

Infracrveni senzori u tehničkim sredstvima specijalne namene

Zoran Milanović¹, Saša Milić², Radovan Radovanović¹

¹Kriminalističko-policijski univerzitet u Beogradu, Cara Dušana 196,
11000 Beograd, Srbija

zoran.milanovic@kpu.edu.rs

²Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

s-milic@ieent.org

Kratak sadržaj: Tehnička sredstva specijalne namene za merenje i nadzor se ubrzano razvijaju sa ciljem unapređenja održive bezbednosti i elektronske zaštite lica i objekata. Ovaj rad, u širem smislu, daje opštu podelu i primenu inteligentnih infracrvenih senzora u tehničkim sredstvima vojske i policije, dok u užem smislu daje metrološki prikaz pametnih mernih senzora, uređaja i sistema, i načine i oblasti njihove primene. U užem smislu, u radu su detaljno analizirani i prikazani sistemi koji koriste termovizijske kamere. Dat je niz primera iz svetske prakse sa ciljem ilustracije i potvrde značaja primene mernih i nadzornih IC sistema.

Ključne reči: sredstva specijalne namene, infracrveno (IC) zračenje, merni sistemi, senzori, detektori.

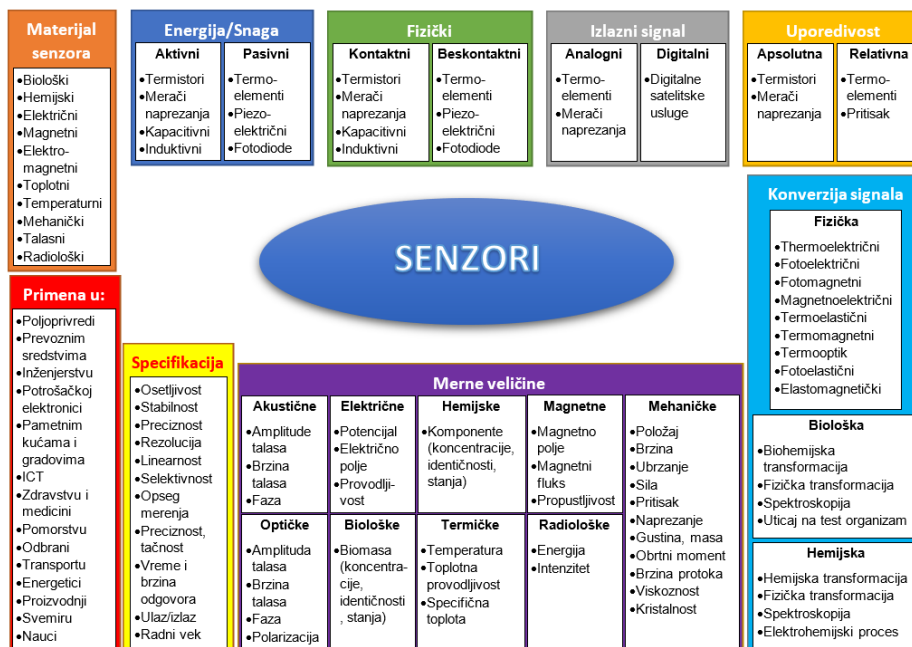
1. Uvod

Usled naglog razvoja i praktične primene novih strategija i koncepcija zasnovanih na spoju fizičkog i virtuelnog sveta, tehnologije senzora, koji čine jednu od glavnih komponenti tog spoja, su značajno napredovale. Okruženi smo pametnim telefonima i satovima, elektronskim pomagalicama i dodacima (gedžetima), autonomnim vozilima... sa tendencijom organizovanja od pametnog proizvodnog ciklusa (*Industry 4.0, smart factory...*) pa do pametnog staništa i okruženja (*smart building, smart city...*). Radi ilustracije, današnji široko dostupan (komercijalni) pametni telefon sadrži u sebi preko 30 senzora za različite namene.

Metrologija i merna tehnika su relevantni za sve današnje bezbednosne aspekte života, od nadzora, praćenja i obaveštavanja, pa sve do komercijalne

elektronike koja nas okružuje u našim kućama, kancelarijama, tržnim centrima, automobilima itd. Lepeza „tradicionalnih senzora“ razvijenih pre dvadeset i više godina je zamenjena pametnim sensorima nove generacije čije su osnovne karakteristike: visoka tačnost, otpornost na spoljašnje uticaje, mala potrošnja, mobilnost, skalabilnost i velike brzine i kapaciteti prenosa podataka.

U osnovi, senzori su uređaji za merenje i otkrivanje fizičkih promena. Formiranje detektabilnog signala se dešava u samom senzoru, zatim slede pojačavački i filterski sklopovi koji „prilagođavaju“ merni signal daljoj A/D konverziji, a zatim i procesorskoj obradi [1]. Električni signal kao nosilac neobrađenih ili delimično obrađenih podataka je signal koji može da bude u analognom obliku (amplitudno, strujno ili naponski modulisan, frekventno, fazno ili impulsno modulisan) ili u digitalnom obliku kad se paralelno ili serijski prosleđuje na dalju obradu [2, 3]. Tehnologije senzora su naglo napredovale u poslednje dve decenije u smislu kompaktnosti, pametnosti i osetljivosti. Spoj fizičkog i virtuelnog prostora (*IoT – Internet of things*), moderni komunikacioni sistemi (optički sistemi, GPS navigacija, 5G i 6G mobilne mreže i dr.) su ubrzali razvoj pametnih senzora, ali i algoritama za automatsko donošenje odluka razvijenih na bazi veštačke inteligencije (fazi logika, neuronske mreže, mašinsko učenje, analitika velikih podataka...) [4 - 8]. Važno je istaći značaj merno-detekcionih algoritama i algoritama za donošenje odluka na bazi veštačke inteligencije, koji su inkorporirani kroz softverska rešenja u pametne senzore. Opšta klasifikacija senzora data je na slici 1.



