



**UNIVERZITET SINGIDUNUM**  
**BEOGRAD**  
**DEPARTMAN ZA POSLEDIPLOMSKE STUDIJE**

**DOKTORSKA DISERTACIJA**

**UTICAJ FEDINGA NA KOMUNIKACIJU  
SENZORSKIH ČVOROVA U BEŽIČNIM NOSIVIM  
TELESNIM SENZORSKIM MREŽAMA ZA VOJNU  
PRIMENU**

**MENTOR:**  
**Prof.dr.Petar Spalević**

**STUDENT:Milan Stanojević**  
**BROJ INDEKSA:466083/2016**

**Beograd, 2022. godina**

## Sadržaj

<b>APSTRAKT</b> .....	5
<b>ABSTRACT</b> .....	6
<b>SPISAK SLIKA:</b> .....	7
<b>SPISAK TABELA:</b> .....	10
<b>1. UVOD</b> .....	11
1.1 Mesto i uloga bežičnih senzorskih mreža .....	11
1.2 Nosive tehnologije u funkciji unapređenja zdravlja i bezbednosti ljudi .....	12
1.3 Nosive tehnologije u vojnoj primeni.....	13
1.4 Nadzor nad kritičnim životnim funkcijama u kritičnim situacijama .....	14
1.5 Neprekidnost komunikacije unutar bežične senzorske mreže .....	14
1.6 Pouzdan prenos podataka u bežičnoj senzorskoj mreži .....	15
1.7 Izazovi u primeni bežičnih senzorskih mreža i nosivih tehnologija .....	15
<b>2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE U NOSIVIM TEHNOLOGIJAMA</b> .....	19
2.1 Doprinos bežičnih senzorskih mreža razvoju nosivih senzorskih mreža.....	19
2.2 Upotreba BSM i nosivih tehnologija u zdravstvenom monitoringu .....	21
2.3 Upotreba bežičnih senzorskih mreža i nosivih tehnologija u vojsci .....	23
2.4 Budući pravci razvoja i sinergije bežičnih i nosivih senzorskih mreža .....	25
<b>3. ANALIZA FUNKCIONALNOG MODELA BNTSM</b> .....	28
3.1 Analiza modela BNTSM za nadzor fizioloških procesa u organizmu.....	28
3.2 Način komunikacije u BNTSM.....	29
3.3 Radio frekventna komunikacija u BNTSM.....	31
3.4 Bežični optički prenos u BNTSM .....	37
3.5 Bezbednost u BNTSM .....	41
3.6 Energetska efikasnost BNTSM .....	41
<b>4. VOJNA PRIMENA BNTSM</b> .....	43
4.1 Pravci razvoja BNTSM za vojnu primenu .....	45

4.2	Funkcionalni model BNTSM za fiziološki nadzor vojnika .....	49
4.3	Telekomunikaciona mreža senzorskih čvorova .....	53
4.4	Hijerarhijska komunikacijska struktura BNTSM.....	55
4.5	Hardver funkcionalnog modela BNTSM za vojnu primenu .....	56
4.6	Propagacioni izazovi u telekomunikacionoj mreži BNTSM .....	63
4.7	Snabdevanje energijom .....	64
5.	MODELOVANJE KANALA U TELESNOCENTRIČNOJ KOMUNIKACIJI BNTSM..	65
5.1	Matematički modeli atmosferskih turbulencija.....	72
5.1.1	Log-Normalna raspodela.....	72
5.1.2	Rajsova raspodela .....	73
5.1.3	Nakagami-m raspodela .....	74
5.1.4	Gamma-Gamma raspodela.....	74
5.1.5	Negativna eksponencijalna raspodela .....	75
5.1.6	M (Malaga) raspodela .....	75
6.	DIGITALNA SLIKA I TEHNIKE OZNAČAVANJA VODENIM ŽIGOM .....	77
6.1	Metode za insertovanje i ekstrakciju digitalnog žiga .....	80
6.2	Tehnike vodenog žiga u prostornom domenu .....	80
6.3	Tehnike vodenog žiga u frekvencijskom domenu .....	80
6.3.1	Insertovanje digitalnog vodenog žiga primenom DCT transformacije .....	81
6.3.2	Insertovanje digitalnog vodenog žiga primenom DFT transformacije .....	82
6.3.3	Insertovanje digitalnog vodenog žiga primenom DWT transformacije .....	82
6.3.4	Insertovanje digitalnog vodenog žiga primenom SVD transformacije .....	83
6.4	Osnovni parametri za ocenu kvaliteta i performansi sistema.....	83
7.	MODEL ATMOSFERSKOG TURBULENTNOG KANALA ZA PRENOS SLIKE.....	87
7.1	Digitalni vodeni žig kao mehanizam zaštite prenosa slike u Rajsovom FSO kanalu .....	87
7.2	Prenos slike sa vodenim žigom kroz Rajsov kanal .....	88
7.3	Algoritam za insertovanje i ekstrakciju vodenog žiga .....	90
7.4	Rezultati i analiza simulacije .....	93

7.5 Vidljivi digitalni vodeni žig u zaštiti prenosa slike u Rajsovom FSO kanalu .....	101
7.6 Algoritam FSO prenosa .....	101
7.7 VWM algoritam .....	102
7.8 Rezultati eksperimenta i analiza.....	105
8. PRENOS SLIKE SA UTISNUTIM VIDLJIVIM VODENIM ŽIGOM KROZ NULTI USMERENI DVOSTRUKI RAJSOV TURBULENTNI KANAL.....	109
8.1 Model sistema .....	110
8.2 Nov turbulentni model – atmosferski dvostruki Rajsov model .....	111
8.3 Neusklađeni model fejdinga.....	113
8.4 Statistika kompozitnog modela kanala.....	114
8.5 Algoritmi .....	115
8.5.1 Algoritam za prenos FSO kanalom.....	115
8.5.2 VWM algoritam .....	116
8.6 Eksperimentalni rezultati i analiza .....	119
8.6.1 Eksperiment .....	119
8.7 Osnova eksperimenta i rezultati .....	120
8.8 Analiza rezultata.....	125
9. ZAKLJUČAK.....	126
<b>LITERATURA .....</b>	<b>128</b>

