уобичајно ради применом модуларне преносне функције. На крају је од пресудне важности имати добар алгоритам за детекцију и издвајање објеката од интереса из снимљене позадине, добијене панорамским приказом посматране хемисфере. Ова дисертација даје допринос у све три ове области са посебним акцентом на оригиналност при формирању модела ИЦ сигнатуре мете и симулационог алгоритма за предфилтрирање термограма.

Анализом ИЦ сигнатуре зрачења и позадине неба у MWIR области усвојена је карактеристична површина мете авиона која се може еквивалентирати температуром одговарајућег апсолутно црног тела на основу познатих теоријских анализа, ИЦ мерења и интерпретације добијених мерних резултата за упоредно праћење ваздухоплова. Због симетрије и идентичних услова мерења унутар једног фрејма, могуће је пратити разлику температура под истим просторим углом на истим деловима површина две летелице које су мало смакнуте по правцу и повучене неколико километара једна од друге. У овим условима могуће је контролисати вредности испитиваних температура у односу на атмосферско слабљења за сваки појединачни фрејм који се анализира. Користећи овај приступ, дефинисан је поједностављени модел ИЦ одраза авиона који се може користити у системима/уређајима за посматрање. Модел је представљен са три специфична модела која се могу користити у различитим ситуацијама у зависности од циљне позиције и параметара летења, као и услова посматрања. Ови модели су веома корисни за формирање поузданог и ефикасног алгоритма за просторно и временско филтрирање ИЦ слика, што је веома важно за инфрацрвено претраживање и праћење IRST система.

Повезаност карактеристичних параметара IRST система је разрађена у трећем поглављу. Дати су оперативни захтеви од интереса за разматрани концепт у односу на: димензије видног поља и тренутног видног поља, време претраживања целокупне панорамске слике, високу температурну осетљивост у MWIR области, термовизијску слику високе резолуције у сложеној позадини, са вероватноћом захвата циља бољом од 0,95. Описане су системске карактеристике модела које се односе на уопштени концепт модела IRST система преко модуларних преносних функција свих подсистема за различите делове и усложњене подсистеме. Приказане су и системске карактеристике као што су:

шум еквивалентан температурној разлици, минимална разложива температурна разлика, као и минимална температурна разлика која се може детектовати за дефинисану вероватноћу перцепције и задати однос сигнал/шум.

Примењени симулациони нумерички програм са предфилтрирањем и посебно прилагођеном и примењеном триангулационом методом за формирање излазног вектора података омогућио је добијање информација са вероватноћом  $P = 0,82$ , у реалном времену. Примењена је сензорска мрежа базирана на IRST систему, који обезбеђује пасивну даљинску детекцију летелица на великим удаљеностима, малу вероватноћу грешке, високу поузданост, итд. Приказан је оптимални концепт структуре сензорске ћелије и потребно време за израчунавање координата летелице на нивоу исте. На рачунару РП остварено је време  $T < 1 s$  за формирање излазног вектора података, а на рачунару РIV,  $T < 1/10 s$ . Познато је да је потребно време за преношење информација о летелицама путем комуникационог канала са применом крипто-заштите  $T < 3 s$ , што показује да КИС може да обезбеди услове за реакцију система за време  $T < 7 s$ , што је изузетан резултат, имајући у виду да се очекује да процењено време реакције буде  $T < 13 s$ .

IRST уређаји и системи, током формирања панорамских слика, захтевају више времена за компензацију кашњења, а за обраду података су им неопходни значајни рачунарски ресурси и додатно CPU време. Показало се да је поступак просторно - временског предфилтрирања у каснијој обради слике од велике користи у укупним анализама динамичке сцене. Концепција нашег израчунавања заснива се на претпоставци да је максимални број потенцијалних циљева претходно дефинисан и да је вероватноћа лажних аларма између 0 и 50% (са кораком од 10%). За представљене статистичке природе резултата симулација, максималан број потенцијалних циљева износио је 200. За мањи број, симулација ради брже. Процена и избор од 200 потенцијалних циљева заснована је на прорачунима и мерењима различитих захваћених циљева (летелица) у реалном времену унутар зоне претраживања простора, што одговара максималном броју циљева које може да детектује једна сензорска ћелија (три пасивне осматрачке станице). Ово подразумева да није неопходно имати моћан процесор за такве апликације, јер би процесори са бржим clock-ом постали непрактични. Повећање clock-а не смањује време израчунавања, а са друге стране ови процесори су захтевнији у погледу потрошње енергије и више су осетљиви на електромагнетни шум. Стога је практично да се смањи clock брзих процесора, како би се смањила потрошња енергије и осетљивост на електромагнетни шум.

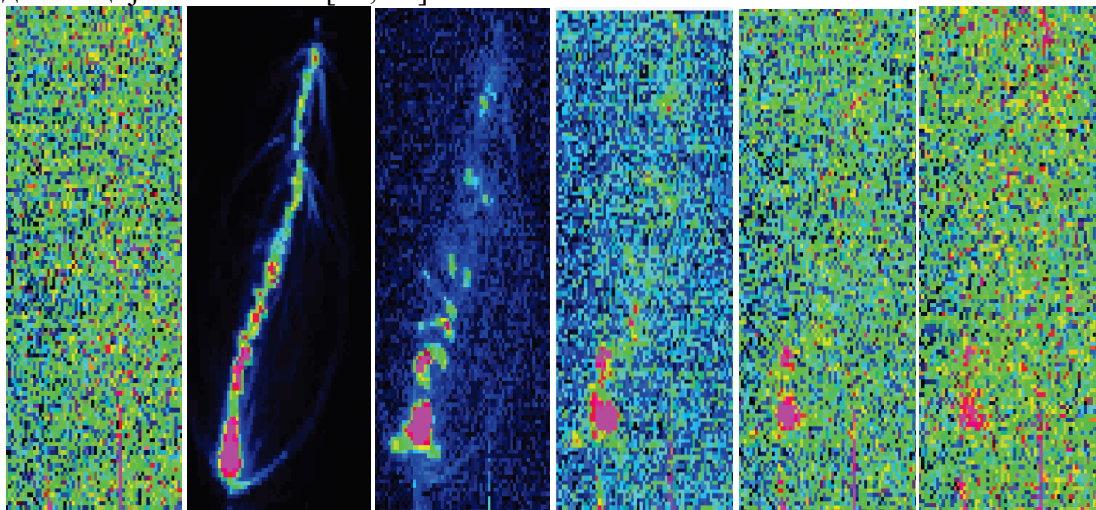
Применом симулационих нумеричких модела за предфилтрирање и процесирање секвенци ИЦ сцена термограма у реалном времену, потиснут је значајно лажни аларм. То је постигнуто праћењем сукцесивних фрејмова и применом приказаног модела са логичким и скуповним операцијама над дефинисаним областима суседства унутар текућег кадра и неколико наредних. Постојање већег броја објеката у зони суседства не спречава потврду о постојању мете, али зона суседства не разликује растојања до мете, због чега је неопходна примена методе триангулације.

Као главни допринос истиче се могућност брзе и ефикасне пасивне детекције различитих циљева у ваздуху. Издвојени циљеви на нивоу елементарне сензорске ћелије IRST система потврђују праћење групе од 90 летелица у реалном времену. На основу промене позиција између сукцесивних скенова, могуће је нумеричком симулацијом проценити њихове трајекторије, брзине, висине, формације у лету, облике маневра, а тиме, иако се ради о тачкастим циљевима, на основу ових података се може извршити класификација летелица (ловачки авион, бомбардер, хеликоптер, беспилотна летелица, итд.).

## 7. ПРИЛОЗИ

### 7.1. Прилог 1

Претходно извршена мерења краткотрајних високо-температурних промена изведена су у низу експеримената, који су се односили на снимање електричних пражњења изазваних високо напонским импулсима [28] и на мерење температуре током процеса детонације експлозива [89, 90]



Сл. П1-1 Шест сукцесивних фрејмова снимљених камером . FLIR SC 7200 [8]

Праћење пражњења изазваних високо напонским импулсима [Сл. П1-1] је обављено у циљу подешавања камере за праћење брзих температурних промена. Даља анализа се односила на синхронизацију других сензора, који су једновремено пратили феномен у различитим спектралним опсезима.

Праћење детонација изузетно брзих хемијских реакција услед којих се ослобађа велика количина топлоте (стварају се гасни продукти и долази до наглог скока притиска у средини где је она изазвана) је доста захтевније.

Термобарични експлозиви (ТВЕ, ТВХ), експлозиви повећаног разорно-рушећег дејства (ЕВХ - Enhanced Blast eXplosives), као и аеросолни експлозиви (FAE- fuel air explosives), представљају експлозивне саставе израженијег термичког и разорно-рушећег дејства (тзв. бласт ефекта) него што је случај код конвенционалних експлозива. Код ЕВХ је примарно дејство интензивног ударног таласа, док ТВЕ имају изражено дејство повећања температуре и притиска експлозије, у зависности од тога како сагорева горивна компонента експлозивне смеше након завршетка детонације. Код ЕВХ је реч о анаеробном сагоревању или сагоревању највећег дела горива у продуктима детонације. Код ТВЕ доминира реакција горива и кисеоника из ваздуха и из оксиданса. Експлозиви, као што су ТВЕ и ЕВХ стога обезбеђују много већу укупну енергију од конвенционалних експлозива. Главни део додатне топлотне енергије се користи за загревање гасне средине, а тиме и на јачање укупног импулса притиска ударног таласа (рушилачке моћи експлозива). Термобарични ефекат представља спој дејства повишеног притиска (разорно-рушећи, бласт-ефекат) и велике количине ослобођене топлотне енергије (високих температура и топлотног флукса).

Карактеристичан феномен код детонације ових експлозива је распршивање продуката детонације и неодреаговале горивне компоненте после детонације у околни ваздух.



Термобарична експлозија се одиграва у фазама: најпре се ослобађа облак запаљивих пара и честица метала (као нпр. мешавина фино спрашеног алуминијума и амонијум-перхлората), а потом се тај облак припаљује. Заправо, тако ваздух у области тог облака постаје једна огромна бомба. Није увек једноставно квантификовати интензитет термобаричног ефекта ових експлозива, испољен повећаним притиском и повишеном температуром, тј. ослобођеном топлотом у околини места детонације.

Део термобаричног ефекта који се испољава повећаним притиском у околини места детонације, успешно се прати мерењем параметара ударног таласа у ваздуху. Мерење надпритиска ударног таласа у ваздуху врши се пиезоелектричним давачима, а такође су у употреби фибер-оптички сензори притиска.

Механизам детонације термобаричних експлозива одвија се кроз три фазе:

- Почетна анаеробна реакција детонације (без учешћа кисеоника из ваздуха), односно декомпозиција експлозивне, везивне и оксидационе компоненте уз паљење и делимичну оксидацију алуминијума (или других метала у улози гориве компоненте) у детонационом таласу, трајања неколико микросекунди.
- Анаеробна реакција сагоревања Al, Mg или других метала, трајања неколико стотина микросекунди (оксидација честица метала исувише великих за сагоревање у таласу детонације).
- Постдетонациона аеробна реакција накнадног сагоревања горивих компоненти експлозивне смеше у струји продуката детонације у ваздуху, који се мешају са ваздухом загрејаним услед дејства ударног таласа, трајања неколико десетина милисекунди. Главни ефекат овог постдетонационог сагоревања је ослобађање велике количине топлоте, што подиже температуру и притисак гасова и поспешује ударни/рушећи талас.