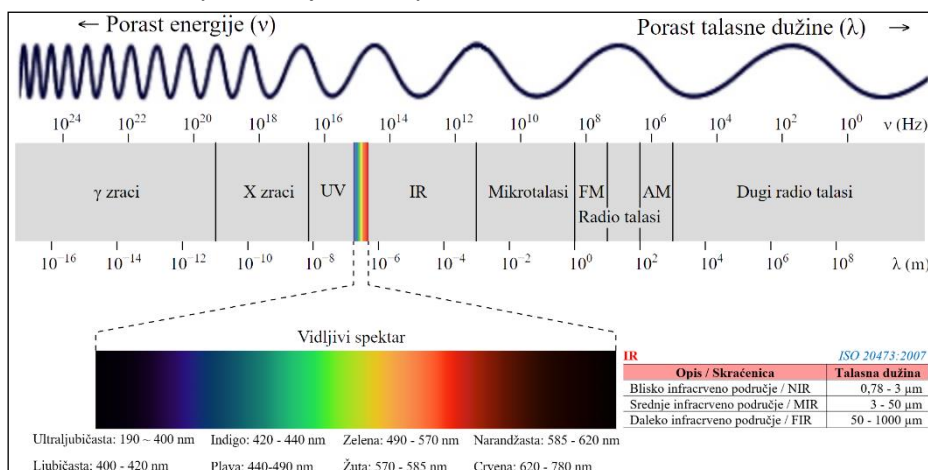
Slika 1. Opšta klasifikacija senzora [9 - 10]

S obzirom da razvoj namenske industrije (razvoj i proizvodnja policijskih i vojno-tehničkih sredstava) prednjači, ili bar prati pomenute trendove. Jedan od ciljeva ovog rada je detaljan prikaz policijsko-vojnog segmenta tih sredstava koji služi za merenje i monitoring temperature na bazi IC zračenja.

2. Tehnička sredstva na bazi IC zračenja

Ljudsko telo poseduje veliki broj prirodnih senzora koji nam omogućavaju da osetimo fizičko-hemijske fenomene iz životne okoline, kao što su temperatura, pritisak, svetlost, različiti ukusi i mirisi, itd. Međutim, postoji veliki broj fenomena u sredini koja nas okružuje, a za koje ljudsko telo ne poseduje senzore, tj. pojave koje ne možemo direktno da osetimo kao što su promene u magnetnom polju ili većina frekvencija elektromagnetnog spektra. [3]

Na slici 2 je prikazan elektromagnetni spektar i deo koji je vidljiv ljudskom oku, ali i delovi spektra koji nalaze primenu u različitim tehničkim sredstvima.



Slika 2. Elektromagnetni spektar (slika prilagođena prema [3])

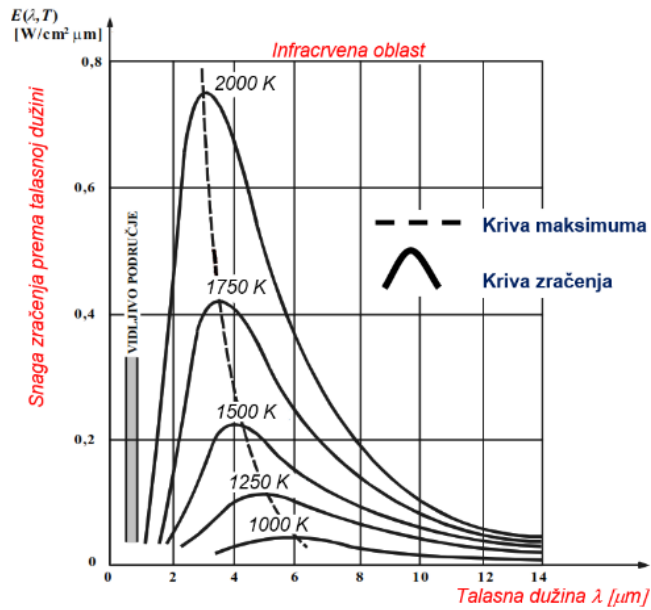
Infracrveno zračenje se sastoji od elektromagnetnih talasa čije se talasne dužine kreću od $0,78\mu\text{m}$ do $1000\mu\text{m}$, tj. između vidljive i mikrotalasne svetlosti. Područje talasne dužine od $0,78\mu\text{m}$ do $3\mu\text{m}$ često se naziva bliskim infracrvenim, oblast talasne dužine od $3\mu\text{m}$ do $50\mu\text{m}$ srednjim infracrvenim, a oblast talasne dužine od $50\mu\text{m}$ do $1000\mu\text{m}$ dalekom infracrveno područje.[11] U okviru ovog širokog spektra talasnih dužina, razvijeni su i proizvedeni različiti infracrveni uređaji. [12]

2.1. Daljinski nadzor i merenje temperature – osnovni principi

Automatska regulacija temperature obično se vrši na osnovu pretpostavke da je temperatura objekta ista u svim njegovim tačkama. Za takvu regulaciju dovoljno je merenje temperature samo u jednoj tački. Realni tehnički objekti, međutim, mogu imati značajne dimenzije tako da pojedine tačke tih objekata imaju različite temperature, odnosno značajnu raspodelu temperature. U tom slučaju temperatura je raspodeljena po objektu čineći tako njegovo temperaturno polje. Nastanak temperaturnog polja objašnjava se nejednakom raspodelom primesa i prisustvom lokalnih efekata u strukturi materijala, kao i mogućim različitim lokalnim hlađenjem i/ili zagrevanjem.