## **APSTRAKT**

Svakodnevno se uvećavaju zahtevi za informacijama u procesu odlučivanja. Savremena bojišta svakako nisu izuzetak, jer se na osnovu tačnih i pravovremenih informacija mogu donositi odluke koje na kraju mogu spasiti ljudske živote, smanjiti upotrebu prekomerne sile ili pak uništenje vojne tehnike. Količine i vrste podataka koje senzorske mreže generišu na samom terenu postavljaju tehničke izazove pred komunikacionu tehniku da obezbede pravilan, potpun i bezbedan način protoka informacija. Jedan od problema koji je potrebno istražiti je komunikacija bežičnih senzorskih mreža koje imaju nove karakteristike i zahteve na komunikacionim sistemima i mrežnim protokolima, a koji se razlikuju od konvencionalnih mreža za komunikaciju podataka. Pojava fedinga u bežičnim senzorskim mrežama je sigurna, ali sam sistem svojom konfiguracijom senzorskih čvorova i kombinacijom bežičnih tehnologija čini da se interferencija u kanalu smanji i poveća kapacitet protoka samog kanala. Bežične senzorske mreže se organizuju u hijerarhiskom i ćelijskom nivou. S druge strane veliki broj ćelija utiče da se poveća i broj radio kanala, a sa povećanjem broja radio kanala dolazi do međukanalne interferencije što direktno utiče kvalitet prenosa podataka radio kanalom. Cilj je postići potreban nivo kapaciteta u prenosu i kvaliteta u prijemu signal na krajnoj tački. Dodatak, konvencionalnim RF sistemima komunikacije, u obliku FSO komunikacionih sistema predstavljaju značajno unapređenje koje može unaprediti performanse, brzine prenosa i bezbedniji prenos podataka. U radu je predložena hibridna RF/FSO mobilna senzorska mreža koja uspešno treba za prevaziđe komunikacione probleme konvencionalne RF mreže. U radu je istražena mogućnost da se kroz optički kanal u prisustva fedinga (scintilacije) prenesu kompleksniji podaci (slika, video i sl.), kao i kako u prisustvu fedinga u optičkom kanalu dolazi do degradacije podatka.

## **ABSTRACT**

The demands for information in the decision-making process are increasing every day. Modern battlefields are certainly no exception, because based on accurate and timely information, decisions can be made that can ultimately save human lives, reduce the use of excessive force, or destroy military equipment. The amounts and types of data that sensor networks generate in the field pose technical challenges for communication techniques to ensure a proper, complete and secure way of information flow. One of the problems that needs to be investigated is the communication of wireless sensor networks, which has new characteristics and requirements on communication systems and network protocols, which differ from conventional networks for data communication. The appearance of fading in wireless sensor networks is certain, but the system itself, with its configuration of sensor nodes and the combination of wireless technologies, makes the interference in the channel decrease and increases the flow capacity of the channel itself. Wireless sensor networks are organized in a hierarchical and cellular level. On the other hand, a large number of cells has the effect of increasing the number of radio channels, and with an increase in the number of radio channels, inter-channel interference occurs, which directly affects the quality of data transmission through the radio channel. The goal is to achieve the required level of transmission capacity and signal reception quality at the end point. In addition to conventional RF communication systems, in the form of FSO communication systems, they represent a significant improvement that can improve performance, transmission speeds, and more secure data transmission. The paper proposes a hybrid RF/FSO mobile sensor network that successfully overcomes the communication problems of the conventional RF network. The paper investigated the possibility of transmitting more complex data (pictures, video, etc.) through the optical channel in the presence of fading (scintillation), as well as how data degradation occurs in the presence of fading in the optical channel.

## SPISAK SLIKA:

Slika br. 1 Nosiva mreža senzora tela.....	19
Slika br. 2 Model bežične senzorske mreže.....	21
Slika br. 3 Minijaturna insulinska pumpa NanoPUMP. MEMS pumpa 10x6mm <sup>2</sup> (a) (b), mehanizam MEMS pumpe postavljen na keramičkom supstratu (c), izgled insulinske pumpe aplikovan na ruci pacijenta (d).....	23
Slika br. 4 Hardverske i softverske komponente senzorskog čvora BSM.....	24
Slika br. 5 Mesto i uloga BSM u praćenju stanja na bojištu.....	25
Slika br. 6 Komunikaciona arhitektura BNTSM .....	29
Slika br. 7 Prikaz mrežne topologije BNTSM u klasteru.....	31
Slika br. 8 Spektralni raspored u standardu IEEE 802.15.6 za primenu u BNTSM.....	35
Slika br. 9 Blok dijagram RF/FSO bežičnog senzorskog čvora u BNTSM.....	38
Slika br. 10 Izgled bežičnog senzorskog čvora sa optičkim predajnikom i prijemnikom.....	39
Slika br. 11 FSO komunikacioni sistem bežične senzorskog čvora.....	40
Slika br. 12 Sistema Equivital™ Black Ghost EQ01(levo),EQ02(sredina) i EQ02 +(desno).....	43
Slika br. 13 Arhitektura nosivog telesnog senzorskog sistema Black Ghost.....	44
Slika br. 14 Rani koncepta fuzije podataka sa BNTSM za predviđanje fizioloških ishoda od značaja za vojnu obuku i borbeno operativno okruženje.....	47
Slika br. 15 Šematski raspored senzorskih čvorova u BNTSM.....	51
Slika br. 16 Šematski raspored elektroda i senzorskog čvora u šlemu.....	52
Slika br. 17 Šematski raspored elektroda i senzorskog čvora na grudima.....	52
Slika br. 18 Šematski raspored elektroda i senzorskog čvora u balističkoj rukavici.....	53
Slika br. 19 Povezanost senzorskih čvorova na distributivnom i kooperativnom nivou .....	54
Slika br. 20 Hijerarhijska komunikacijska struktura BNTSM na nivou voda.....	56
Slika br. 21 Programabilni mikroračunar Arduino DUE.....	57
Slika br. 22 Multimedijalni senzorski čvor sa FSO komunikacijskim kanalom.....	59
Slika br. 23 Senzorski čvor br. 1 za merenje EEG signala.....	60