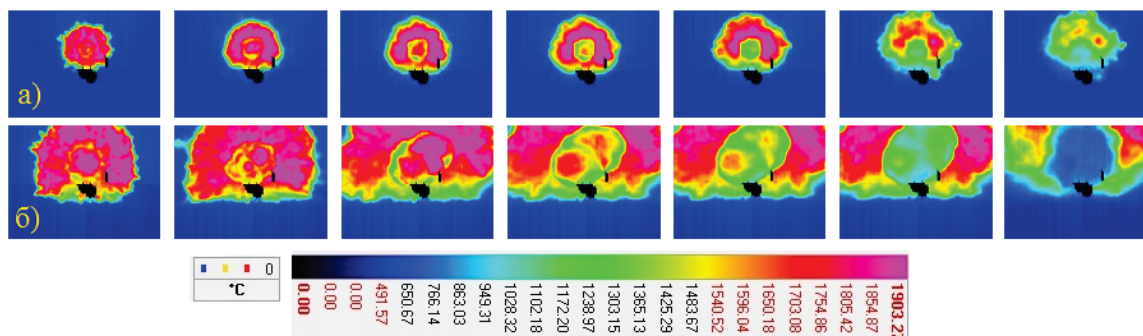
Уведена метода за квантификацију термалног ефекта детонације експлозивних материја помоћу термовизијске камере омогућила је сагледавање термалног ефекта [89] у другој и трећој фази термобаричне детонације:

- расподела температуре у простору око центра детонације, по одређеном – задатом правцу, што указује на домет термалног ефекта, и из добијених снимака и дијаграма се могу одредити величина и облик детонационог облака;
- расподела температуре у времену, што указује на трајање постдетонационог сагоревања гориве компоненте експлозива, а из дијаграма је могуће одредити температурни интеграл, за дефинисану граничну високу температуру, ради поређења различитих узорака,
- правци простирања продуката детонације и сагоревање горивне компоненте.

Велика количина топлотне енергије ослобођена реакцијом Al/Mg са примарним продуктима експлозије у постдетонационој анаеробној и аеробној реакцији одржава висок надпритисак ударног таласа за дужи временски период, што омогућава ефикасно уништавање материјалних добара и живе силе. Детонацијом ТВЕ пуњења генерише се ударни талас са мањом амплитудом почетног притиска, али му интензитет умереније опада у односу на бризантне експлозиве, што и доприноси увећању зоне ефикасног дејства.

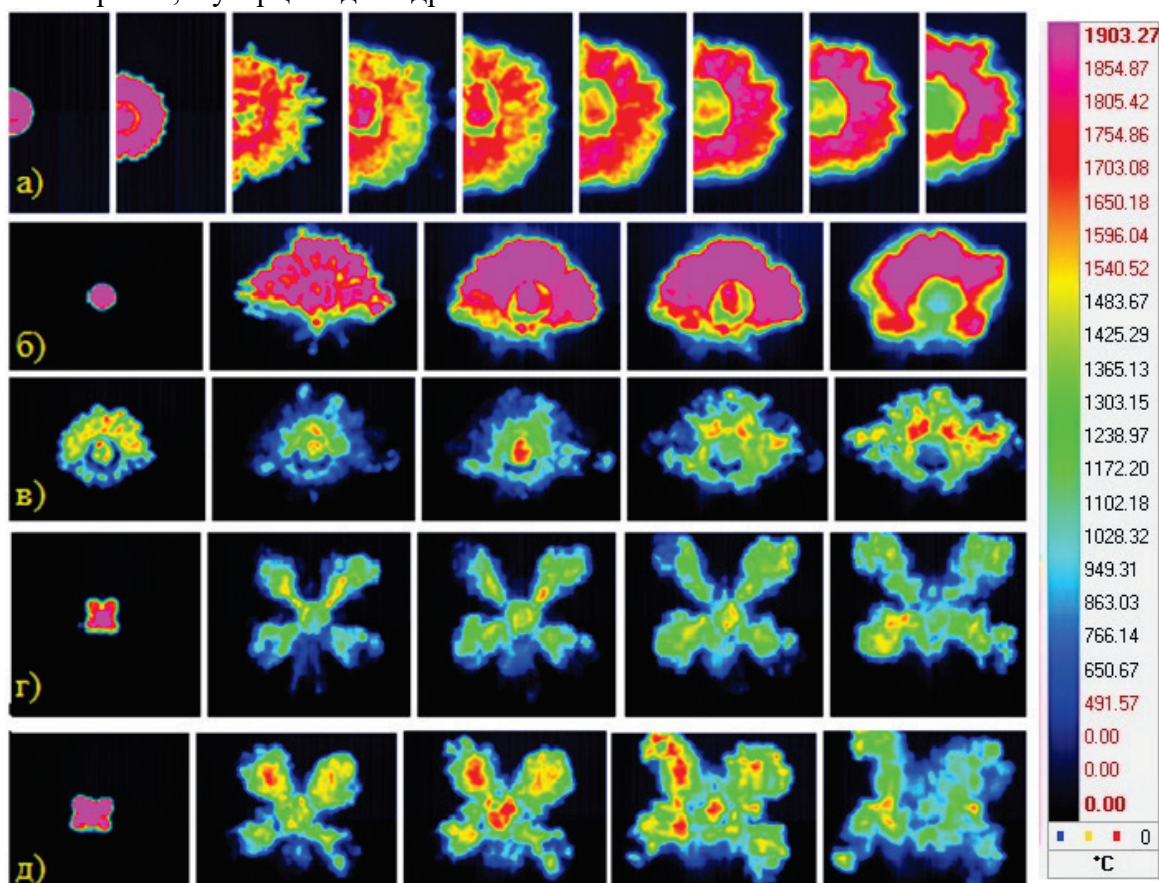
### 7.1.1. Облик и величина детонационог облака

Снимци регистровани термовизијском камером пружају увид у формирање детонационог облака – ватрене лопте, њен облик и величину, као и температуру. На ИЦ снимцима су топлије области присутне радијално од експлозивног узорка, у виду кружног прстена, и мали сферни/округли део у средини. У овим двома областима се заправо одвијају реакције постдетонационог сагоревања, где честице Al и Mg горе [Сл. П1-2].



Сл. П1-2. ИЦ снимци формирања и развоја детонационог облака ("ватрене лопте") за: а) 0,4 kg и б) 4 kg експлозива ТВЕ-1 [89]

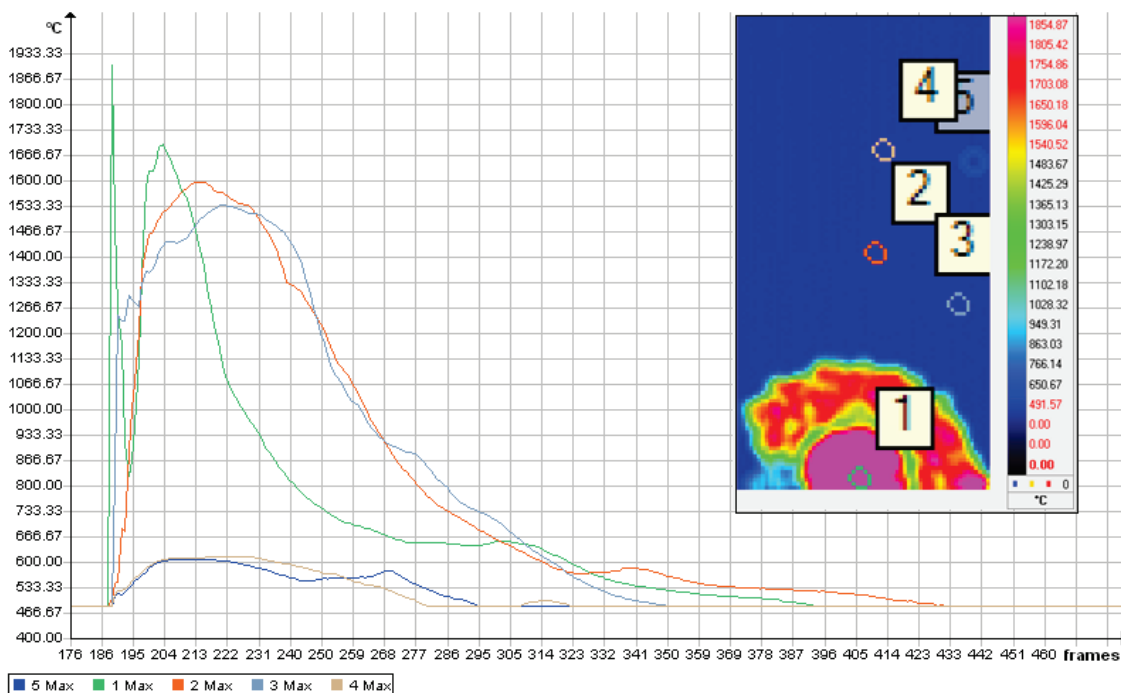
Сл. П1-3 јасно указује на разлику у топлоти која се ослобађа детонацијом термобаричног експлозива, и у облику детонационог облака – узорци а-в имају кружни попречни пресек, а узорци г-д квадратни.



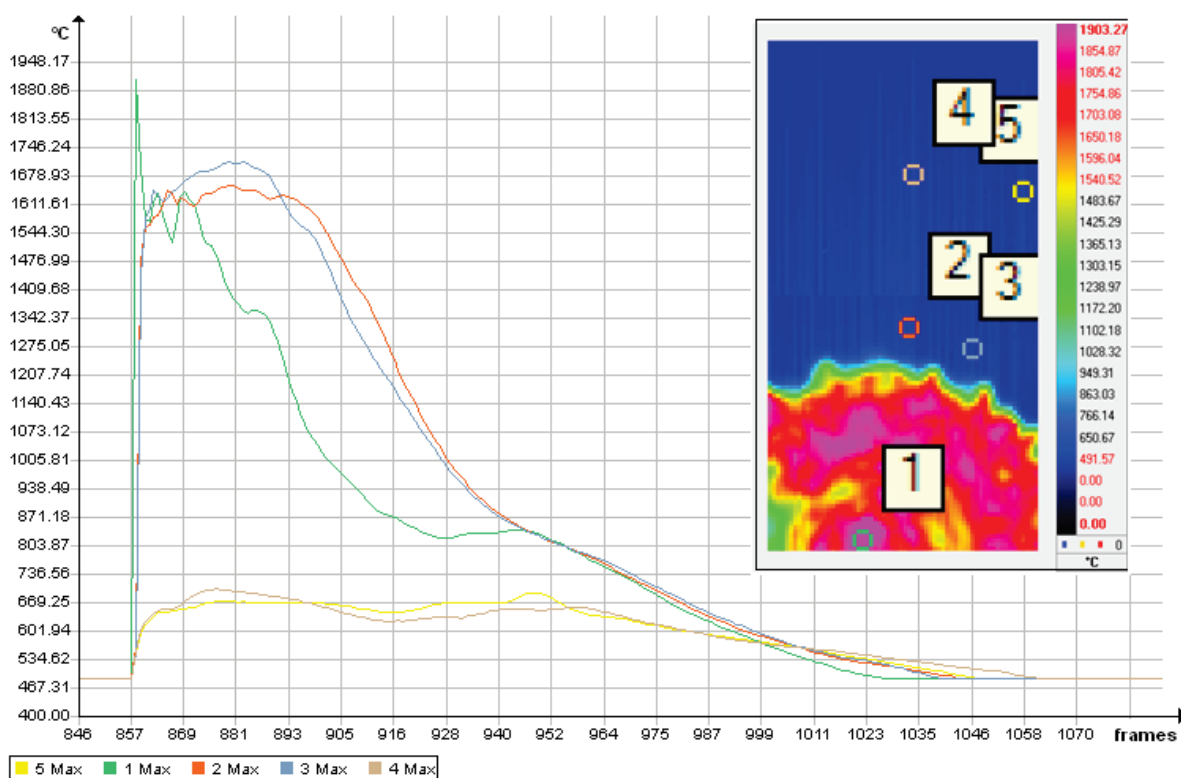
Сл. П1-3. ИЦ снимци формирања и развоја детонационог облака („ватрене лопте“) за 0,4 kg: а) и б) термобаричног РВХ састава ТВЕ-1, в) нетермобаричног РВХ (НМХ/НТРВ=85/15), з) С-4 и д) TNT [89]

### 7.1.2. Утицај састава-врсте експлозива на термални ефекат детонације

Осим разлике у бојама на снимцима, које су показатељ температуре, битно је и трајање повишене температуре при детонацији ТВЕ. На сликама П1-4 и П1-5 дате су промене температуре с временом за узорке TNT и ТВЕ-1 исте масе, и издвојени термограми са дефинисаним мерним областима, из којих се увиђа разлика у ефекту овакве две експлозије.