Ovaj rad se uglavnom oslanja na informacije o temperaturnom polju koje se dobijaju na osnovu infracrvenog (termičkog) zračenja objekta. Zračenje se prati istovremeno za sve tačke objekta (paralelni metod) ili se prati sukcesivno od jedne do druge tačke (metod skeniranja). Za registraciju merne informacije o temperaturnom polju upotrebljavaju se fotopapir, filmska traka, ploče sa fotoelementima ili tankim slojem tečnog kristala, piroelektrika i dr. Nastali zapis označava se kao termička slika, a sam uređaj koji služi za njeno dobijanje naziva se termograf ili termovizija. [13] Termička slika predstavlja objekte i scenu u kojima je kontrast slike rezultat zračenja i emisivnosti tela na različitim temperaturama objekta i pozadine. Sam proces stvaranja termalne slike se razlikuje od načina formiranja slike u vidljivom delu spektra. Termalno zračenje zavisi samo od temperature i emisivnosti tela (ako je temperatura tela veća od apsolutne nule -273.16°C) po teorijskom modelu zračenja crnog tela, unutar elektromagnetnog spektra koji teorijski obuhvata sve talasne dužine. Međutim, u praksi objekti se nalaze na pozadini koja menja njihovu temperaturnu signaturu, i objekti ne zrače kao idealna crna tela. Ove činjenice ukazuju da termalna slika nosi više informacija nego standardna slika u vidljivom delu spektra, dobijena procesom refleksije zračenja izvan samih objekata.

Intenzitet elektromagnetnog zračenja crnog tela u zavisnosti od temperature i frekvencije, odnosno talasne dužine definisao je Plankov zakon, prema jednačini (1) i slici 3. Proširena jednačina zračenja (2) predstavlja odnos signal/šum koji je od interesa pri izboru IC senzora.



Slika 3. Kriva zakona zračenja crnog tela [14]

$$W_{\lambda}(T) = \frac{c_1}{\lambda^4} \cdot \frac{1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} [W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1}] \quad (1)$$

gde su:

$$c_1 = 2\pi c^2 h = 3,7413 \cdot 10^8 [W \cdot \mu m^4 / m^2]$$

$$c_2 = ch / k = 1,4388 \cdot 10^4 [\mu m \cdot K]$$

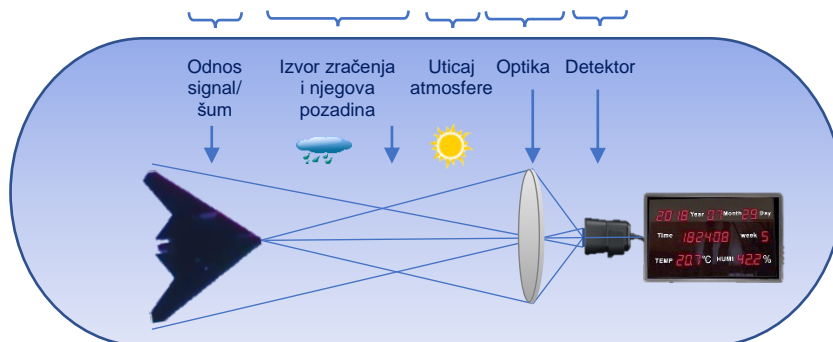
c_1 i c_2 - Plankove konstante zračenja

λ - talasna dužina

T - apsolutna temperatura

W_{λ} - zračna eksitansa u uglu od 2π steradijana.

$$\frac{S}{N} = [W_T \varepsilon_T - W_B \varepsilon_B] [\tau_A] \left[\frac{\tau_0 d'}{4(f/D)^2} \right] \left[\frac{D^*}{\sqrt{\Delta f}} \right] \quad (2)$$



Slika 4. Proširena jednačina zračenja – realni prikaz u prostoru [14]

Značenje pojedinih veličina u jednačini (2):

S/N - odnos signal/šum,

D^* - specifična detektivnost,

Δf - frekventni opseg detektora,

ϵ - emisivnost,

d' - linearna dimenzija lika koji pada na aktivnu površinu detektora,

τ_0 - transmitansa posle apsorpcije i Fresnelovih gubitaka svih optičkih elemenata sistema,

f/D - odnos učestanosti zračenja i detektivnosti senzora,

τ_A - transmitansa atmosfere,

W - emitansa zračenja.

Osnovni tipovi infracrvenih detektora su: termalni detektori, fotoemisivni vakumski detektori, detektori sa interakcijom elektromagnetnih talasa, fotonski detektori, QWIP (*quantum wellinfrared photodetector*). Optimalan izbor bilo kog mernog senzora ili detektora ne predstavlja ništa manji problem od izbora merne metode. Izbor merne metode jeste prvi korak, koji umnogome i sužava potonji izbor mernog senzora. Međutim, karakteristike mernih senzora i mernih detektora, kao manje celine, velikim delom utiču na kvalitet merenog signala. Merna metoda daje početne okvire, ali kvalitet signala, detektivnost, brzina odziva, uticaj sredine i dr. umnogome zavise samo od izabranog mernog senzora.