Slika br. 24	Multimedijalni senzorski čvor za monitoring okruženja.....	61
Slika br. 25	Senzorski čvor br. 2 za merenje EKG signala.....	61
Slika br. 26	Senzorski čvor br.3 u rukavici.....	62
Slika br. 27	Senzorski čvor br. 4 na uniformi.....	62
Slika br. 28	Izgled turbulentnog FSO kanala sa sistemom za detekciju.....	69
Slika br. 29	Slike korišćene u eksperimentu Lena, Devojka, Majmun i Paprika.....	94
Slika br. 30	Slika korišćena kao vodeni žig.....	94
Slika br. 31	Slike nakon prenosa kroz Rajsov FSO turbulentni kanal sa parametrom $K=1$ (a,c) i $K=10$ (b,d).....	95
Slika br. 32	Slike ekstrakovanog digitalnog vodenog žiga nakon prenosa kroz Rajsov FSO turbulentni kanal sa parametrom $K=1$ (a – iz slike Lena, c – iz slike Majmun) i $K=10$ (b – iz slike Lena, d – iz slike Majmun).....	96
Slika br. 33	MSE prenesenih slika Lena, Devojka, Majmun i Paprika kroz Rajsov FSO turbulentni kanal.....	98
Slika br. 34	MSE ekstrakovanog žiga iz prenesenih slika Lena, Devojka, Majmun i Paprika iz prenesenih slika kroz Rajsov FSO turbulentni kanal.....	98
Slika br. 35	PSNR iz prenesenih slika Lena, Devojka, Majmun i Paprika kroz Rajsov FSO turbulentni kanal.....	99
Slika br. 36	PSNR ekstrakovanog žiga iz prenesenih slika Lena, Devojka, Majmun i Paprika iz prenesenih slika kroz Rajsov FSO turbulentni kanal.....	99
Slika br. 37	Uporedni dijagram za parameter BER za prenesenu sliku Lena.....	100
Slika br. 38	Originalna slika a) Lena i b) vodeni žig.....	106
Slika br. 39	Slika Lena sa digitalnim vodenim žigom za $k=2$ rekonstruisana nakon prenosa za: a) $K=1$ i b) $K=10$ .....	106
Slika br. 40	Mera kvaliteta za parameter BER prenešene slike Lena ( $k=4$ ).....	107
Slika br. 41	Mera kvaliteta za parameter MSE prenešene slike Lena za različite vrednosti veličine bloka Rajsovog parametra $k$ .....	107
Slika br. 42	Slike: a) Lena i b) vodeni žig.....	121
Slika br. 43	Rekonstruisane slike Lena obeležene vodenim žigom sa $k=2$ , za vrednost a) $K=5$ i b) $K=10$ .....	121
Slika br. 44	Kvalitativno merenje ABER prenetu slike Lena.....	122



Slika br. 45 Kvalitativno merenje MSE za prenetu sliku Lena preko Rajsovih uslova turbulencije za različite vrednosti parametra veličine bloka $k$ .....	122
Slika br. 46 Kvalitativno merenje ABER prenete slike Lena (dimenzija bloka $k = 2$ ) za različite vrednosti $K_1$ i $K_2$ .....	123
Slika br. 47 Kvalitativno merenje MSE za prenetu sliku Lena preko boresighta/dvostruke Rajsove turbulencije za različite vrednosti parametra veličine bloka $k$ .....	123
Slika br. 48 Slika Lena obeležena vodenim žigom sa $k=2$ , rekonstruisana nakon prenosa sa $K_1=5, K_2=5$ (a), $K_1=5, K_2=10$ (b), $K_1=10, K_2=5$ (c), $K_1=10, K_2=10$ (d).....	124

## **SPISAK TABELA:**

Tabela br. 1 Poređenje bežičnih senzorskih mreža i bežičnih nosivih mreža.....	20
Tabela br. 2 Polja rada i primene BNTSM.....	28
Tabela br.3 Komparativna analiza postojećih bežičnih tehnologija za BNTSM.....	32
Tabela br. 4 IEEE802.15.6 modulacioni parametri.....	36
Tabela br. 5 Tehničke karakteristike pločeArduino DUE.....	57
Tabela br. 6 Testni komunikacijski moduli.....	58
Tabela br. 7 Pregled radio standarda za BNTSM.....	58
Tabela br.8 Pregled brzine prenosa i QoS zahteva za nosive senzore.....	63
Tabela br.9 MSE prenesenih slika i ekstrakovanog žiga.....	96
Tabela br. 10 PSNR prenesenih slika i ekstrakovanog žiga.....	96
Tabela br.11 Način dobijanja koeficijenta za svaki blok.....	101