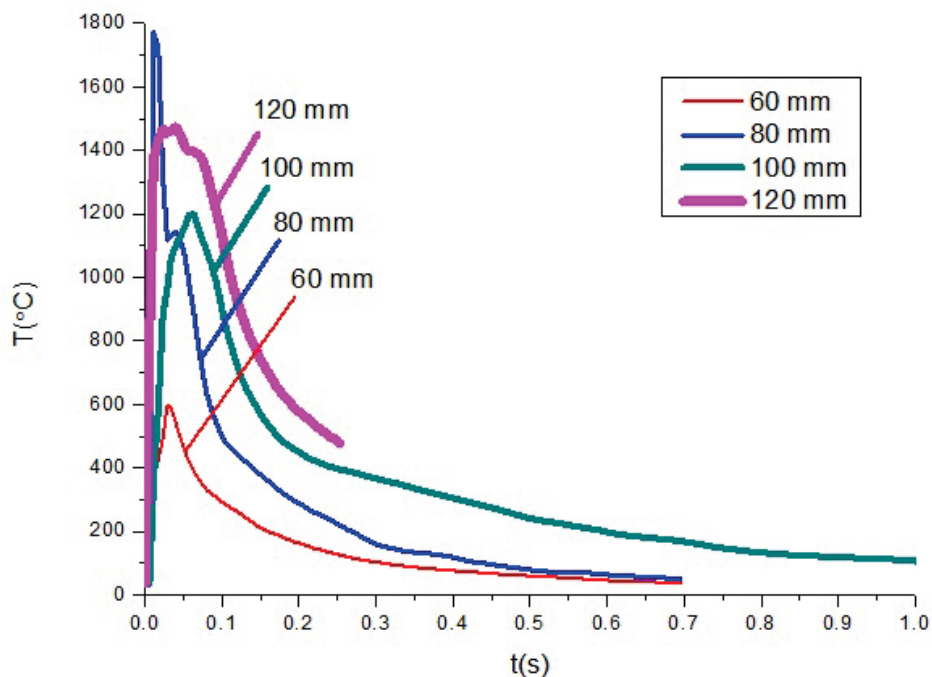
Сл. П1-4. Дијаграм промена температуре у мерној области (МО) –1,2,3,4,5 за узорак TNT 1500 g и издвојени термограм узорка, са изабраним МО (растојања међу МО:  $r_{12}=1,71m$ ,  $r_{13}=1,53m$ ,  $r_{14}=2,46m$ ,  $r_{15}=2,55m$ ; фреквенција снимања: 1478 Hz) [89]



Сл. П1-5. Промена температуре у МО –1,2,3,4,5 за 1500 g TBE-1 и издвојени термограм узорка, са изабраним МО (растојања међу МО:  $r_{12}=1,53m$ ,  $r_{13}=1,53m$ ,  $r_{14}=2,58m$ ,  $r_{15}=2,70m$ ; фреквенција снимања 1478 Hz) [89]

На дијаграмима приказаним на претходне две слике може се уочити одлично слагање резултата за мерне тачке које су на приближно једнаким растојањима од центра детонације. Снимци термовизијске камере указују на знатно дуже трајање постдетонационог сагоревања горива у комбинацији са оксидансом код термобаричних експлозивних узорака у односу на трајање детонационог разлагања тротила.

Резултујуће криве  $T-t$  за испитиване узорке различитих калибара, аналогно добијене, за мерно место на 2 m од центра експлозије упоређене су на Сл П1-6.



Сл. П1-6. Поређење кривих  $T-t$  за мерно место на 2 m од центра детонације ТВЕ [89]

Термални ефекат, посматран као интеграл функције  $T(^{\circ}\text{C}) - t(\text{s})$  (површина испод криве) драстично расте са порастом масе и пречника експлозивног пуњења. Максималне развијене температуре показују пораст са порастом пречника, односно масе експлозивног пуњења, нарочито на мерним местима ближим центру детонације и у кратком времену непосредно након детонације. Крива за ЕП Ф 120 mm на растојању 2 m је краћа од осталих јер није начињен снимак у обради термограма за ово пуњење. Само за ЕП Ф 50 и 80 mm криве на 2 m имају оштар максимум. Ово је последица стохастичке природе процеса експлозије и фреквенције снимања.

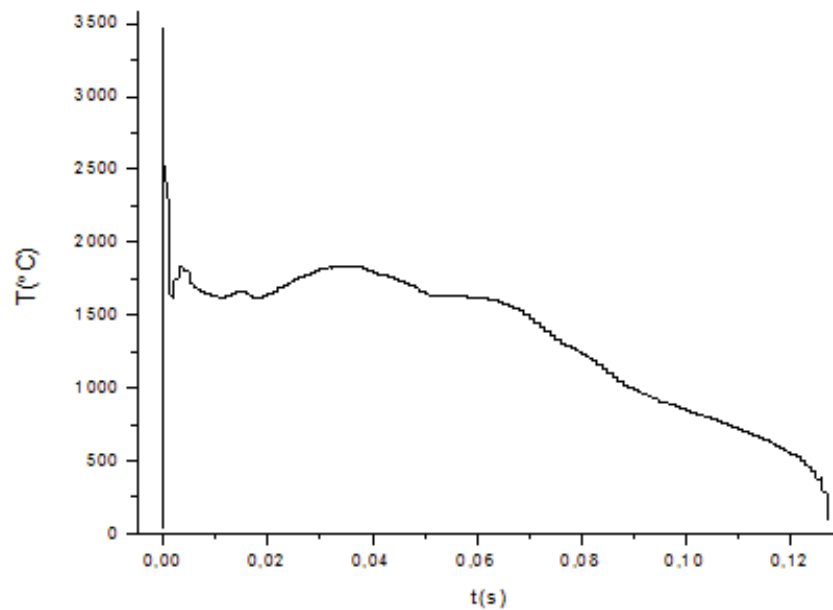
### 7.1.3. Одређивање температурног максимума

Да би се регистровала максимална температура термовизијском камером, потребно је снимати са што већом фреквенцијом, како би се ухватили почетни фрејмови детонације у којима се и постиже максимална температура. За експлозивно пуњење Ф 120 mm начињен је снимак при фреквенцији снимања од 5000 Hz (брзина фрејма 0.2 ms) али је видно поље значајно сужено тако да је једина тачка/мерна област која је узета за израду криве мерена температура-време на самом експлозиву [Сл П1-7].



Сл. П1-7. Други фрејм за пуњење радијуса 120 mm при фреквенцији 5 kHz [89]

Крива на Сл П1-8 показује да је регистровани максимум ( $T=3459^{\circ}\text{C}$ ) веома оштар у центру експлозије, тј. у самом експлозиву и остаје веома кратко у засићењу, што је и очекивано с обзиром да се температуре детонације овог типа експлозива крећу до  $4000^{\circ}\text{C}$ :



Сл. П1-8. Регистрована зависност  $T(^{\circ}\text{C}) - t(\text{s})$  за пуњење  $\Phi 120 \text{ mm}$  [89]

## 7.2. Прилог 2

ИЦ сигнатура авиона је анализирана и после упоредног праћења два авиона који лете истим брзинама и истим курсем паралелно померени међусобно око 10 m и у различитој дубини један иза другог, тако да се у оквиру видног поља мерног термовизијског уређаја виде два авиона (мерна камера SC 7200 FLIR), у условима чистог ноћног неба, уз стално праћење позиција оба авиона опто-теодолитским системима (SKYTRACK). Авиони су летели у и од правца посматрања камере (понирање / пропињање), са различитих висина, према једном захтеву, а према другом захтеву су летели на истим висинама за различите изабране карактеристичне позиције. Мерења је могуће извести условно и са једним авионом, који не мења параметре лета у току секвенце снимања и да се после тога пореде одговарајуће површине авиона које се виде под истим просторним углом за различите кадрове [31].

За исти видни угао посматрања одговарајућих делова површина на оба авиона, може се дефинисати:

$$E_{T1} = \tau_{a1} \cdot L_{Ti} \cdot \frac{S_{1i}}{D_{L1}^2} \quad (1)$$

$$E_{T2} = \tau_{a2} \cdot L_{Ti} \cdot \frac{S_{2i}}{D_{L2}^2}, \quad (2)$$

где су  $E_{T1}$  и  $E_{T2}$  ирадијансе појединих сегмената површине авиона,  $S_i$ , површине који се виде под истим видним углом, индекси 1 и 2 се односе на авионе са којих имамо ирадијансу,  $D_{L1}$  и  $D_{L2}$  представља удаљеност авиона од мерне термовизијске камере SC 7200 FLIR (која је спрегнута са једним од опто-теодолитских система SKYTRACK),  $\tau_{a1}$  и  $\tau_{a2}$ , трансимисије у правцу посматрања пара авиона и  $L_{Ti}$  радијансу појединих сегмената површина које се упоредно прате. Како посматрамо сегменте  $S_i$  под истим просторним углом, вредности:

$$\frac{S_{1i}}{D_{L1}^2} = \frac{S_{2i}}{D_{L2}^2} \quad (3)$$

су исте, па је:

$$\frac{E_{T1}}{E_{T2}} = \frac{\tau_{a1}}{\tau_{a2}} \quad (4)$$

односно:

$$\sigma = \frac{1}{D} \cdot \ln\left(\frac{E_{T1}}{E_{T2}}\right) \quad (5)$$

и

$$D = D_{L2} - D_{L1}, \quad (6)$$

где је  $D$  међусобно растојање два авиона, а  $\sigma$  се процењује.

За један пар одговарајућих изабраних површина, према горе наведеном критеријуму: за  $E_{T1} = 2,31 \text{ W/cm}^2$  и  $E_{T2} = 2,14 \text{ W/cm}^2$ ,  $D_{L1} = 0,8 \text{ km}$  и  $D_{L2} = 2 \text{ km}$  и авионе који се крећу истом брзином од 0,53 M на висини 1,5 km (хоризонталан лет), добија се  $\sigma = 0,06 \text{ km}^{-1}$ . Овај параметар се одржава за дати фрејм током измена сегмената површина, које се пореде, и са њиме се потврђује да ли се посматрају одговарајуће упарене површине (да ли за изабрано видно поље видимо циљану површину или је та површина подељена, па садржи неку другу ИЦ сигнатуру авиона или позадину). За добијено слабљење у наведеном примеру, могуће је

вратити се на једначине (1) и (2) и потврдити температуре на самој изабраној површини. У наведеном примеру, процењена температура на основу мерења износила је  $15,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а израчуната зауставна температура услед турбулентног вискозног кретања  $14,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  [31].