Izbor IC detektora prema talasnoj dužini se vrši prema jednačini (3) [15]:

$$\lambda_e^{-5} e^{-c_2/\lambda_e T} = K C_1 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda^{-5} e^{-c_2/\lambda T} d\lambda \quad (3)$$

gde su:

λ_e - efektivna talasna dužina,

T - temperatura merenog objekta u Kelvinima,

K - konstanta koja zavisi od konstrukcije detektora,

$[\lambda_1, \lambda_2]$ - izabrani opseg talasnih dužina.

Efektivna talasna dužina se menja sa temperaturom, pa se shodno tome ona može računati i prema kalibracionoj funkciji $F(T)$ detektora (4) za definisani merni opseg ($T_1 - T_2$). Data funkcija (4) zavisi od temperature merenog objekta T (°K), njegove emisivnosti (ε) i parametra N (5) [15].

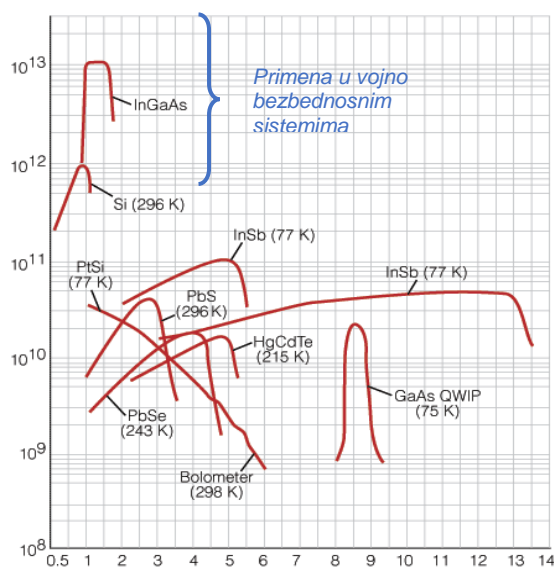
$$F(T) = \varepsilon K T^N \quad (4)$$

$$N = \frac{c_2}{\lambda_e T} = \frac{14388}{\lambda_e T} \quad (5)$$

Važno je istaći da izborom detektora sa višim vrednostima parametra N (standardne komercijalne vrednosti su $N \approx 4$) se postiže to da emisivnost merenog objekta manje utiče na mereni rezultat, što je u praksi veoma poželjno s obzirom na maskiranje mete i sl. Dodatni benefit detektora sa višim vrednostima ovog parametra su te da je mereni signal otporniji na smetnje tj. slabljenje signala koje je uslovljen:

1. Prljavim optičkim sistemom,
2. Gasovima u merenoj sredini,
3. Vlagom u merenoj sredini.

Na slici 5 i tabeli 1 su razvrstani IC detektori prema detektivnosti u funkciji merenih talasnih dužina i radnih temperatura što predstavlja potreban ali, svakako ne i dovoljan uslov za pravilan izbor detektora. Izbor infracrvenog detektora se takođe pravi prema datoj aplikaciji odnosno upotrebi i prema više karakterističnih parametara samih detektora: odnos signal/šum (S/N), brzina odziva, opseg talasnih dužina, način hlađenja, dužina trajanja, prag osetljivosti, detektivnost i dr.



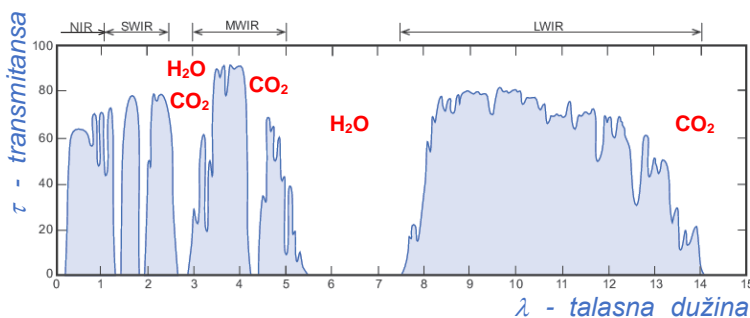
Slika 5. Najčešće korišćeni infracrveni detektori (uži izbor) [16]

Tabela 1. Podela detektora: Talasne dužine/Primena [17]

Spektralni opseg	Opseg [μm]	Materijal detektora*	Primena
NIR	0.74- 1	SiO ₂	Telekomunikacije
SWIR	1 - 3	InGaAs, PbS	Daljinska detekcija
MWIR	3 - 5	InSb, PbSe, PtSi, HgCdTe	Detekcija visoke temperature (u zatvorenom prostoru, naučno istraživanje)
LWIR	8 - 14	HgCdTe	Temperatura okoline (spoljašnja, industrijska detekcija)
VLWIR	14 - 1000	—	Spektrometrija, astronomija

*Si: silicijum; SiO₂: silicijum-dioksid; In: Indijum; Ga: galijum; As: arsen; Pb: olovo; S: sumpor; Sb: antimon; Se: selen; Pt: platina; Hg: živa; Cd: kadmium; Te: telur.