## 1. UVOD

### 1.1 Mesto i uloga bežičnih senzorskih mreža

U proteklim godinama je interesovanje za bežičnim senzorskim mrežama dramatično poraslo imajući u vidu da ih je neprekidni razvoj računarskih i telekomunikacionih tehnologija u pogledu mogućnosti, veličine i cene doveo do toga da su postali neizbežni deo svakog novog tehnološkog izuma. Takođe, tehnologije bežičnih senzorskih mreža se smatraju se jednim od ključnih područja istraživanja u računarskoj nauci i industriji nosivih tehnologija (*eng. Wearable technology*) kojima se bitno želi unaprediti kvalitet života čovečanstva. Ovakva sinergija tehnologija uvodi novu životnu paradigma *nosivih telesnih bežičnih senzorskih mreža* u primeni za bezbednosno kritične operacije i misije (elementarne nepogode, požari, vojne operacije, ekološki akcidenti i sl.). Ova paradigma ima širok opseg primene kako u civilnom, tako i u vojnom okruženju, uključujući upravljanje kritičnim situacijama, bezbednosti ljudi u opasnim okruženjima, mobilni nadzor zdravlja, podrška aktivnom životu nepokretnih lica i još mnogo toga. U tom kontekstu se od ovakvih mreža očekuje da veoma brzo reaguju na promene i time utiču na unapređenje, zaštitu i spasavanje ljudskih života. Pored toga se od ovakve tehnologije očekuje da podrži i bitnije unapredi način funkcionisanja ljudi i potpomogne njihovom odlučivanju kako u svakodnevnom životu, tako i u kritičnim i bezbednosno rizičnim situacijama u kojima se čovek može naći. Da bi se razumele mogućnosti i dostignuća ovakve tehnologije potrebno je razmotriti njihovo mesto i ulogu, specifične tehničke karakteristike i zahteve za određenim primenama i kontekstima njihove upotrebe. Svaki nova analiza pogledu standarda i nova dostignuća istraživača na ovom polju treba da daju uvid u moguća ograničenja i mogućnosti, pre bilo kakve konkretne primene. Svaka moguća primena se mora sagledati iz različitih perspektiva, što na koncu dovodi do bitnog unapređenja i određenja pravaca istraživanja i mogućeg razvoja svake nove tehnologije. Dosadašnja primena bežičnih senzorskih mreža bitno se ticala registrovanja i merenja fizičkih pojava u okolini čoveka ili za čoveka bitnog prostora, bilo da je to registrovanje vazdušnog zagađenja, požara, nadzor granice, registrovanje neprijateljskih jedinica ili praćenje stanja opreme i zaliha. Na bitan iskorak u ekspanziji bežičnih senzorskih mreža uticala je jedna nova tehnologija – *Internet stvari* (*eng. Internet of things - IoT*), koje su učinile da se na izgled nepovezane tehnologije mogu učiniti globalno povezanim. To je još više uticalo na razvoj tehnologija koje su se zasnivale na *M2M* komunikaciji (*eng. Machine-to-machine - M2M*), čineći uobičajene uređaje pametnijim povezujući ih putem globalne mreže sa drugim uređajima ili udaljenim korisnicima. Komunikacija mašina-mašina (M2M) smatra se jednim od ključnih pokretača za pružanje

naprednih aplikacija i usluga u budućnosti, kao što su pametni gradovi i bolnice, kao i automatizovani rad automobila i industrijske automatizacije. Buduća ekspanzija 5G mobilnih mreža dodatno će potpomognuti tri osnovna zahteva M2M tehnologije koje su sadržane u masovnoj podršci velikog broja uređaja sa malim brzinama prenosa podataka, održavanje minimalne brzine prenosa podataka u gotovo svim okolnostima i vrlo nisko kašnjenje u prenosu podataka. Procena je da je u 2021. godini ukupan broj povezanih uređaja bio oko 46 milijardi, dok su predviđanja da će u 2025. godine taj broj premašivati 75 milijardi. Značajan deo povećanja očekuje se od unapređenja M2M komunikacija, koje su sa svojom sposobnošću da pružaju raznovrstan set aplikacija i usluga, postali ključno iskorak tehnologije od 4G ka 5G sistemima.

## **1.2 Nosive tehnologije u funkciji unapređenja zdravlja i bezbednosti ljudi**

Tehnološka revolucija u 21. veku dramatično je preoblikovala uslove rada u ljudskom društvu. Opis mnogih poslova se značajno promenio upravo zato jer su manuelne poslove zamenili inteligentniji i manje fizički zahtevni poslovi u kancelarijama ili na automatizovanim proizvođačkim linijama. Ovakva drastična promena radnih uslova bitno je uticala na psihofizičko i zdravstveno stanje radnika, koje su razne studije sprovedene od strane istraživača i menadžera prepoznali da loše zdravlje i dobrobit zaposlenih mogu podjednako negativno pogoditi i radnu snagu i samu organizaciju. To se ogleda u troškovima izgubljene proizvodnje, negativnog uticaj na moral osoblja, loš publicitet, pravnih troškova i troškova zamene zaposlenih ili opreme. Stoga je potrebno poboljšati zdravlje i sigurnost radnika kako bi to obostrano koristilo i kompaniji i zaposlenima. Sa tim u vezi kompanije su započele sa uključivanjem finansijskih podsticaja i pristupa koji se zasnivaju na informacionoj i komunikacijskoj tehnologiji (**skr. IKT**) u svoje programe promocije zdravlja i bezbednosti; ovakav pristup je osmišljen kako bi se poboljšalo zdravlje i sigurnost radnika uz smanjenje troškova zdravstvene zaštite [1] [2]. Trenutno se organizacije kreću ka modifikovanju svojih koncepcija brige o zaposlenima iz posledične u preventivnu zdravstvenu zaštitu. U prilog tome su u svoju filozofiju zdravstvene zaštite uveli „nosive tehnologije“. Komercijalna nosiva tehnologija je poslednjih godina dobila zasluženi fokus u pogledu praćenje podataka o svakodnevnom životu i fizičkom blagostanju za ličnu upotrebu. To predstavlja bitan iskorak ka razvoju kompleksnijih nosivih tehnologija koje bi potpomogle i unapredile funkcionisanje pojedinca i organizacije u svojim radnim okruženjima i/ili bezbednosno kritičnim poslovima.