### 7.3. Прилог 3

Кратак опис поједностављеног развијеног нумеричког модела за предфилтрирање, који се користи у развијеној апликацији:

Creating a set of point

```
_ Function SetOfPoints
```

```
input: I, binary image
```

```
for each row in the image
```

```
  for every point in row
```

```
    if the difference of the color of the point to the reference color lower than epsilon
```

```
    then
```

```
      add (X,Y) point to the set 1
```

```
    end if
```

```
  end for
```

```
end for
```

```
_ End function
```

Finding the neighbor of a point with coordinates (X, Y)

```
_ Function FindingNeighbors
```

```
for each relative value of coordinates + -1 of X and Y
```

```
  determine if the (X1, Y1) point exists in set 1
```

```
  if present
```

```
  then
```

```
    add point (X1, Y1) to set 2
```

```
    delete point (X, Y) from set 1
```

```
  end if
```

```
end for
```

```
_ End function
```



## Object extraction

```
_ Function ObjectsExtraction
```

```
while (X, Y) point exists in set 1
  add objectnumber and (X, Y) point to set 3 FindingNeighbors
  delete point (X, Y) from set 1
  while (X1, Y1) point exists in set 2
    add objectnumber and (X1, Y1) point to set 3 and then delete from set 2
    FindingNeighbors
  end while
  objectnumber=objectnumber+1
end while
```

```
_ End function
```

## Consistency check

```
_ Function Consistency
```

```
for each frame from framenumbers- 4 to framenumbers
  for each point in set 3 of every frame
    check the connectivity of adjacent 5 frames (set intersection of dilated objects)
    if it exists in all frames then
      add a point from set 3 to set 4
    else
      false alarm
    end if
  end for
end for
```

```
_ End function
```

## Prefiltering

### **\_ Function Prefiltering**

```
while image I exists
  SetOfPoints
  ObjectExtraction
  If framenumber>4 then
    Consistency
  end if
  framenumber= framenumber+1
end while
```

### **\_ End function**

## Description of frame sets

### **\_ Description**

```
set 1 (X, Y)
set 2 (X, Y)
set 3 (objectnumber, X, Y)
set 4 (framenumber, objectnumber, X, Y)
```

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] B. G. Livada, Uticaj vode na primenu termovizijskih uređaja, Doktorska disertacija, Vojnotehnička akademija VJ Beograd, (2000)
- [2] S. B. Campana and J. S. Accetta, The Infrared and ElectroOptical Systems Handbook, Volume-5: Passive Electro-Optical Systems, SPIE Optical Engineering Press, Washington USA, (1993)
- [3] D. Knežević, Analiza parametara termovizijskih uređaja za detekciju ciljeva u vazduhu, Magistarska teza, ETF Univerziteta u Beogradu, (2001)
- [4] H. B. Srivastava, Y.B. Limbu, R.Saran, and A. Kumar, Airborne Infrared Search and Track Systems, Defence Science Journal, 57 (5), 739-753, (2007)
- [5] M. Ab-Rahman, M.R. Hassan, *Lock-on range of infrared heat seeker missile*, Proceedings of International Conference on Electrical Engineering and Informatics, Selangor, Malaysia, 472-477, (2009)
- [6] A. Clarke, The conceptual design of novel future UAV's incorporating advanced technology research components, PhD Thesis, Cranfield University, (2011)
- [7] J. S. Przemieniecki, Acquisition of Defense Systems, AIAA, Washington, (1993)
- [8] A. Redžimi, Prostorno-vremenska kalibracija sistema za analizu više kanalnih video i audio zapisa, Doktorska disertacija, Univerzitet odbrane u Beogradu, (2017)
- [9] D. Simić, U. Andjelić, D. Knežević, K. Savić, V. Draganić, R. Sirovatka, Lj. Tomić, *Thermobaric effects of cast composite explosive of different charge mass and dimensions*, Cent. European J. of Energ. Mat., 13, 161-182, (2016)
- [10] U. Andjelić, D. Simić, D. Knežević, M. Dević, *Visualizing the thermal effect of thermobaric explosives*, Proceedings of 7th International scientific conference on defensive technologies OTEH 2016, Belgrade, Serbia, 278-282, (2016)
- [11] D. Knežević, P. Matavulj, Z. Nikolić, *The possibility of an information processing in the IC picture*, Book of Abstracts of 9th Photonics Workshop, Kopaonik, Serbia, 3, (2016)
- [12] T. Mudrinic, Z. Nikolic, Z. Mojovic, Z. Cupic, A. Milutinovic-Nikolic, D. Jovanovic, *In situ videometry monitoring of bubble behavior during the electrocatalytic oxygen evolution reaction*, Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis, 115, 81-91, (2015)
- [13] G.V. Ivanov, V.G. Ivanov, *Temperature and emissivity determination of small-size long-range object's using staring thermovision cameras*, Infrared Physics and Technology, 60, 161-165, (2013)
- [14] V.P. Vavilov, D.D. Burleigh, *Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing*, NDT&E International, 73, 28-52, (2015)
- [15] T. Kruczek, *Use of infrared camera in energy diagnostics of the objects placed in open air space in particular at non-isothermal sky*, Energy, 91, 35-47, (2015)
- [16] D. Knežević, A. Redžimi, K. Mišković, D. Vasiljević, Z. Nikolić, J. Babić, Minimum resolvable temperature difference model, simulation, measurement and analysis, Quant. and Opt. Elec., 48, 332:1-7, (2016)
- [17] A. Redžimi, N. Jovanović, D. Knežević, Lj. Tomić, Numerical estimation of the noise equivalent temperature difference of the third generation thermal imagers, Proceedings of 1st IcETRAN, Vrnjačka Banja, Serbia, MOI3.1.1-4, (2014)
- [18] K. Savić, A. Redžimi, N. Jovanović, D. Knežević, *Numerical simulation of the black body radiation laws*, Proceedings of 1st IcETRAN, Vrnjačka Banja, Serbia, MOI3.2.1-5, (2014)
- [19] A. Redžimi, D. Knežević, K. Savić, N. Jovanović, M. Simović, D. Vasiljević, *Noise equivalent temperature difference model for thermal imagers, Calculation and analysis*, Scientific Technical Review, 64, 42-49, (2014)
- [20] Eurofighter Typhoon, Technical Guide, Issue 01-2013, Germany, (2013)
- [21] M.G. Chun, S.G. Kong, *Focusing in thermal imagery using morphological gradient operator*, Pattern Recognition Letters, 38, 20-25, (2014)
- [22] G.A. Bilodeau, A. Torabi, F. Morin, *Visible and infrared image registration using trajectories and composite*, Image and Vision Computing, 29, 41-50, (2011)

- [23] C. Yang, H. Liu, S. Liao, S. Wang, *Small target detection in infrared video sequence using robust dictionary learning*, Infrared Physics and Technology, 68, 1–9, (2015)
- [24] В. Симић, Инфрацрвено зрачење и његова примена у ракетној техници, Војноиздавачки завод, Београд, (1968)
- [25] Б. Ливада, Могућности противелектронског обезбеђења у области примене термовизијских уређаја и система, ВТИ 019-11.0158, Београд, (1994)
- [26] E.E. Bell, L. Eisner, J. Young, R. A. Oetjen, *Spectral Radiance of Sky and Terrain at Wavelengths between 1 and 20 Microns. II. Sky Measurements*, JOSA, Vol. 50, No. 12, 1313–1320, (1960)
- [27] L. Eisner, E.E. Bell, J. Young, R. A. Oetjen, *Spectral Radiance of Sky and Terrain at Wavelengths between 1 and 20  $\mu$ . III. Terrain Measurements*, JOSA, Vol. 52, No. 2, 201–209, (1962)
- [28] D.F. Flanigan, A.C. Samuels, C. Zhu, F. D’Amico, *Noise, clutter, and determinism in infrared spectral signatures under varying meteorological conditions*, Applied Optics, Vol. 45, No. 4, 799–808, (2006)
- [29] D. Knežević, P. Matavulj, Z. Nikolić, *Preprocessing of digital thermal images on the basis of logical sets and sets of operations*, submitted
- [30] Shahid B., *Low-Cost Pc-Based High-Fidelity Infrared Signature Modelling And Simulation*, Phd Thesis, Cranfield University, (2007)
- [31] D.M. Knežević, P.S. Matavulj, Z.M. Nikolić, *Modeling of aircraft infrared signature based on comparative tracking*, Optik, vol. 225, 165782 (7p), (2021)
- [32] J.R. White, *Aircraft Infrared Principles, Signatures, Threats, and Countermeasures*, Naval Air Warfare Center Weapons Division, Technical publication, (NAWCWD TP), 8773, (2012)
- [33] Hermann S., *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill Book Company, Inc., (1960)
- [34] Arnold M.K., Chuen Y.C., *Fundamentals of Aerodynamics: Bases of Aerodynamic Design*, John Wiley & Sons., (1977)
- [35] R.D. Hudson, *Infrared System Engineering*, John Wiley & Sons.Inc, New York, London, Sydney (1969)
- [36] F. F. Hall, *A Physical Model of Cirrus 8–13- $\mu$  Infrared*, Applied Optics, Vol. 7, No. 11, 2264–2269, (1968)
- [37] Д. Кнежевић, Физичко хемијски процеси на устима ватреног оруђа, Дипломски рад, Електротехнички факултет Универзитета у Београду, Београд (1996)
- [38] М. Срећковић, Р. Радовановић, А. Милосављевић, С. Јаћимовски, Ласерске технике и метрологија у форензичким наукама, део II глава VIII, Термовизијски нишан, 267-277, део III глава II, Биометријске методе за идентификацију људи, 299-319, Београд, (2017) (ISBN: 978-86-7466-658-6)
- [39] M. Koli, *Development of Military Technology, and Its Impact on the Finnish Land Warfare Doctrine*, Helsinki, War College, (1992)
- [40] В. Филипо и др., Системи командовања и управљања и њихов утицај на безбедност Италије, превод и техничка обрада ВП 1122-59 Београд.
- [41] K. Seyrafi., S.A. Hovanessian., *Introduction to Electro – Optical Imaging and Targeting Systems*, Artech House Optoelectronic Library, (1993)
- [42] G.C. Holst, *Electro – optical Imaging System Performance*, SPIE, (1995)
- [43] L.M. Biberman, *Electro – Optical Imaging System Performance and Modeling*, SPIE, (2000)
- [44] J.M.Loyd, *Thermal imaging System*, Plenum Press, New York, (1975)
- [45] Ж. Госсорг, Инфракрасная термография, МИР, Москва, (1988)
- [46] J.B. Goodell., G.L. Harvey. et al., *The Fundamentals of Thermal Imaging Systems*, NTIS ADA/073763, (1979)
- [47] L.I. Schiff., *Quantum mechanics*, McGraw-Hill, New York, (1968)
- [48] J.A. Ratches et al. ,*Night Vision Laboratory Static Performance Model for Thermal Viewing Systems*, Army Electronics Comand Fort Monmount, New Yersey, NTIS AD-A/011212, (1975)
- [49] D. Knežević, *Satellite thermal imaging application in remote sensing and tacking of earth changes*, Proceedings of 1st Mediterranean Conference on Earth Observation (Remote Sensing), MeCEO2004, Belgrade, Serbia, 19-25, (2004)
- [50] C.E. Cafer, J. Silverman, J.M. Mooney, *Optimisation of point target Optimisation of point target tracking filters*, IEEE Trans. Aero. Elect. Syst., 36(1), 15-25, (2000)