Na slici 6 je dat prikaz prostiranja IC zračenja kroz realnu sredinu (atmosfera) i predstavlja osnovu za izbor senzora prema talasnim dužinama i slabljenju signala. Sistem za snimanje koji radi u MWIR i LWIR opsegu može biti potpuno pasivan, ne zahtevajući spoljno osvetljenje, jer je termovizija u stanju da oseti energiju koja se emituje direktno iz objekata u sceni [18]. Glavni faktori koji određuju koliko svetao objekat treba da bude su temperatura objekta i njegova emisivnost. Kako se objekat zagreva, on zrači više energije i deluje svetlije za sistem termičke slike. Emisivnost je fizičko svojstvo materijala koje opisuje koliko neko telo efikasno zrači toplotu. Npr. tkanina ima nižu emisivnost od kože, prva će izgledati tamnije u termoviziji čak i kada su oboje na potpuno istoj temperaturi. [19]



Slika 6. Spektralni prikaz infracrvenog zračenja [20].

Razmak između 5,5 i 7,5 μm nastaje zbog molekula vlage (vode) u vazduhu koji u potpunosti apsorbuju IC zračenje.

Senzori koji mogu da detektuju MWIR i LWIR zračenje često zahtevaju hlađenje (kriogeno ili električno) kako bi postigli razuman nivo detekcije. U tabeli 1 je dat uporedni prikaz različitih infracrvenih sistema baziranih na slici (*imaging technology*).

Tabela 1. Usporedne karakteristike IC kamera i sistema na bazi IC slike [21]

	Vidljivost	NIR/ ZLID	SWIR	Bez hlađenja	Sa hlađenjem
Cena	Niska	Srednja	Visoka	Srednja	Visoka
ITAR* uslovi	Ne	Ne	Da	Ne	U većini slučajeva
Rezolucija	★★★★★	★★★★	★★★	★★	★★★
Detekcija dugog dometa	★★	★	★★★	★★★★	★★★★★
Identifikacija dugog dometa	★★★★★	★★★★	★★★	★	★
Noćni režim rada	★	★★★★	★★★	★★★★★	★★★★★
Nevidljivost u noćnim uslovima	★★★★	★	★★★★	★★★★★	★★★★★
Energetska efikasnost	★★★★	★	★★★★	★★★★	★★
Ambijent - dim	★	★★★	★★★★	★★★★★	★★★★★
Ambijent - retka magla	★	★★	★★★★	★★★★	★★★★
Ambijent - gusta magla	★	★	★★	★★	★★

* - Propisi o međunarodnom prometu oružja

2.2. Specijalni sistemi temperaturnog daljinskog nadzora

U današnje vreme, razvoj sistema za merenje različitih parametara u industriji zahteva sintezu znanja iz više naučnih oblasti. Sve se češće sreću složeni merni sistemi koji objedinjuju oblasti optike, mehanike, komunikacija, merne i procesne tehnike i dr. Upotreba računara i uvođenje automatizacije se više i ne pominje kao moderno već kao podrazumevano. [22]

Termografija je metoda beskontaktnog merenja temperature površine objekta, snimanjem infracrvenog spektra zračenja površine. Svaki objekat sa svoje površine odaje toplotnu energiju infracrvenim zračenjem čija talasna dužina zavisi od temperature objekta. Termografska kamera je uređaj koji omogućava da se snimi zračenje sa površine nekog objekta i prikaže u čoveku vidljivom (optičkom) spektru. Jednostavno rečeno, termografija omogućava da se sazna, vizuelnim prikazom, temperatura objekta i njena raspodela bez potrebe za kontaktnim merenjem.

Zahvaljujući okolnostima da se termografski nadzori, praćenja i kontrole izvode bez fizičkog uticaja na mereni i nadzirani proces (kretanje, vršenje radnje, saobraćajni proces, industrijski proces, nadzor i kontrola prenošenja oružja i narkotika i sl.) i činjenici da se radi o mernim uređajima sa velikom osetljivošću, singulariteti, promene i neispravnosti na objektima se mogu otkriti u ranoj fazi nastanka. Na ovaj način se stvaraju uslovi da se pravovremeno preduzmu odgovarajuće aktivnosti. Vrednosti temperature – njena visina, raspodela ili odstupanje od očekivane vrednosti, daju mogućnosti za ocenu stanja i moguće promene stanja nadziranog procesa ili objekta. [23]

3. IC kamere u specijalnim tehničkim sistemima

Infracrvene kamere dolaze u tri osnovna tipa spektralnog opsega [24] (slika 2):

- Kratke talasne dužine. Kamere pružaju veoma visoku rezoluciju, u odnosu na spektar vidljive svetlosti, u kontrastu senke i detalja). Aktivni IC sistemi koriste infracrveno svetlo kratke talasne dužine za osvetljenje oblasti od interesa, kao i kamere za noćni režim rada (IC naočare),
- Srednje talasne dužine. Slike nisu tako detaljne zbog povećane količine atmosferske apsorpcije unutar ovog spektralnog opsega. Kamere u ovom opsegu se koriste za očitavanje ekstremno visokih temperatura, kao što su skeniranje žarišta požara, centri eksplozija, kotlovi u elektranama itd.) i
- Duge talasne dužine (kamere koje rade u ovom spektralnog opsegu pružaju mnogo detalja, jer je atmosferska apsorpcija minimalna. Kamere dugih i srednjih talasnih dužina (termovizija – pasivni sistemi koji osećaju samo razlike u toploti) obezbeđuju precizna merenja temperature i mogu proizvesti detaljne razlike u malim ili velikim temperaturnim rasponima.