Da bi smo razumeli značaj ovakve tehnologije koja može unaprediti život čoveka potrebno je da se otkrije kakav tip bežičnih nosivih senzorskih mreža se mogu koristiti u određenim sredinama i situacijama i na koji način one mogu biti integrisane u svakodnevnoj

rutini čoveka. Takođe je potrebno razmotriti i način na koji se određeni senzori i uređaji mogu primenjivati kako bi smanjili nelagodu zbog korišćenja ili nošenja istih. Ovo je naročito važno kada se ima u vidu da su vojnici opremljeni raznovrsnom opremom koju moraju da nose na sebi i koja ih ograničava u njihovom kretanju i manipulisanju oruđem, stoga je veoma bitno da im dodatna oprema u vidu nosive tehnologije ne otežava normalno funkcionisanje. Ne postoji jasna definicija termina „nosive tehnologije, ali se one identifikuju kao „elektronske tehnologije koji su ugrađeni u odeću i pribor koji se može udobno nositi na telu“. Ovi nošeni uređaji mogu obavljati mnoge zadatke poput mobilnih telefona i prenosnih računara; međutim, u nekim slučajevima, nosiva tehnologija može nadmašiti ove ručne uređaje. Nosiva tehnologija ima tendenciju da bude sofisticiranija od ručne tehnologije dostupne na tržištu danas, jer imaju mogućnosti da svojim sensorima detektuju, skeniraju ili mere fizičke pojave u svojoj blizini, kao što su biološke pojave ili praćenje fizioloških funkcija.

Nosivi senzorski uređaji su pametni elektronski uređaji koji u zavisnosti od funkcija koje obavljaju, mogu biti dostupni u različitim oblicima. Koriste se u blizini ili na ljudskom telu da bi svojim sensorima detektovali i analizirali fiziološke i psihološke promene kao što su osećaji, pokreti, otkucaja srca i krvnog pritiska, hemijski procesi u telu ili pak detektovale pojave i stvari u neposrednoj blizini ljudskog tela kao što štetna hemijska isparenja, eksploziv, bliski predmeti i sl. Sami uređaji mogu biti samostalni i registrovane podatke pohranjivati u internoj memoriji ili pak da putem bežične radio komunikacije podatke prosleđuje na druge uređaje.

### **1.3 Nosive tehnologije u vojnoj primeni**

Složenost bojišta, koja se ogleda u potpunoj raznovrsnosti svih njegovih elemenata implicira komandovanju uvek i u svakom trenutku potpunu svest i poznavanje situaciji na njemu. Mrežno -centrično ratovanje kao svoju paradigmu podrazumeva upotrebu raznovrsnih senzorskih mreža, kojima se slika bojišta u potpunosti vizuelizuje snagama za komandovanje pružajući rano upozorenje i praćenje nepredviđenih događaja [3] [4]. Integracijom bežičnih nosivih telesnih senzorskih sistema uz već postojeće lične komunikacijske uređaje, svaki pojedinac u timu može postati efikasniji. Vojna upotreba bežičnih senzorskih mreža pokazala je da može znatno unaprediti vojnike sposobnosti i ubrzati odluke u kritičnim situacijama. Koncept „povezanog vojnika“, komandnim strukturama omogućava pristup bitnim i potpunim informacija o stanju operativne jedinice. Na taj način se pruža sigurnost i obezbeđuje uspeh misije, a samom vojniku na bojnopolju u svakom trenutku su na raspolaganju pravovremene i potpune informacije, koje treba da mu potpomognu u donošenju odluke.

U samom radu će biti opisana primena nosivih tehnologija u vojne svrhe zasnovan na osnovnim mogućim konceptima upotrebe vojnika u borbenim i neborbenim operacijama. Takođe, cilj ovog rada je da unapredi budući zdravstveni monitoring u modelu „vojnika za 21. vek“, čija bi uloga bila da spajajući moderne komunikacione tehnologije (bežične senzorske mreže, internet stvari i telekomunikacije) sa tradicionalnim zahtevima, obezbedi bolje praćenje i zaštitu života vojnika na terenu. Sam rad predstavlja dublje razumevanje moguće primene bežične nosive telesne senzorske mreže (skr. BNTSM) i specifične karakteristike i zahteve koji se postavljaju pred istraživače kada se ima u vidu izrada projekta, pri čemu se mora uzimati sveobuhvatna analiza mogućih scenarija primene, kontekst njihove upotrebe i specifični zahtevi u vezi sa tim. Rad je zamišljen i da postavi standarde koji će daljim istraživačima poslužiti i kao razumevanje ograničenja koja ova tehnologija nosi u vojnim primenama. Mogući izazovi i pitanja koja će se u radu izneti treba da se razmatraju iz različitih perspektiva, kako bi poslužili kao budući pravci istraživanja i razvoja, te inspiracija za nova inovativna rešenja.

#### **1.4 Nadzor nad kritičnim životnim funkcijama u kritičnim situacijama**

Primena nadzora u psihofizičkom statusu čoveka podrazumeva pre svega identifikovanje rizika, a koji je potrebno sprovesti na početku procene proces implementacije tehnologije za monitoring, sa ciljem jasnog definisanja pretnje koje se odnose na okolinu od interesa i na cilj aplikacija. Pravilno identifikovanje opasnosti može imati značajan uticaj na kvalitet i ukupnu procenu bezbednosti. Pored toga da se rizik posmatra kao negativan uticaj na životne funkcije čoveka, on se može posmatrati i kao faktor koji značajno degradira sposobnost čoveka da obavlja dodeljeni zadatak ili pak izazvati štetne posledice po zdravlje u celini. Prilikom rada u rudniku potencijalne opasnosti mogu dovesti do brze degradacije zdravlja i samih uslova životne sredine u veoma kratkom vremenskom periodu.

Ukoliko se procenom ne identifikuju rizici, to može dovesti fatalnih posledica po zdravlje i život lica.