- [51] W.L. New, M.H. Er, V. Ronda, New method for detection of dim point-targets in infrared images, Proceedings SPIE, 3809, 141- 50, (1999)
- [52] G. Hower; W. Kuo, C. Kenney, G. Hanson, , J. Uobinchak, Detection of small IR objects using wavelets, matched subspace detectors, and registration. Signal and data processing of small targets, Proceedings SPIE, 4728, 12-23. (2002)
- [53] M.A. Zaveri, A. Malewar, S.N. Merchant, U.B. Desai, Wavelet-based detection and modified pipeline algorithm for multiple point targets in infrared image sequences, In ICVGIP, (2002)
- [54] F.Y. Hsieh, C.C. Han, N.S. Wu, K.C. Fan, A novel approach to noise removal and detection of small objects with low contrast, [www.fox1.csie.ncu.edu.tw/~Syncanph/paper/detection-wiamis04.pdf](http://www.fox1.csie.ncu.edu.tw/~Syncanph/paper/detection-wiamis04.pdf).
- [55] S. Buganim, S.R. Rotman, Matched filters for multispectral point target detection, Proceedings SPIE, 6302, (2006)
- [56] S. Adar, S. Buganim, S.R. Rotman, Analysing point target detection algorithms, Proceedings SPIE, 5987, (2005)
- [57] L. Varsano, S.R. Rotman, Point target tracking in hyperspectral images, Proceedings SPIE, 5806, 503-10, (2005)
- [58] S. Qi., D. Ming, J. Ma, X. Sun, J. Tian, Robust method for infrared small-target detection based on Boolean map visual theory, Applied Optics, Vol. 53, No. 18, 3929–3940, (2014)
- [59] M. de Visser, P.U.W. Schwing, J.F. de Groot, E.A. Hendriks, Passive ranging using an infrared search and track sensor, Optical Engineering, 45(2), (2006)
- [60] M. Abramowitz, I.A. Stegun, Handbook of Mathematical Functions, (Wiley – Interscience, New York, 1993.)
- [61] G. Arfken, Mathematical Methods For Physicists, Academic Press, New York, 1966
- [62] M.M. Laban, Three general principles in mathematical modeling, monograph, Serbian official publishing company for textbooks and teaching aids, Belgrade, (2000)
- [63] J. S. Przemieniecki, Mathematical Methods in Defense Analyses, AIAA, Washington, (1990)
- [64] S. Sharma, P. Banerjee, Effect of errors in position coordinates of the receiving antenna on single satellite GPS timing , Indian J Pure & Appl Phys, 48, 429-434, (2010)
- [65] D. Knežević, M. Srećković, S. Kočinac, V. Ibrahimović, *The application of spatial triangulation for instantaneous tracking of flying objects in specified area*, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara – J. of Eng, 5, 93-104, (2007)
- [66] M. Dimitrijević, D. Knežević, S. Šambina, A. Čučaković, M. Srećković, *Removal of false targets in the issues of spatial triangulation by projective (descriptive) geometry methods*, Struct. Mech. of Engin. Const. and Build., 3, 1-11, (2013)
- [67] N.K. Jaiswal, Military Operations Research: Quantitative Decision Making, Kluwe Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London, (1997)
- [68] S. Zeghib, S. Bouzid, A. Chaabi, M.R. Latrous, Detection of the distribution of size of the desert aerosols by multispectral method LIDAR (UV to IR) by using genetic algorithms, compared with Longtin's model, Indian J Pure & Appl Phys, 51(1), 26-32, (2013)
- [69] D. Ghosh, A. Deb, S. Biswas, R. Sarkar, Multiplicity dependent pion azimuthal fluctuation study with factorial correlator, Indian J Pure & Appl Phys, 51(3), 156-163, (2013)
- [70] D. Knežević, M. Dragović, M. Srećković, V. Ibrahimović, A. Kovačević, Numerical complexity of real-time tracking of objects in defined space by infrared optoelectronic devices, Indian J. Pure and Appl. Phys., vol. 52, pp. 457-464, 2014.
- [71] D. Ugarak, M. Milinović, Error and noise analyses and their influence on the air target tracking and coordinates estimation, Scientific Technical Review, LVIII/1 (2003)
- [72] H.A.P. Blom, Y.Bar-Shalom, The interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients, IEEE Trans. Automatic Control, 33, 780-783 (1988)
- [73] Z. Radosavljević, Gradient Based Model Probability Interacting Multiple Model Algorithm, Scientific Technical Review, LVIII/3-4, LVIII/1 (2008)
- [74] B. Kovačević, Ž. Đurović, Fundamentals of Stochastic Signals, Systems and Estimation Theory with Worked Examples, Springer, Berlin & Academic Mind, Belgrade, (2008)
- [75] M.M. Bykov, S.V. Tyurin, A.V. Glinyanyi, V.A. Romanyuk, Hardly noticeable target location and identification by lidar methods, Telecommunications and Radio Engineering, 57(10-11), 96-100, (2002)

- [76] G.A. Page, B.D. Carroll, A. Pratt, P.N. Randall, Long-range target detection algorithms for infrared search and track, Proceedings of the SPIE, 3698, 48-57, (1999)
- [77] L. Hua, W. Yongsheng, G. Chunjie, Research on optical system of airborne infrared search and tracking with staring array sensor, Proceedings of the SPIE, 4927, 838-46, (2002)
- [78] D.J. Clarke, P.N. Randall, Infrared Search and Track Technology Demonstrator Programme, Proceedings of the SPIE, 3061, 533-43, (1997)
- [79] S.S. Blackman, R.J. Dempster; S.H. Roszkowski; D.M. Sasaki, P.F. Singer, Improved tracking capability and efficient radar allocation through the fusion of radar and infrared search-and-track observations, Optical Engineering, 39(5), 1391-1398, (2000)
- [80] М. Драговић, Конструктивни поступци у просторним координатним трансформацијама површи једнограног елиптичког хиперboloида, Докторска дисертација, Архитектонски факултет Универзитета у Београду, 2013.
- [81] Y.M. Astapov, D.V. Vasilev, Y.I. Zalozhnev, The theory of optoelectronic tracking systems, Nauka, Moscow, Russian, (1988)
- [82] P.L Bogler, Radar Principles with Applications to Tracking Systems, J Wiley, New York, 1990.
- [83] J. Manley, R. DeMers, J. Jelinek, M. Rhodes, et al., LDART – A large scale network of embedded systems for laser detection and reciprocal targeting, IEEE High Performance Extreme Computing Conference, Waltham, MA, USA, (2013)
- [84] E. Waltz, Data fusion for C3I: A tutorial, in Command, Control, Communications Intelligence (C3I), EW Communications, Handbook, Palo Alto, CA, 217-226, (1986)
- [85] D. Meister, Discrete Appl Math, 146(3), 193-218, (2005)
- [86] L. Rueda, D. Mery, J. Kittler, Progress in pattern recognition, image analysis and applications, CIARP 2007, Valpariso, Chile, (2007)
- [87] K. Jäger, M. Hebel, K. Bers, Automatic Target Recognition XIV , Proc. SPIE, 5426, 37-45,(2004)
- [88] M. Maurer, System and method using triangulation with RF/LF and infrared devices for tracking objects, US Patent 7180420B2, MGM Computer Systems, Inc., Woodbury, NJ, US, (2004)
- [89] Д. Симић, У. Анђелић, Д. Кнежевић, К. Мишковић, *Метода за квантификацију тоplotног ефекта детонације експлозивних материја термовизијом*, Решењем Управе за стратегијско планирање Сектора за политику одбране Министарства одбране П број 77-7 од 03.08.2017. год., прихвата се нова метода као Техничко унапређење под ознаком ТУ-48.
- [90] Д. Симић, *Балистички хибридни нанокомпозитни материјали ојачани неорганским фулеренима*, Докторска дисертација, Универзитет у Београду, Технолошко – металуршки факултет, Београд, (2017)

## ЛИСТА СЛИКА

Сл. 1 Температурна зависност слојева атмосфере са углом елевације у дневним условима [29] .....	7
Сл. 2 Температурна зависност слојева атмосфере са углом елевације у ноћним условима [29].....	8
Сл. 3 Температурна зависност слојева атмосфере са углом елевације у дневним и ноћним условима [29].....	8
Сл. 4 а) Термовизијски снимак авиона у лету, и б) Термовизијски снимак емисионих површина авиона са мерним линијама преко његових чврстих површина [31] .....	10
Сл.5. Просторна расподела температуре која одговара радијанси за мерне линије на сл. 1б) [31].....	11
Сл.6 Просторни профил температуре мерен иза млазнице [31]. .....	14
Сл. 7 а) Највећи део продуката сагоревања транспортног авиона посматран под углом из задње хемисфере – кадар термовизијског снимка, и б) Одговарајући временски дијаграм који прати максималну промену температуре продуката сагоревања [31].....	15
Сл. 8 а) Кадар термовизијског снимка са мерним линијама за процену просторне расподеле температуре за други транспортни авион, и б) Профил просторне расподеле температуре према мерним линијама на слици а) [31].....	16
Сл. 9 а) Кадар термовизијског снимка са мерним линијама б) Профил просторне расподеле температуре према мерним линијама на слици а). .....	17
Сл. 10 а) Кадар термовизијског снимка са мерном линијом, и б) Профил просторне расподеле температуре према мерној линији на слици а).....	18
Сл. 11 а) Кадар термовизијског снимка са мерном линијом дуж млаза продуката сагоревања бочно, и б) Профил просторне расподеле температуре према мерној линији на слици а) [31]. .....	19
Сл. 12 а) Кадар термовизијског снимка са мерним линијама дуж млаза продуката сагоревања, и ....	20
б) Профил просторне расподеле температуре према мерним линијама на слици а). .....	20
Сл. 13 а) Кадар термовизијског снимка са мерном линијом, и б) Профил просторне расподеле температуре према мерној линији на слици а).....	21
Сл. 14 Приказ расподеле зрачења за извор одређене температуре без утицаја емисивности, $M(T_1)$ , са утицајем емисивности, $\epsilon M(T_1)$ и расподелом извора АЦТ еквивалентног укупног зрачења, $\epsilon M(T_1) = M_{ef}(T_2)$ , $T_1 > T_2$ .....	29
Сл. 15 Приказ Блок дијаграм система IRST .....	33
Сл.16 $MTF_{dif}$ у односу на релативну промену просторне учестаности .....	36
Сл.17 Промена $MTF_{dif}$ у односу на просторну учестаност за различите просторне граничне фреквенције .....	37
Сл.18 Промена $MTF_{aber}$ у односу на просторну учестаност за различите димензија дијаметра блура	38
Сл.19 Промена $MTF_{opt}$ у односу на просторну учестаност за фиксирану $MTF_{dif}$ и $MTF_{aber}$ за различите димензија дијаметра блура.....	39
Сл.20 Промена $MTF_{opt}$ у односу на просторну учестаност за фиксирану $MTF_{aber}$ и $MTF_{dif}$ за различите просторне граничне фреквенције .....	39
Сл.21. Сукцесивни фрејмови са детектованим тачкама [29].....	47
Сл.22. Број детектованих пиксела по кадру у зависности од CTV у релативним јединицама [рел.јед.] мерено са контрастом у резолуцији од 8 бита [31].....	52
Сл.23. Зависност учестаности слика од CTV за IFOV 0,5mrad са и без временског филтрирања [31].	53
Сл.24. Број откривених објеката у односу на CTV за IFOV 0,5mrad са и без временског филтрирања [31].....	54
Сл.25. Зависност брзине промене кадрова од броја детектованих објеката са и без временског филтрирања [31].....	55
Сл.26. Зависност брзине промене кадрова од CTV за IFOV 0,5mrad и IFOV 0,2mrad са временским филтрирањем [31] .....	56
Сл.27. Зависност броја детектованих објеката од CTV после просторног и временског предфилтрирања [31].....	57
Сл.28. Зависност броја детектованих објеката од детектованих пиксела по фрејму после просторног и временског предфилтрирања [31] .....	58