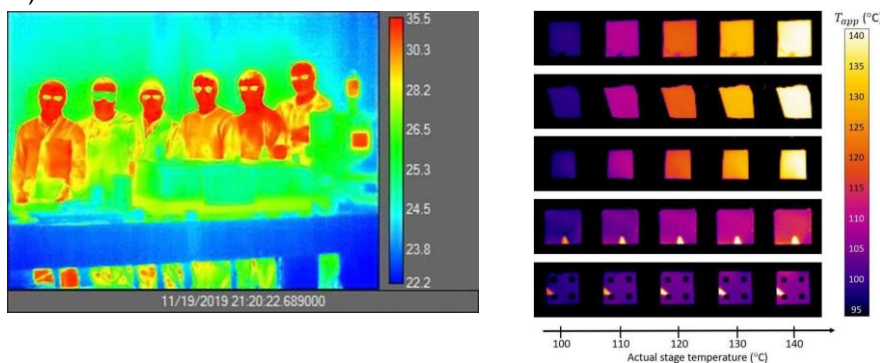
Sledeći izneti primeri govore u prilog neophodnosti i sve većoj primeni IC kamera od sektora bezbednosti pa do unapređenja svakodnevnih ljudskih aktivnosti. Krivična dela koja uključuju upotrebu vatrenog oružja su u porastu u poslednjih nekoliko godina. Pucnjave u američkim školama privukle su posebnu pažnju, jer se čini da se dešavaju sve češće. U proseku, svake nedelje dogodi se jedna pucnjava u kojoj je neko ubijen ili ranjen u školi. Neki ljudi tvrde da je ključ za ograničavanje takvih događaja otkrivanje skrivenog oružja i njegovo držanje što dalje od škole. Tako je student iz Merilenda uz pomoć IC kamere, koja može biti povezana sa mobilnim telefonom, i algoritma za automatsko donošenje odluka (*decision making algortithm*) baziranog na veštačkoj inteligenciji (višeslojna neuronska mreža) mreža razvio sistem za otkrivanje skrivenog hladnog (noževi, palice...) i vatrenog oružja (slika 7). [25]



Slika 7. RGB slika (levo) i IC slika (desno) [26]

Sledeći primer ukazuje da prednosti i ograničenja termalnih IC sistema. Poznato je da se toplotna energija emituje iz skoro svih izvora na našoj planeti. Pošto različiti materijali apsorbuju i zrače toplotno zračenje različitim brzinama, oblast za koju verujemo da ima samo jednu temperaturu, imaće spektar različitih temperatura. Na primer, gledanje osobe kroz termalnu kameru pokazaće da naša tela imaju male temperaturne razlike od jedne oblasti do druge. Termalne kamere detektuju ove temperaturne razlike i uz primenu softvera ih pretvaraju u detalje slike.

Na slici 8 je prikazan temperaturni spektar (levo) i napredak novih tehnologija (desno), gde se konvencionalni materijali (tri gornja reda) na infracrvenoj kameri pojavljuju sa promenama temperature dok se zagrevavaju, a materijali koji na sebi imaju ultratanki premaz koji je napravljen od samarijum nikl oksida, pokazuju izuzetno male promene u temperaturama (poslednja dva reda).



Slika 8. Svakoj temperaturi se pridružuje određena boja [27]

Pomenuti premaz emituje fiksnu količinu toplotnog zračenja bez obzira na njegovu temperaturu. Ovo je prvi put da su naučnici odvojili temperaturu i toplotnu emisiju svetlosti kod čvrstog tela. Napravljeni premaz „razbija“ vezu između temperature i toplotnog zračenja na vrlo specifičan način.

3.1. Dronovi i bespilotne letilice

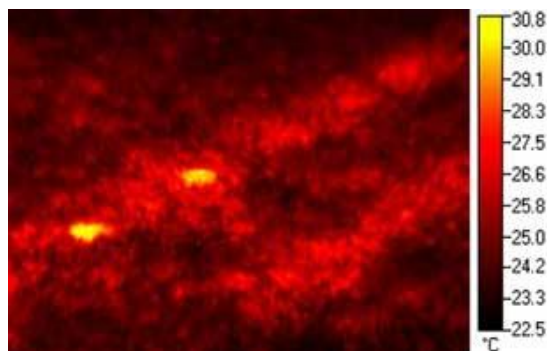
Ako su prvu deceniju 21 veka obeležili senzori i nano tehnologije, onda se za drugu može reći da je decenija IoT uređaja, dronova i bespilotnih letelica. Dronovi i bespilotne letilice sa termalnim kamerama pomažu da se poveća efikasnost i poboljša bezbednost ljudi i njihove infrastrukture.

Termovizijske kamere postavljene na dron predstavljaju moćan alat, koji se može koristiti u mnogim sektorima od građevinarstva, rudarstva, elektrotehnike, nadzora, gašenja požara, traganja i spašavanja nestalih lica, pa do različitih primena u policiji i vojsci.

Neki primeri iz prakse gde su na dronove i bespilotne letilice, kao specijalna tehnička sredstva, postavljene termalne kamere za:

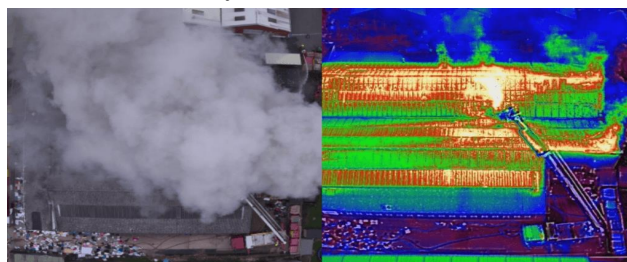
- Pronalaženje nestalih ljudi. Dronovi sa termalnim kamerama imaju odlične rezultate u pronalaženju nestalih ljudi, u mnogim slučajevima kada su terenske pretrage neuspešne. [28]
- Praćenje stanja vazdušnih visokonaponskih vodova i izolatora i druge elektroenergetske opreme. [28]
- Detektovanje mina. Budućnost potrage i uklanjanja nagaznih mina leži u prostornom termalnom mapiranju pomoću dronova sa infracrvenim kamerama na bazi veštačke inteligencije. Značaj ovakvog pristupa u otkrivanju nagaznih mina leži u činjenici da se procenjuje da postoji više od 100 miliona, zakopanih ili razbacanih po površini, nagaznih mina širom sveta. Pritom se svakodnevno postavlja novih 5000 mina. [29-31].