#### **1.5 Neprekidnost komunikacije unutar bežične senzorske mreže**

Unutar BNTSM se bežična komunikacija između senzora i senzorskog čvora odvija duž i kroz ljudsko telo, zbog čega na kvalitet BNTSM direktno utiče pokretljivost i držanje tela. Pored toga, zbog prirode emitovanja elektromagnetnih talasa bežičnog radiouređaja i ograničenog radio spektra, bežični elementi BNTSM mogu privremeno ili trajno biti izloženi značajnoj količini smetnje, čime se smanjuju performanse komunikacije celog sistema. Takođe, opasna okruženja u kojima se kreću lica koja nose BNTSM mogu da budu izloženi prisustvu

fizičkih i hemijskih opasnosti (npr. toplota, dim, zapaljivi gasovi, pokretni objekti i radio šum). Naposljetku i samo okruženje se menja usled promene konfiguracije terena ili pak nailaska na fizičke prepreke, što dovodi do degradacije prijemnog signala, jer on biva izložen višestrukim radio signalima na mestu prijema i efektima fedinga. Rezultat toga je smanjena ekikasnost komunikacija na bežičnu senzorsku mrežu [5].

### **1.6 Pouzdan prenos podataka u bežičnoj senzorskoj mreži**

Senzorski čvorovi BNTSM imaju zadatak da prikupljene podatke o registrovanoj promeni fiziološkog procesa ili pak očitavanja vezanih za životnu sredinu prenesu do komandnog centra za dalju analizu. Komunikacija u hijerarhskoj strukturi bežičnih senzorskih mreža uslovljena fizičkim ograničenjem samih pojedinačnih senzorskih čvorova njihovim striktnim opsegom prenosa i ograničenom snagom, se obavlja višestrukim putanjama i višestrukim skokovima kako bi se obezbedio pouzdan prenos prikupljenih informacija. Upotreba bežičnih nosivih telesnih senzorskih mreža je predviđena u teškim i neprijateljskim uslovima okruženja, zbog čega može doći otkaza jednog ili više senzorskih čvorova što značajno utiče na topologiju mreže i pravilno funkcionisanje protokola za prenos. Zato se u cilju obezbeđenja pouzdanog prenošenja prikupljenih informacija u nedostatku sopstvene infrastrukture pojedinačni BNTSM oslanjaju na susedne BNTSM, da kroz višeskakovnu komunikaciju obezbede da paketi podataka stignu do komandnog centra. Nedostatak ovakve komunikacije može biti značajno kašnjenje u prenosu, te da prenos podataka u realnom vremenu ne bude od značaja za dalju analizu.

### **1.7 Izazovi u primeni bežičnih senzorskih mreža i nosivih tehnologija**

Problem monitoringa nad psihofizičkim statusom čoveka je pre svega multidisciplinaran. On podrazumeva niz radnji i postupaka u praćenju i proceni rizika, pri čemu se mora voditi računa da se svaki postupak mora prilagoditi određenom obliku opasnosti koja može ugroziti ljudske živote i efikasnost ciljanog sistema. Monitoring nad psihofizičkim stanjem lica podrazumeva primenu u realnom vremenu i kontinuirano merenje životnih parametara kako bi se blagovremeno uočile bilo kakve promene u zdravstvenom statusu, okruženju, uz mogućnost definisanja pragova detekcije i prepoznavanje opasnosti kada je izvesna da će se dogoditi. Veliki broj različitih senzora u arhitekturi jedne senzorske mreže generišu veliki broj heterogenih tipova podataka, zbog čega je potrebno da dizajn mreže bude krajnje efikasan za prikupljanje i analizu različitih parametara.

Ključni faktor u oceni efikasnosti i pouzdanosti jedne senzorske mreže jeste neprekidna i pouzdana komunikacija koja mora postojati tokom celog procesa monitoringa, jer se time postiže tačnost, pravovremenost i povećava bezbednost [6]. Veliki je broj izazova koji mogu definisati i određivati efikasnost ovakvog jednog sistema i to:

- upotreba konvencionalnih i žičanih komunikacionih sistema unutar opasnog i dinamičnog okruženja svakako bi obezbedila veći stepen pouzdanosti u radu, međutim visoki troškovi instalacije i održavanja, povećavaju ekonomsku isplativost istih. Upotreba fiksnih instalacija čine sistem kompleksnijim za rukovanje i tekuće održavanje, što otežava princip jednostavnosti u radu ovakvih sistema.
- mobilnost lica koje nose nosive tehnologije na sebi utiču na degradaciju radio signala, čime se utiče na efikasnost radio komunikacije, a naročito prilikom kretanja u zatvorenim prostorijama ili između fizičkih prepreka. Tada se mogu javiti problemi kao što su često prekidanje veze, smetnje u među senzorskoj komunikaciji i dugo kašnjenje u prenosu.
- veličina nosive senzorske mreže i broj senzora sa kojima treba da ostvari uvid u fiziološke funkcije korisnika treba pravilno implementirati kako bi se ostvario željeni cilj monitoringa. Način komunikacije unutar lične senzorske mreže i komunikacije sa susednim senzorskim mrežama definiše način višeskokovne i multipath komunikacije u cilju potpunog prenosa podataka do komandnog centra.
- izbor senzora koji će se koristiti u senzorskim čvorovima umnogome su određeni dinamikom pojave koju treba da prate, periodom odabiranja, energetsom efikasnošću, pragom osetljivost i sl. Neadekvatan izbor u pogledu senzora može dovesti do nedostatka pravilnih informacija u realnom vremenu, što uvećava pretnju u procesu monitoringa i upravljanja.
- u skladu sa namenom i ciljem primene senzorske mreže potrebno je definisati granične vrednosti koje treba da detektuju senzori. Takođe je potrebno definisati postupke u slučajevima prekoračenja gornjih graničnih vrednosti kao alarmantni tip stanja na koje je potrebno urgentno reagovati.
- energetska efikasnost je sveobuhvatni problem u aplikacijama zasnovanim na bežičnim senzorskim mrežama. Kada je zahtev da jedna bežična nosiva senzorska obezbedi autonomiju rada od nekoliko nedelja, meseci ili godinu tada je energetska efikasnost



jedan od glavnih ciljeva dizajna. Problemi su naročito izraženi kada govorimo o implantiranim sensorima i tada se mora uzeti u obzir što manje invazivna metoda za napajanje senzora ili mehanizam za prikupljanje energije. Upravo je energetska efikasnost jednog senzorskog čvora, kao najmanje člana jedne mnogo veće mreže, ključan pokazatelj u efikasnosti jedne bežične senzorske mreže uopšte.