Сл.29. Зависност брзине промене кадрова од броја детектованих објеката након просторног и временског предфилтрирања [31] .....	59
Сл.30. Геометрија за елиминацију малих углова; а) $A_{z1} \ll A_{z2}$ ; б) $A_{z1} \approx A_{z2}$ ; с) $A_{z1} \ll A_{z2}$ [70] .....	63
Сл.31. Геометријски модели за процес триангулације; основни пар елементарне ћелије (а): поглед у - ху равни, (б): 3D приказ; (с) случај када се линије правца детекције циља мимоилазе, посматрано са две упарене сензорске станице [70].....	65
Сл.32. Графички приказ укупног времена потребног за формирање излазног вектора података [70] .	69
Сл.33. Зависност максималног времена израчунавања у односу на проценат стварних циљева (200 циљева за РИИ). [70].....	71
Сл.34. Зависност максималног времена израчунавања у односу на проценат стварних циљева (200 циљева за РИИ). [70] .....	72
Сл.35. Зависност максималног времена израчунавања у односу на проценат стварних циљева (200 циљева за РИИ). [70].....	73
Сл.36. Зависност максималног времена израчунавања у односу на clock и тип процесора. [70].....	74
Сл. П1-1 Шест сукцесивних фрејмова снимљених камером . FLIR SC 7200 [8] .....	78
Сл. П1-2. ИЦ снимци формирања и развоја детонационог облака ("ватрене лопте") за: а) 0,4 kg и б) 4 kg експлозива ТВЕ-1 [89].....	80
Сл. П1-3. ИЦ снимци формирања и развоја детонационог облака („ватрене лопте“) за 0,4 kg: а) и б) термобаричног РВХ састава ТВЕ-1, в) нетермобаричног РВХ (НМХ/НТРВ=85/15), г) С-4 и д) TNT [89].....	80
Сл. П1-4. Дијаграм промена температуре у мерној области (МО) –1,2,3,4,5 за узорак TNT 1500 g и издвојени термограм узорка, са изабраним МО (растојања међу МО: $r_{12}=1,71m$ , $r_{13}=1,53m$ , $r_{14}=2,46m$ , $r_{15}=2,55m$ ; фреквенција снимања: 1478 Hz) [89].....	81
Сл. П1-5. Промена температуре у МО –1,2,3,4,5 за 1500 g ТВЕ–1 и издвојени термограм узорка, са изабраним МО (растојања међу МО: $r_{12}=1,53m$ , $r_{13}=1,53m$ , $r_{14}=2,58m$ , $r_{15}=2,70m$ ; фреквенција снимања 1478 Hz) [89].....	81
Сл. П1-6. Поређење кривих T–t за мерно место на 2 m од центра детонације ТВЕ [89].....	82
Сл. П1-7. Други фрејм за пуњење радијуса 120 mm при фреквенцији 5 kHz [89] .....	82
Сл. П1-8. Регистрована зависност T(°C) – t(s) за пуњење Ф 120 mm [89] .....	83



## ЛИСТА ТАБЕЛА

Табела 1. Вредности екситансе ИЦ зрачења објеката у позадини према литератури [1-3] .....	5
Табела 2. Средње потребно време у ms за израчунавање растојања и формирање излазног вектора података [65] .....	70

## ПРЕГЛЕД КОРИШЋЕНИХ ОЗНАКА

$A_D$	$[\mu\text{m}^2]$	површина детекторског елемента
$\alpha_s$		просторни угао који одговара односу површине детектора и ефективне живичне даљине
$\alpha$	$[\text{mrad}]$	вредност угла азимута
$\alpha, \alpha_D, IFOV$	$[\text{mrad}]$	угаони захват детектора, тренутно видно поље
$\alpha_D^H, IFOV^H$	$[\text{mrad}]$	хоризонтални угао виђења тренутног видног поља
$\alpha_D^V, IFOV^V$	$[\text{mrad}]$	вертикални угао виђења тренутног видног поља
$\alpha(\lambda)$	$[\text{km}^{-1}]$	спектрални коефицијент апсорпције
$\alpha_{err}$		ефективна угаона мерна несигурност центрирања при одабирању
$\beta$		фактор опоравка
$\beta$	$[\text{mrad}]$	вредност угла елевације
$C$		скуп
$C_p$		парцијални скуп
$C_{pp}$		пројекција векторског низа парцијалног скупа
$D, D_L$	$[\text{km}]$	дужина правца, удаљеност авиона од мерне камере
$D$	$[\text{m}]$	коначни дијаметар снопа, пречник
$D_{in}, D_o, d$	$[\text{cm}]$	пречник објектива (дијаметар апертуре)
$D^*(\lambda)$	$\left[ \frac{\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}}{W} \right]$	специфична детективност
$D^*_{\lambda p}$	$\left[ \frac{\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}}{W} \right]$	специфична вршина детективност
$E_e$	$\left[ \frac{W}{\text{m}^2} \right]$	ирадијанса
$E_{e\lambda}$	$\left[ \frac{W}{\mu\text{m} \cdot \text{m}^2} \right]$	спектрална ирадијанса
$\varepsilon, \varepsilon^{ST}$		емисивност
$\varepsilon_g(T_g)$		емисивност гасова
$\varepsilon_m(T_m)$		емисивност мотора
$\varepsilon_o(T_o)$		емисивност оплате
$\varepsilon$		ефикасност преноса набоја наелектрисања
$\eta$		коефицијент уметања линија (interlace)
$F_s$	$[\text{Hz}]$	учестаност понављања слика
$f_e$		однос енергије од 0 до $\lambda$ наспрам укупне енергије зрачења које емитује црно тело у опсегу од 0 до $\infty$
$f_e$	$[\text{Hz}]$	учестаност повезана са просторном фреквенцијом преко брзине скенирања $f_e = v \cdot f_x$

$f_i$		фактор испуњења матрице
$f_{ge}$	[Hz]	гранична учестаност електронике (тачка 3-dB RC - филтера)
$f_{oco}$	[lp/mrad]	просторна гранична учестаност
$f_{dco}$	[lp/mrad]	детекторска гранична учестаност
$f_p^*$	[lp/mrad]	просторна учестаност
$f_x$	[lp/mrad]	просторна учестаност у правцу скенирања
$f_{ts}$	[lp/mrad]	просторна фреквенција радног такта
$\gamma(\lambda)$	[km <sup>-1</sup> ]	спектрални коефицијент расејања
$h_{gr}$		дозвољена мерна несигурност по висини, толеранција
$J_0(x)$		Беселова функција прве врсте
$L_p$		скуп лажно детектованих летелица
$L_e$	$\left[ \frac{W}{sr \cdot m^2} \right]$	радијанса
$L_{e\lambda}$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot sr \cdot m^2} \right]$	спектрална радијанса
$L_{ef}^c(T)$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot sr \cdot m^2} \right]$	ефективна радијанса циља
$L_g(T_g)$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot sr \cdot m^2} \right]$	радијанса гасова
$L_m(T_m)$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot sr \cdot m^2} \right]$	радијанса мотора
$L_o(T_o)$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot sr \cdot m^2} \right]$	радијанса оплате
$L_{S/M}$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot sr \cdot m^2} \right]$	радијанса Сунца/ Месеца
$L_z(T)$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot sr \cdot m^2} \right]$	радијанса земље
$L_{ob}$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot sr \cdot m^2} \right]$	радијанса облака
$L_n$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot sr \cdot m^2} \right]$	радијанса неба
$L_{rd}$	[ $\mu m$ ]	дужина очитавања за SPRITE детекторе
$\lambda$	[ $\mu m$ ]	таласна дужина
$M$		Махов број
$M_e$	$\left[ \frac{W}{m^2} \right]$	екситанса
$M_{e\lambda}, M_{ev}$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot m^2} \right]$	спектрална екситанса
$M_{e\lambda}^{ACT}$	$\left[ \frac{W}{\mu m \cdot m^2} \right]$	спектрална екситанса апсолутно црног тела

$MDTD$ ,	[K]	минимална разлика температуре која се може детектовати
$MDTD(f_{px}^*)$		
$MRTD$ ,	[K]	минимална разложива температурна разлика за препознавање
$MRTD(f_{px}^*)$		
$MTF$		модулациона трансфер функција, преносна функција
$MTF_{sys}$		модулациона трансфер функција система
$MTF_{opt}$		модулациона трансфер функција оптике
$MTF_{kre}$		модулациона трансфер функција кретања
$MTF_{detp}$		модулациона трансфер функција детектора (просторна)
$MTF_{dett}$		модулациона трансфер функција детектора (временске константе)
$MTF_{el}$		модулациона трансфер функција електронике
$MTF_{dif}$		модулациона трансфер функција дифракционе границе
$MTF_{aber}$		модулациона трансфер функција аберација
$MTF_{defo}$		модулациона трансфер функција дефокусирања
$MTF_{lin}$		модулациона трансфер функција линеарног кретања
$MTF_{sin}$		модулациона трансфер функција синусоидалног кретања
$MTF_{asp}$		модулациона трансфер функција апериодичног случајног помераја
$MTF_{jdet}$		модулациона трансфер функција једноструког паралелног детекторског низа
$MTF_{detpTDI}$		модулациона трансфер функција детектора (просторна) за TDI детекторски низ
$MTF_{detpSPRITE}$		модулациона трансфер функција детектора (просторна) за SPRITE детекторски низ
$MTF_{ele}$		модулациона трансфер функција детекторског елемента – дифузија детектора
$MTF_{diff}$		модулациона трансфер функција дифузије детектора
$MTF_{detpn}$		модулациона трансфер функција нехлађеног детекторског низа
$MTF_{dett}$		модулациона трансфер функција (просторна) за нехлађени детектор
$MTF_{ter}$		модулациона трансфер функција термалне компоненте временске константе
$MTF_{elk}$		модулациона трансфер функција електричне компоненте временске константе
$MTF_{detpFPA}$		модулациона трансфер функција фокалне матрице детектора
$MTF_{detm}$		модулациона трансфер функција детектора FPA
$MTF_{pre}$		модулациона трансфер функција пренос
$MTF_{el}$		модулациона трансфер функција електронике
$NEP$	[W]	снага еквивалентна шуму

$NETD$	[K]	температурна разлика еквивалентна шуму
$N_{TDI}$		број TDI елемената у TDI режиму
$N_{pre}$		тотални број набоја наелектрисања, које се преноси од детектора до излазног појачавача
$N_{ps}$		број инфрацрвених пиксела у слици
$n_l$		број инфрацрвених линија у слици
$n_p$		број паралелних детектора
$n_{pl}$		број пиксела у линији
$n_s$		број серијских детектора
$P_{pj}$		вероватноћа присуства одређене летелице у слици
$P_p$		пројекција удаљености између две станице у равни азимута
$p$		број парцијалних скупова
$Q$	[ $\mu m$ ]	дужина амбиполарне дифузије за SPRITE детекторе
$R^D$	[km]	удаљеност до извора инфрацрвеног зрачења, домет детекције
$R$	[m]	растојање
$r$	[m]	полупречник
$\rho$		кофицијент ефикасности скенера
$\rho$		рефлексивност
$\rho_o(T_o)$		рефлексивност оплате
$S, S_i$	[ $m^2$ ]	површина
$(S^D/N)_p$		однос сигнал / шум за тражену вероватноћу визуелне перцепције при детекцији
$(S^R/N)_p$		однос сигнал / шум за тражену вероватноћу визуелне перцепције при препознавању
$S_p$		скуп пројектованих слика
$\sigma$		дисперзија
$\sigma(\nu)$	[ $km^{-1}$ ]	кофицијент слабљења (екстинција)
$\sigma_{det}$	[mrad]	угаона димензија дијаметра блура
$\sigma_r$	[mrad]	угаона димензија случајног помераја
$T$	[C], [K]	температура
$T_{amb}$	[C], [K]	температура амбијента
$T_g$	[C], [K]	температура гасова
$T_m$	[C], [K]	температура мотора
$T_o$	[C], [K]	температура оплате
$T_p$		верификациони фактор
$t$	[s]	време
$T$	[s]	време преноса информација
$t_e$	[s]	време интеграције система
$t_i$	[s]	временски интервал
$\tau$		трансмисивност
$\tau(\lambda)$		спектрална трансмисивност

$\tau_a$		<i>трансмисивност атмосфере</i>
$\tau_o$		<i>трансмисивност оптике</i>
$\tau_d$	[s]	<i>време задржавања на детектору, временска електронска константа</i>
$\tau_t$	[s]	<i>однос тоplotног капацитета и тоplotне проводности</i>
$\tau_e$	[s]	<i>електрична временска константа детектора</i>
$\nu$	[m/s]	<i>брзина</i>
$x, x_{pi}$	[m]	<i>координата Декартовог координатног система</i>
$y, y_{pi}$	[m]	<i>координата Декартовог координатног система</i>
$z$	[m]	<i>надморска висина</i>
$z, z_{pi}$	[m]	<i>координата Декартовог координатног система</i>