Na slici 9 je prikazana termalna slika napravljena IC kamerom koja pokazuje dve nagazne mine plitko zakopane u tlu (prikazano žutim tačkama).



Slika 9. IC slika dve nagazne mine [32]

- Detektovanje i borba protiv požara. Dron sa termalnom kamerom je veoma koristan alat za vatrogasce. Ova tehnologija može da „vidi“ kroz dim i prašinu i da tako otkrije žarišta.



Slika 10. Zgrada koja gori u dimu (leva slika) i termalna IC slika (desna slika) [28]

Posebna pažnja u radu je posvećena prikazu niza primera iz prakse koji treba da omoguće korisnicima specijalnih sredstava njihov pravilan izbor, kako iz metrološkog ugla, tako i prema oblasti primene.

Razvoj dronova, noćnih vizira, sistema za detekciju i praćenje požara i mnogih drugih civilnih, vojnih i policijskih sredstava sve češće podrazumeva primenu tzv. pametnih senzora i sistema koji u sebi sadrže procesorske jedinice sa ugrađenim algoritmima za automatizovano donošenje odluka na bazi veštačke inteligencije. Budućnost koju smo pre nekoliko godina gledali samo u filmovima danas je postala realnost. Strategije i koncepti interneta stvari (*IoT*) se uveliko primenjuju u borbi protiv kriminala i u vojnim akcijama. Primena dronova i bespilotnih letilica sve više odmenjuje standardne pilotske letilice. Ovaj rad ukazuje na neophodnost integracije mernih tehnika, metoda i koncepcija sa najrazličitijim scenarijima i oblastima primene pre svega infracrvenih mernih i nadzornih sistema, senzora i kamera.

Literatura

- [1] J. G. Webster, H. Eren, *Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*, Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2014. [Online]. Available: http://www.ime.cas.cn/icac/learning/learning_5/202107/P020210721600385915735.pdf. [Accessed October 31, 2021].
- [2] M. Ž. Blagojević, *Alarmni sistemi*, Fakultet zaštite na radu, Niš, 2011.
- [3] M. Ž. Blagojević, R. Radovanović, „Uloga senzora u bezbednosnim sistemima (zaštite, alarmnim sistemima)“, 2010. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/346659459_Uloga_senzora_u_be_zbednosnim_sistemima_zastite_alarmnim_sistemima [Accessed October 31, 2021].
- [4] S. D. Milić, Book Chapter: "Fuzzy-Decision Algorithms for Cyber Security Analysis of Advanced SCADA and Remote Monitoring Systems", in book: "Cyber Security of Industrial Control Systems in the Future Internet Environment", IGI Global, USA, Editors: Mirjana D. Stojanović and Slavica V. Boštjančić Rakas, ISSN: 1948-9730, DOI: 10.4018/978-1-7998-2910-2.ch007, 2020, USA, pp. 131-155.
- [5] S. D. Milić, B. M. Babić, "Towards the Future - Upgrading Existing Remote Monitoring Concepts to IIoT Concepts", *IEEE Internet of Things Journal*, Electronic ISSN: 2327-4662, DOI: 10.1109/JIOT.2020.2999196, Vol. 7, Issue 12, December 2020, pp. 11693-11700.
- [6] S. D. Milić, S. Veinović, M. Ponjavić: "Industrial Internet of Things (IIoT) – Strategies and Concepts", *XIX International Symposium Infoteh-Jahorina 2020, Proc.*, Vol.19, KST-4, Jahorina, Republic of Srpska, March 18-20, 2020, pp. 81-85.