Istraživanje u disertaciji će biti sprovedeno kroz analizu i korišćenje statističkih metoda uz upotrebu simulacija i matematičkih modela. Biće sprovedeno matematičko modelovanje telekomunikacionog kanala primenom teorije verovatnoće što će podrazumevati upotrebu metoda transformacije funkcije gustine verovatnoće odgovarajućih slučajnih promenljivih. Dobijeni analitički rezultati će se verifikovati kroz simulacione analize koji će dati potvrdu ispravnosti predložene transformacije. Predloženi dizajn telekomunikacionog sistema će kroz upotrebu statističkih metoda bliže opisati karakteristike signala u kanalu sa fedingom izazvanim različitim propagacionim okruženjima.

Nakon uvoda disertacija je izložena u sedam poglavlja koja su podeljena na odeljke i to tako da je:

U poglavlju 2 je dat pregled dosadašnjeg mesta i uloge koju bežične senzorske mreže imaju u pogledu monitoringa životnih funkcija i kako se menja značaj istih prema upotrebi nosivih tehnologija u različitim delatnostima.

U poglavlju 3 analiziran je funkcionalni model bežične nosive telesne senzorske mreže, dosadašnji razvoj i izazovi koji su se pojavili u primeni. Analizirani su funkcionalni delovi sa naglaskom na telekomunikacionim modulima. Predložen je funkcionalni model bežičnog optičkog prenosa u slobodnom prostoru, koji bi se realizovao kao hibridni model i to kao sinergija radiofrekventnog i optičkog komunikacionog sistema.

U poglavlju 4 analiziran je dosadašnji razvoj i upotreba bežičnih nosivih telesnih senzorskih mreža za vojnu primenu, sa posebnim osvrtom na monitoring životnih funkcija vojnika u kritičnim situacijama na bojištu. Dat je predlog budućeg funkcionalnog modela bežične nosive telesne senzorske mreže za primenu u Vojsci Srbije uz predlog testnog hardvera koji bi za komunikacioni model imao hibridni RF/FSO komunikacioni sistem. Takođe su navedeni i izazovi koji bi takav komunikacioni model imao u pogledu propagacije.

U poglavlju 5 su definisani pojmovi koji se odnose na FSO komunikacione sisteme i na slučajeve kada se oni koriste u bežičnim nosivim telesnim senzorskim mrežama, pregled smetnji koje se mogu javiti prilikom propagacije svetlosnih snopova na telu, sa tela i slobodnom prostoru. U poglavlju su navedeni i osnovni modulacioni modeli FSO komunikacija, koji najbliže mogu opisivati prostiranje svetlosnog snopa u bežičnim nosivim telesnim senzorskim mrežama.

U poglavlju 6 su opisane karakteristike monohromatske slike i digitalnih vodenih žigova, metode i tehnike insertovanja i ekstrakcije vodenog žiga u slici.

U poglavlju 7 dat je pregled dosadašnjih istraživanja i testiranja koja su prethodila, a koja se doveli do konačnog modela FSO kanala za prenos digitalne slike sa insertovanim vodenim žigom. Predstavljani su analitički rezultati i data analiza takvog modela.

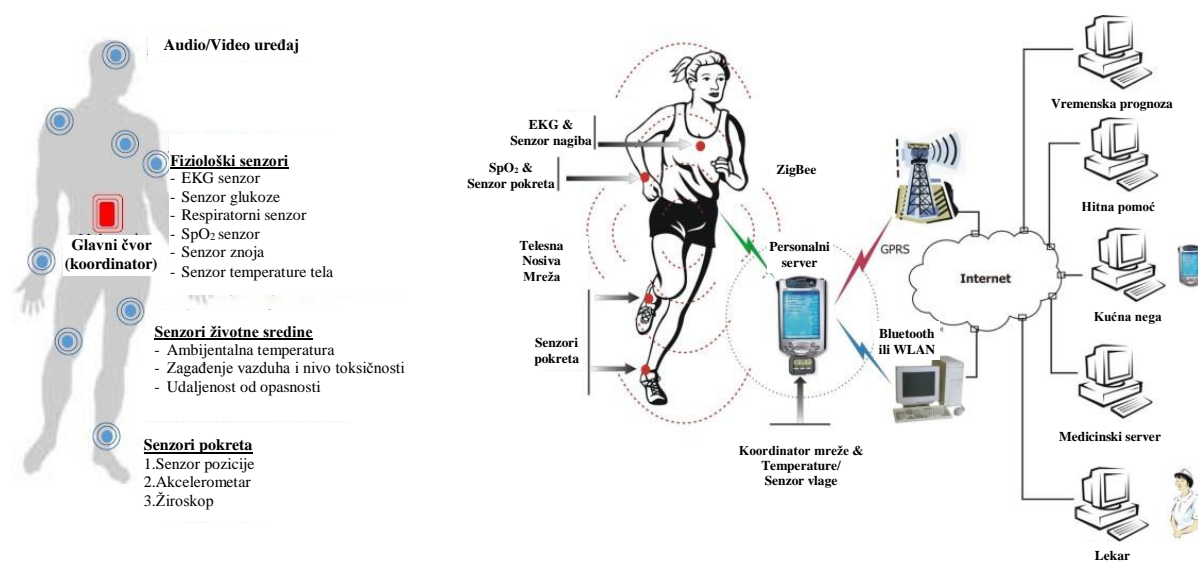
U poglavlju 8 predstavljen je funkcionalni model za prenos slike sa utisnutim vodenim žigom kroz nulti usmereni dvostruki Rajsov kanal, čijom bi implementacijom u bežičnim nosivim telesnim senzorskim mrežama bio dat doprinos u pogledu pouzdanog prenosa i zaštite multimedijalnih sadržaja. Predstavljani su simulacioni rezultati testiranja prenosa kroz nulti usmereni dvostruki Rajsov kanal, prikazani su rezultati prenosa slike sa insertovanim vidljivim digitalnim vodenim žigom i data analiza uticaja fedinga (scintilacije) u komunikacionom kanalu na sliku i ekstrakovani digitalni vodeni žig.