**ПРЕГЛЕД КОРИШЋЕНИХ АКРОНИМА**

AM	амплитудна модулација
AЦТ	апсолутно црно тело
CPU	Central Processing Unit
CTV	Contrast Threshold Value
DAS	Detector Angular Subtense
EM	електромагнетни
EBX	Enhanced Blast E <u>X</u> plosives
EP	експлозивно пуњење
IFOV	Instantaneous Field Of View
IMM	Interactive Multiple Model
ИЦ	Инфрацрвени
IRST	Infrared Search and Tracking
КИС	командно информациони систем
ЛА	ловачка авијација
ЛБА	ловачко-бомбардерска авијација
LWIR	Longwave Infrared
LOWTRAN	LOW altitude atmospheric TRANsmission
MO	мерна област
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
MDTD	Minimal Detectable Temperature Diference
MRTD	Minimal Resolvable Temperature Diference
MTF	Modulation Transfer Function
MHT	Multiple Hypothesis Tracking
MWIR	Midwave Infrared
NETD	Noise Equivalent Temperature Diference
NEP	Noise Equivalent Power
OE	оптоелектронски
OPAQUE	OPTical and infrared Atmospheric QUantities in Europe
ПВО	противваздушна одбрана
PBX	Plastic Bonded E <u>X</u> plosive
RF	Radio Frequency
TDI	Time Delay Integration
TBE, TBX	ThermoBaric E <u>X</u> plosive
UV	Ultra Violet
FA	False Alarm
FASCODE	Fast Atmospheric Signature CODE
FLIR	Forward Looking Infrared
FPA	Focal Plane Arrays
HITRAN	HIgh resolution TRANsmission
C3I	Command, Control, Communications and Intelligence
C4ISR	Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance

## Биографија,

*Мр Драган Милутина Кнежевић, дипл инж.етф*

- Рођен 26. марта 1968. године у Новом Саду (Република Србија).
- Основну школу: „Светозар Марковић“ у Краљеву уписао школске 1974/75. године.
- 1977. године преселио се у Београд. Школовање наставља у Основној школи: „Вељко Дугошевић“ и завршава 1982. године. У свим разредима основне школе имао је одличан успех.
- „Шесту Београдску гиманзију“ уписао је 1982/83 и завршио 1986. године. У свим разредима гиманзије имао је такође, одличан успех. Носилац је дипломе „Михајло Петровић Алас“ из математике и физике. Учествовао је на републичким такмичењима из математике и физике и освојио неколико диплома и похвала.
- Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписао је 1986. године, а наставу је почео да похађа 1987. године, после одслуженог војног рока на Смеру техничка физика.
- Због догађаја у земљи од 1990. године, више пута је прекидао студије, дајући свој допринос у одбрани земље.
- 1996. године је дипломирао на Одсеку физичка електроника, Смер оптоелектроника и ласерска техника.
- Од 1998. године запослен у Војсци Југославије у ГШ.
- Магистарски рад под насловом: „Анализа параметара термовизијских уређаја за детекцију циљева у ваздуху“, одбранио је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду у мају 2001.
- Од 2003. године ради у МО-ВТИ.

Постављен на дужност водећег истраживача у Одсеку за оптоелектронске системе, Одељења за сензорске системе, Сектора за електронске системе Војнотехничког института. Тежиште рада се односи на анализу термовизијских уређаја и система, анализу и синтезу ИЦ сцене и стручну помоћ у области термовизијских мерења и термографије. У претходном периоду учествовао на више домаћих и страних конференција и објавио радове у часописима међународног и националног значаја. Ради на докторској дисертацији из области термовизије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

Током рада стекао је искуство у области оптоелектронике у односу на следећу групу проблема:

**Радиометрија** где је овладао:

- карактеризацијом сигнатуре ИЦ зрачења брзопокретних објеката
- мерним поступцима у испитивању карактеристика ИЦ трасера

**Анализа и синтеза ИЦ система, где је радио на:**

- дефинисању система параметара ИЦ уређаја
- систему параметара термовизијских уређаја (дефинисање мерних метода, допринос опремању лабораторије за мерење карактеристика)
- анализи утицаја атмосферских и других утицаја ИЦ сцене на функционисање и употребу ИЦ система и уређаја
- анализи функционисања, карактеристика и примени ИЦ сензорских система у КИС.



## Библиографија научних и стручних радова

### 1. Радови објављени у часописима међународног значаја - M<sub>20</sub>

#### 1.1. Радови у истакнутим међународним часописима - M<sub>22</sub>

1. D. Simić, U. Andjelić, D. Knežević, K. Savić, V. Draganić, R. Sirovatka, Lj. Tomić, Thermobaric effects of cast composite explosive of different charge mass and dimensions, Cent. European J. of Energ. Mat., vol. 13, no. 1, pp. 161-182, 2016. (ISSN 1733-7178, IF 1.28)
2. D. Knežević, A. Redjimi, K. Mišković, D. Vasiljević, Z. Nikolić, J. Babić, Minimum resolvable temperature difference model, simulation, measurement and analysis, Quant. and Opt. Electr., vol. 48, no. 6, 332:1-7, 2016. (DOI 10.1007/s11082-016-0598-7, ISSN: 0306-8919 IF 1.29)
3. D. M. Knežević, B. M. Radojković, S. S. Ristić, S. R. Polić, M. M. Janicijevic, Lj. D. Tomić, B. V. Jegdić, Monitoring of a ceramic surface temperature field induced by pulsed Nd:YAG laser, Thermal Science 2019, OnLine-First Issue 00, pages 425-425. (DOI 10.2298/TSCI190811425K, ISSN: 0354-9836 IF 1.54)
4. Dragan M. Knežević, Petar S. Matavulj, Zoran M. Nikolić, Modeling of aircraft infrared signature based on comparative tracking, Optik, vol. 225,165782 (7p), 2021. (ISSN 0030-4026) (DOI:10.1016/j.ijleo.2020.165782, ISSN: 0030-4026, IF 2.187, position: optics 46/97)

#### 1.2. Радови у међународним часописима - M<sub>23</sub>

5. D. Knežević, M. Dragović, M. Srećković, V. Ibrahimović, A.Kovačević, Numerical complexity of real-time tracking of objects in defined space by infrared optoelectronic devices, Indian J. Pure and Appl. Phys., vol. 52, pp. 457-464, 2014. (ISSN: 0019-5596, IF 0,766)
6. M. Ž. Srećković, S. M. Ostojić, J. T. Ilić, Z. A. Fidanovski, S. D. Jevtić, D. M. Knežević and M. D. Obrenović, Photoinduced Processes, Radiation Interaction with Material and Damages – Material Hardness, Nuclear Technology & Radiation Protection, vol. 30, no. 1, pp. 23-34, 2015. (DOI: 10.2298/NTRP1501023S, ISSN 1451-3994, IF 0.372)
7. A. Redjimi, Z. Nikolić, D. Knežević, D. Vasiljević, Post-processing synchronization and characterization of generated signals by a repetitive Marx generator, Optical and Quantum Electronics, vol. 50, 352, pp. 1-13, 2018. (DOI: 10.1007/s11082-018-1614-x, ISSN 0306-8919 (print) 1572-817X (online), IF 1.168)

#### 1.3. Радови у међународним часописима без импакт фактора

1. D. Knežević, M. Srećković, S. Kočinac, V. Ibrahimović, The Application of Spatial Triangulation for Instantaneous Tracking of Flying Objects in Specified Area, Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara – J. of Eng., tom V (year 2007), fascicule 2, pp. 93-104, 2007. (ISSN 1584-2665)

2. M. Dimitrijević, D. Knežević, S.Šambina, A. Čučaković, M. Srećković, Removal of False Targets in the Issues of Spatial Triangulation by projective (descriptive) geometry methods, Struct. Mech. of Engin. Const. and Build., no.3, pp.1-11, 2013. (ISSN 1815-5235)

2. Зборници међународних научних скупова - М<sub>30</sub>

2.1. Саопштење са међународног скупа, штампано у целини - М<sub>33</sub>

1. D. Knežević, Satellite Thermal Imaging Application In Remote Sensing And Tacking Of Earth Changes, Prva međunarodna konferencija o satelitskom osmatranju zemlje – daljinskoj detekciji (MECEO - Mediterranean Conference on Earth Observation), pp.19-25, 21. – 23. april 2004.  
(ISBN 86-7352-118-1)
2. M. Srećković, D. Knežević, Z. Stević, Dj. Milanović, S. Jevtić, Ž. Tomić, D. Družijanić, Laser application in Ecology, Proc. Urbaneco, pp. 345-367, 15.10, Ečka, 2012.  
(ISBN 978-86-7672-237-2)
3. A. Redjimi, N. Jovanović, D. Knežević, Lj. Tomić, Numerical Estimation of the Noise Equivalent Temperature Difference of the Third Generation Thermal Imagers, Proceedings of 1 st IcETRAN, Vrnjačka Banja, Serbia, pp. MOI3.1.1-4, 02.-05.06.2014.  
(ISBN 978-86-80509-70-9)
4. K. Savić, A. Redjimi, N. Jovanović, D. Knežević, Numerical Simulation of the Black Body Radiation Laws, Proceedings of 1 st IcETRAN, Vrnjačka Banja, Serbia, pp. MOI3.2.1-5, 02.-05.06.2014.  
(ISBN 978-86-80509-70-9)
5. Ž. Petrović, P. Petrović, D. Knežević, P. Jovanić, V. Velisavljev, General Approach To Exhaust Emission Control Of Internal Combustion Engines, Proceedings of IV International Conference ECOLOGY OF URBAN AREAS 2014, Zrenjanin, Serbia, pp. 125-131, 9-10th October 2014.  
(ISBN 978-86-7672-237-2)
6. D. Simić, U. Andjelić, D. Knežević, K. Mišković, S. Gačić, S. Terzić, S. Brzić, Quantification of thermal effects of thermobaric detonation by infrared technique, New trends in Research of Energetic Materials, Czech Republic, Pardubice, Conference and proceedings number 18, pp. 829-838, april 2015.  
(ISBN 978-80-7395-891-6)
7. U. Andjelić, D. Simić, D. Knežević, M. Dević, Visualizing the thermal effect of thermobaric explosives, 7th International scientific conference on defensive technologies OTEH 2016, Belgrade, Conference and Proceedings No 7, pp. 278-282, 6-7 october 2016.  
(ISBN 978-86-81123-82-9)
8. I. Kostić, D. Pavlović, V. Lazović, D. Vasiljević, D. Stojanović, D. Knežević, Lj. Tomić, G. Dikić, D. Pantelić, Thermal and camouflage properties of rosalia alpina longhorn beetle with structural coloration, 7th International scientific conference on defensive technologies OTEH 2016, Belgrade, Conference and Proceedings No 7, pp. 525-529, 6-7 october 2016.  
(ISBN 978-86-81123-82-9)
9. D. Simić, I. Dimitrijević, R. Sirovatka, D. Knežević, K. Mišković, Lj. Totovski, Thermobaric performance of cast PBX with nanosized aluminium, 49th International Annual Conference of the Fraunhofer ICT on „Energetic Materials-Synthesis, Processing, Performance“, Karlsruhe, Germany,  
(ISSN 0722-4087)
10. D. Simić, I. Dimitrijević, B. Fidanovski, D. Knežević, Lj. Totovski, H. Kemmoukhe, S. Terzić, Tracking the thermal output of plastic explosives with nano-sized aluminium,

Proceedings of the 22nd Seminar on New Trends in Research of Energetic Materials, Pardubice, Czech Republic, pp.636 – 645, 10. –12. april, 2019  
(ISBN 978-80-7560-210-7 (Print), ISBN 978-80-7560-211-4 (CD))