- [7] S. D. Milić, D. Misović, "Detekcija kvarova i donošenje odluka na FOG i CLOUD nivoima industrijskog interneta stvari", 19. Simpozijum CIGRE Srbija – Upravljanje, telekomunikacije i zaštita u elektroenergetskom sistemu - STK C2, D2 i B5, Videokonferencija, Zbornik radova ISBN: 978-86-82317-86-9, Oznaka rada R D2 11, Strane: 1-8, 21 - 23. oktobar 2020, Srbija.
- [8] S. Milić, G. Stojadinović, N. Tomić: "Prilagođenje postojećih sistema daljinskog nadzora IIoT konceptima sa hijerarhijski definisanim nivoima obrade podataka", CIGRE - Srbija 35. savetovanje, Zbornik radova, ISBN: 978-86-82317-84-5, rad R D2 - 09, 03 - 08. oktobar 2021. godine, Zlatibor, Srbija.
- [9] R. M. White, „A sensor classification scheme“, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 1987, 34, 124–126.
- [10] V. Naresh, N. Lee, “A Review on Biosensors and Recent Development of Nanostructured Materials-Enabled Biosensors”, MDPI, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/4/1109/html> [Accessed October 31, 2021].
- [11] ISO 20473:2007 – Optics and photonics – Spectral bands
- [12] R. Radovanović, *Tehnička sredstva policije*, Kriminalističko policijska akademija, Beograd, 2015.
- [13] M. Popović, *Senzori i merenja*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva Srpsko Sarajevo, 2004.
- [14] Max J. Riedl, *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems*, Second Edition, SPIE, 2001.
- [15] Mikron, *Infrared thermometers: theory and construction*, <https://www.mrclab.co.il/Media/תורת%20טמפרטורה%20אל%20אנפד>
- [16] HAMAMATSU PHOTONICS K.K., *Characteristics and use of infrared detectors*, Japan, 2011.
- [17] MIVIM, Infrared Vision, 2007., <http://mivim.gel.ulaval.ca/dynamique/index.php?idD=58&Lang=1>
- [18] N. K. Dhar, R. Dat, and A. K. Sood, *Advances in Infrared Detector Array Technology*. IntechOpen, 2013. <https://www.intechopen.com/chapters/38815> [
- [19] “Infrared Emissivity Table,” www.thermoworks.com. https://www.thermoworks.com/emissivity-table/?avad=55097_c25112b81 (accessed Dec. 21, 2021).
- [20] Newport, Thermal Imaging, <https://www.newport.com/n/thermal-imaging>
- [21] Infiniti electro-optics, Visible, SWIR, MWIR, LWIR, NIR & More, <https://www.infinitioptics.com/technology/multi-sensor>
- [22] S. Milić, „Daljinski temperaturni nadzor polova rotora hidrogeneratora“, Zbornik radova, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, 2015. <http://www.zbornik-eint.org/wp-content/uploads/2015/04/24Daljinski-temperaturni-nadzor-polova-rotora-hidrogeneratora.pdf>

- [23] B. Ilić, *Elementi automatizacije*, Novi Sad, 2019., http://vtsns.edu.rs/wp-content/uploads/2018/11/Elem-autom_Skripta-za-Kol-2019.pdf
- [24] "Understanding the Three Types of Infrared Cameras," *Facilitiesnet*. <https://www.facilitiesnet.com/equipmentrentaltools/article/Understanding-the-Three-Types-of-Infrared-Cameras--10652> (accessed Dec. 21, 2021).
- [25] "Heating up the search for hidden weapons | Science News for Students," *Science News for Students*, Feb. 03, 2020. <https://www.sciencenewsforstudents.org/blog/eureka-lab/heating-search-hidden-weapons>.
- [26] H. Muchiri, I. L. Ateya, „The Need for Marker-Less Computer Vision Techniques for Human Gait Analysis on Video Surveillance to Detect Concealed Firearms“, *International Journal of Computer*, 2018.
- [27] U. of Wisconsin-Madison, "New Ultrathin Coating Uses Trickery to Hide Temperature Changes From Infrared Cameras," *SciTechDaily*, Jan. 09, 2020. <https://scitechdaily.com/new-ultrathin-coating-uses-trickery-to-hide-temperature-changes-from-infrared-cameras>.
- [28] "Thermal Camera Drones: Your In-depth Guide," *heliguy™*. <https://www.heliguy.com/blogs/posts/five-ways-a-thermal-camera-drone-can-help-you>.
- [29] D. M. Joss, „Anti-personnel landmine injuries: a global epidemic“, 1997. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24441894/>
- [30] *Minesweepers, Facts about landmines*, 2017., <https://www.landminefree.org/2017/index.php/support/facts-about-landmines>
- [31] I. K. S, endur, B. A. Baertlein, „Techniques for Improving Buried Mine Detection in Thermal IR Imagery“, http://people.ee.duke.edu/~lcarin/DeminingMURI/OSU_SPIE99_Imp_Det_IR.pdf
- [32] Infrared Light, <https://www.physicscentral.com/explore/action/infraredlight.cfm>
- [33] M. GERALYN, *Infrared-Based Imaging in Forensics*, 2017. <https://possibility.teledyneimaging.com/infrared-based-imaging-forensics/>
- [34] Teledyne FLIR, 2016, *How Applying Steam to Blood-Stained Cloth Made Thermal Imaging Possible*, <https://www.flir.com/discover/rd-science/forensic-investigations-using-thermography-and-steam/>
- [35] D. Cardone, A. Merla, "New Frontiers for Applications of Thermal Infrared Imaging Devices: Computational Psychophysiology in the Neurosciences“, *MDPI*, 2017.
- [36] *Infrared Spectroscopy*, 2013. <https://www2.chemistry.msu.edu/faculty/reusch/virttxtjml/spectrpy/infrared/infrared.htm>

- [37] N. M. Richard, P. Massey, Metal Detectors vs. Infrared Thermography to Search for Shell Casings,
<https://www.newhaven.edu/resources/documents/academics/surf/past-projects/2015/nicole-richard-poster.pdf>

Abstract. Special-purpose technical assets for measurement and monitoring are being rapidly developed with the goal of improving sustainable security and electronic protection of people and objects. A general division and application of intelligent infrared sensors in the security community is given in the paper. In a narrower sense, in the paper, a metrological overview of smart measuring sensors, devices, and systems is given. In a narrower sense, the paper analyses in detail the systems based on the use of thermal imaging cameras. A series of examples from world practice are given with the aim of illustrating the importance of measuring and monitoring IC systems use.

Keywords: special purpose devices, infrared (IR) radiation, measuring systems, sensors, detectors.

Infrared Sensors in Special Purpose Technical Assets

Zoran Milanović, Saša Milić, Radovan Radovanović

Rad primljen u uredništvo: 19.11.2021. godine.

Rad prihvaćen: 21.12.2021. godine.