## 2.2. Саопштење са међународног скупа, штампано у изводу – М<sub>34</sub>

11. A. Redjimi, M. Bendjaballah, D. Knezević, K. Savić, MRTD and Surveillance Ranges of a Thermal Imaging Camera after its Usage for Ten Years, 8th Photonics Workshop 2015, Kopaonik, Book of Abstracts, p. 24, 08.-12.03.2015. (ISBN 978-86-82441-41-0)
12. D. Knezević, A. Redjimi, K. Savić, D. Vasiljević, Z. Nikolić, J.Babić, Numerical Estimation of the Minimum Resolvable Temperature Difference of the Third Generation Thermal Imagers, Photonica 2015, Belgrade, Book of Abstracts, p. 125, 24-28.08.2015. (ISBN 978-86-7306-131-3)
13. M. Srećković, A. Bugarinović, A. Janićijević, M. Janićijević, P. Jovanić, Z. Fidanovski, D. Knezević, Lasers as source of power and laser techniques in the modification of materials, Savremeni materijali, Banja Luka, ANURS , pp.124-128, 6-7 sept.2015.
14. D. Knezević, P. Matavulj, Z. Nikolić, The possibility of an information processing in the infrared picture, 9th Photonics Workshop 2016, Kopaonik, Book of Abstracts, p. 3, 02.-06.03.2016. (ISBN 978-86-82441-41-1)
15. D. Knezević, P. Matavulj, Z. Nikolić, Modeling of aircraft IC signature based on comparative tracking, The Sixth International School and Conference on Photonics, Belgrade, Book of Abstracts, p. 137, 28.08.2016-01.09.2017. (ISBN 978-86-82441-46-5)
16. D. Jovanović, M. Petrović, T. Tomašević-Ilić, N. Tasić, K. Rogdakis, D. Knezević, A. Matković, M Spasenović, S. Nedić, R. Gajić, I. Milošević, E. Kymakis, Is solar going indoors?, 14th Photonics Workshop 2021, Kopaonik, Book of Abstracts, pp. 38-39, 14.-17.03.2021. (ISBN 978-86-82441-52-6)
17. D. Jovanović, M. Petrović, T. Tomašević-Ilić, N. Tasić, K. Rogdakis, L. Cina, D. Knezević, A. Matković, M Spasenović, R. Gajić, I. Milošević, E. Kymakis, Is solar going indoors?, “Graphene and 2DM” Online Conference (GO2021): Fundamental Research Insights, pp. 73-74, 201.-21.04.2021.

## 3. Монографије националног значаја - М40

### 3.1. Поглавље у књизи М42 или рад у тематском зборнику - М45

1. Д. Кнежевић, Н. Славковић, Д. Дружјанић, Термовизијски нишан, **глава VIII** у делу II монографије Ласерске технике и метрологија у форензичким наукама, аутора М. Срећковић, Р. Радовановић, А. Милосављевић, С. Јаћимовски, pp. 267-277, Академска мисао, Београд, 2016. (ISBN: 978-86-7466-658-6)
2. Д. Кнежевић, Биометријске методе за идентификацију људи, **глава II** у делу III монографије Ласерске технике и метрологија у форензичким наукама, аутора М. Срећковић, Р. Радовановић, А. Милосављевић, С. Јаћимовски, pp. 299-319, Академска мисао, Београд, 2016. (ISBN: 978-86-7466-658-6)

4. Радови објављени у часописима националног значаја - M<sub>50</sub>4.1. Радови у водећим часописима националног значаја - M<sub>51</sub>

1. M. Srećković, A. Kovačević, A. Milosavljević, S. Ostojić, B. Đokić, S. Jevtić, D. Knežević, Energetika, kvantna elektronika, nelinearna optika i laserska tehnika, Energija, ekologija, ekonomija, 5/2009, pp. 5-14, 2009, 005-017. (MNO 2009 Energetika i rudarstvo) (ISSN 0354-8651)

4.2. Радови у часопису националног значаја - M<sub>52</sub>

2. B. Simić, D. Knežević, M. Srećković, D. Nikolovski, Savremeni problemi termovizije, Tehnika, Elektrotehnika, vol.62, no.2, pp. 272-284, 2013. (ISSN: 1820-0206)
3. A. Redjimi, D. Knežević, K. Savić, N. Jovanović, M. Simović, D. Vasiljević, Noise Equivalent Temperature Difference Model for Thermal Imagers, Calculation and Analysis“, Scientific Technical Review, 2014, vol.64, no.2, pp. 42-49, 2014. (ISSN: 1820-0206)
4. S. Ristić, S. Polić, D. Knežević, B. Radojković, M. S. Linić, B. Jegdić, Termografija u kontroli efikasnosti i bezbednosti laserskog čišćenja, Tehnika – Novi materijali, no. 5, pp. 623-629, 2019.
5. D. Knežević, Z. Nikolić, K. Mišković, D. Vasiljević, Estimation of the Sky Radiance, Scientific Technical Review, vol.69, no.3, pp. 10-14, 2019. (ISSN 0040-2176) (UCD 621.391.6) (DOI: 10.5937/tehnika1905623R, UCD 621.375.826)

## 3.3. Радови у часопису националног значаја без класификације

1. Д. Кнежевић, Оптички нишан НО М04 и ласерски обележивач циља ОЦЛ М0, Нови Гласник – војностручни интервидовски часопис, бр 3/2007, pp. 81-86, 2007. (ISSN:0354-3323).

5. Зборници скупова националног значаја - M<sub>60</sub>5.1. Саопштења са скупа националног значаја штампана у целини - M<sub>63</sub>

1. Д. Кнежевић, Б. Ливада, Модел оптоелектронских карактеристика термовизијских уређаја, Зборник радова XLV ЕТРАН, pp.258-261, Буковичка Бања, Аранђеловац, 4-7.06.2001. (ISBN: 978-86-80509-40-X)
2. Д. Кнежевић, Б. Ливада, Модели NETD за термовизијске уређаје, Зборник радова XLVI ЕТРАН, pp.114-117, Бања Врућица, Теслић, 4-7.06.2002. (ISBN 978-86-80509-66-2)
3. Ма. Кнежевић, Д. Кнежевић, Љ. Томић, Ми. Кнежевић, Примена термовизије у медицинској дијагностици, Зборник радова XLVI ЕТРАН, pp.205-208, Бања Врућица, Теслић, 4-7.06.2002. (ISBN 978-86-80509-66-2)

4. Д. Кнежевић, Љ. Томић, Ма. Кнежевић, Ми. Кнежевић, С. Рабреновић, Примена термовизије у медицинској дијагностици рака дојке, Зборник радова XLVII ЕТРАН, pp.281-283, Херцег Нови, 8-13.06.2003.  
(ISBN: 978-86-80509-48-5)
5. Љ. Томић, Д. Кнежевић, М. Кнежевић, С. Рабреновић, Лечење ретинопатије методом кохерентне оптике, Зборник радова XLVII ЕТРАН, pp.284-287, Херцег Нови, 8-13.06.2003.  
(ISBN: 978-86-80509-48-5)
6. Ž. Tomić, J. Mirčevski, M. Miltenović, D. Knežević, Programski alati za analizu slike nastale rasejanjem bazirani na wavelett algoritmima, INFOTEN, Jahorina, vol. 5, Ref. E-III-2, pp. 393-396, March 2006.  
(ISBN-99938-624-2-8)
7. M. Srećković, S. Ristić, D. Knežević, M. Kutin, Komplementarni aspekti laserskih i drugih mernih tehnika, XXX naučno stručni skup sa međunarodnim učešćem, Hipnef 2006, pp.235-245, 2006.  
(ISBN 86-81505-21-1)
8. M. Srećković, Ž. Tomić, M. Pavlović, A. Kovačević, D. Družijanić, D. Knežević, S. Milić, J. Mirčevski, B. Đokić, M. Dimitrijević, M. Davidović, Savremeni problemi kvantne elektronike i lidarskih tehnika, Contemporary problems of quantum electronics and lidar techniques, INFOTEN, Jahorina, vol.7. Ref. E-VII 13, pp. 663-667, 2008.  
(ISBN-99938-624-2-8)
9. К. Савић, И. Костић, Н. Јовановић, Д. Кнежевић, Д. Милановић, MRTD једне термовизијске камере после њеног десетогодишњег коришћења, Зборник радова LVI ЕТРАН, pp. MO4.3-1-3, Златибор, 11.-14.06.2012.  
(ISBN 978-86-80509-67-9)
10. M. Srećković, S. Jevtić, Ž. Tomić, B. Milošević Đokić, A. Bugarinović, S. Polić – Radovanović, D. Knežević, N. Slavković, Z. Fidanovski, Simulacione metode u pristupu projektovanju lasera od interesa u ekologiji, Infoteh, Jahorina, vol.12, KST-3-12, March 2013, pp.478-483, 2013.  
(ISBN 978-99955-763-1-8)
11. Д. Кнежевић, К. Савић, В. Драганић: Мерење температуре брзих гасних токова, Зборник радова LVII ЕТРАН, pp. MO1.6.1-4, Златибор, 03.-06.06.2013.  
(ISBN: 978-86-80509-68-6)
12. К. Савић, В. Драганић, Д. Кнежевић: Моделовање ласерског даљиномера, Зборник радова LVII ЕТРАН, pp. MO1.7.1-4, Златибор, 03.-06.06.2013.,  
(ISBN: 978-86-80509-68-6)
13. Љ. Томић, В. Дамњановић, А. Ковачевић, Д. Кнежевић, К. Савић, Примена импулсне термографије за испитивање алуминијумских и плексиглас тест узорака са периодичном структуром дефеката, Зборник радова LVIII ЕТРАН, pp. MO3.2.1-6, Врњачка Бања, 02.-05.06.2014.  
(ISBN: 978-86-80509-70-9)
14. Љ. Томић, В. Дамњановић, К. Мишковић, Б. Бонцулић, Д. Кнежевић, А. Ковачевић, Анализа утицаја почетне температуре тест узорка при примени импулсне термографије, Зборник радова LXII ЕТРАН, pp. 314-317, Палић, 11.-14.06.2018.  
(ISBN: 978-86-7466-752-1)

5.2. Саопштења са скупа националног значаја штампана у изводу - М<sub>64</sub>

15. Д. Кнежевић, Љ. Томић, Анализа брзине одзива система приликом праћења објеката ИЦ мрежом сензора, Трећа радионица фотонике 2010, Теорија и експеримент у Србији, Зборник апстраката, Београд, р.28, 21.-23.04.2010.  
(ISBN: 978-86-8244-127-4)
16. Д. Кнежевић, Љ. Томић, Анализа ИЦ сцене у циљу добијања бољих карактеристика термовизијских уређаја, Четврта радионица фотонике 2011, Копаоник, Зборник апстраката, р.28, 02.-06.03.2011.  
(ISBN: 978-86-8244-129-8)

#### 6. Техничка решења - М<sub>80</sub>

##### 6.1. Ново техничко решење (метода) примењено на националном нивоу – М82

1. Д. Симић, У. Анђелић, Д. Кнежевић, К. Мишковић, Метода за квантификацију топлотног ефекта детонације експлозивних материја термовизијом, Решењем Управе за стратегијско планирање Сектора за политику одбране Министарства одбране П број 77-7 од 03.08.2017. год., прихвата се нова метода као Техничко унапређење под ознаком ТУ-48.

## Изјава о ауторству

Потписани-а мр Драган Кнежевић

Број уписа 5047/2015

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

Карактеризација термовизијских система са панорамским приказом за надзор покретних објеката

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла права и користио интелектуалну својину других лица

**Потпис докторанта**

*Драган Кнежевић*

У Београду, 23.06.2021. год.

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора мр Драган Кнежевић  
Број уписа 5047/2015  
Студијски програм Наноелектроника и фотоника  
Наслов рада Карактеризација термовизијских система са панорамским приказом за надзор покретних објеката  
Ментор др Петар Матавуљ, редовни професор

Потписани мр Драган Кнежевић

изјављујем да је штампана верзија докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла на порталу Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис докторанта**



У Београду, 23.06.2021. год.



## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Карактеризација термовизијских система са панорамским приказом за надзор покретних објеката  
као моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци је дат на полеђини листа).

**Потпис докторанта**

*Драган Кнежевић*

У Београду, 23.06.2021. год.