## 2. BEŽIČNE SENZORSKE MREŽE U NOSIVIM TEHNOLOGIJAMA

### 2.1 Doprinos bežičnih senzorskih mreža razvoju nosivih senzorskih mreža

Bežične senzorske mreže (skr. BSM) su tokom proteklih godina ostvarile značajan uticaj kako u komercijalnoj, tako i u vojnoj industriji. Tehnologije bežične senzorske mreže mogu potencijalno promeniti životni stil čoveka sa različitim aplikacijama u oblastima kao što su zdravlje, zabava, putovanja, maloprodaja, industrija i upravljanje hitnim slučajevima, kao i mnogo drugih oblasti. Ubrzani razvoj internet stvari (**IoT**) omogućio je da se BSM dodatno afirmišu u svakodnevnim ljudskim aktivnostima. Tome je bitno i doprineo razvoj komunikacijskih tehnologija (SatCom, LTE, 5G, WiFi, Wi-MAX, LoRa, FSO i sl.), koje su omogućile da BSM budu dostupne i sa udaljenih lokacija, čime su učinili da nijedna tačka na planeti nije nedostupna.

Bežične nosive telesne senzorske mreže (BNTSM) kao jedna od grana razvoja bežičnih senzorskih mreža su se naročito pokazale u oblastima integracija senzorskih i potrošačkih elektronskih tehnologija koja bi omogućila praćenje ljudi tokom svih njihovih svakodnevnih aktivnosti (*slika br. 1*). Kao jedna od humanih grana razvoja bežičnih nosivih telesnih senzorskih mreža je bila senzorska mreža za praćenje svakodnevnog fiziološkog stanja ljudi. Odmah su se izdvojila dva konkretna polja primene: medicinsko praćenje pacijenata i praćenje fiziološkog stanja ljudi u rizičnim sredinama (vojnika, vatrogasaca, spasilaca, radnika u nuklearkama i sl.)



Slika br. 1 Nosiva mreža senzora tela

Svako polje primene ima svoje specifičnosti, ali se upotreba BNTSM kod lica koja su podvrgnuta velikim naporima i pri tome se nalaze u sredinama opasnim po život dodatno

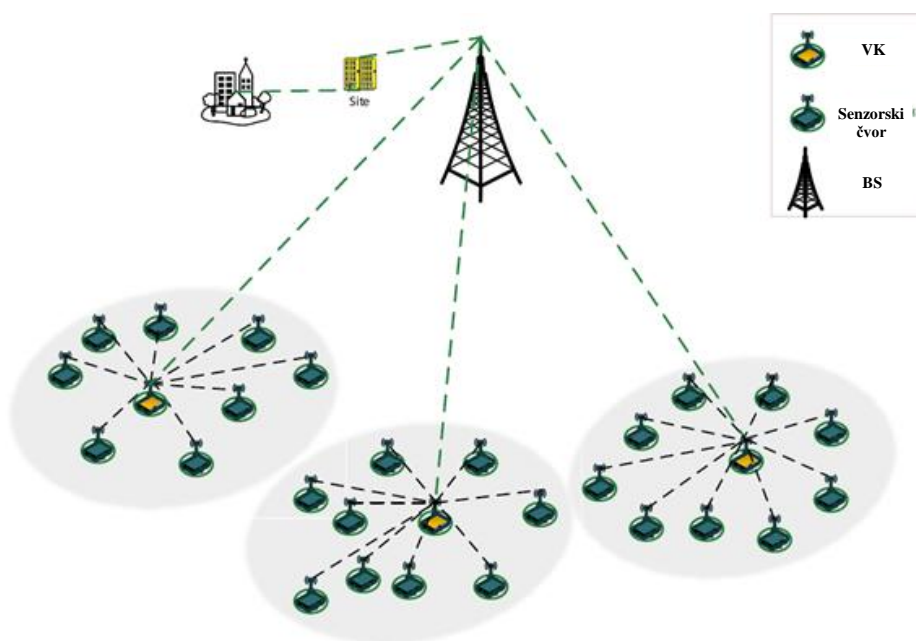
izdvajaju kao kompleksna polja primene BNTSM zbog specifičnih uslova u kojima su razmešteni i neophodnosti da zadrže potreban nivo pouzdanosti i robusnosti. Bežične nosive telesne senzorske mreže predstavljaju jednu podvarijantu bežičnih senzorskih mreža. Kao što se može videti u tabeli br.1 sličnosti i razlike u načinu rada i polja primene. Napredak tehnologije na polju pametnih senzora učinili su da se oni sada mogu primenjivati u mnogo većem broju, sa manjom cenom koštanja i dimenzijama koje ih čine manje primetnim i neugodnim za nošenje. Od njih se zahteva da pružaju veliku validnost osetljivih podataka o pojavama koje detektuje i mere, uz kontinuitet energetske efikasnosti kako bi obezbedili da se započeta misija može sprovesti u što dužem vremenskom periodu.

Funkcija	Bežična senzorska mreža	Bežična nosiva senzorska mreža
Razmera	Nadgledani prostor velikih razmera	Nadgledani prostor je ograničen na ljudsko telo
Broj čvorova	Veliki broj čvorova za pokrivanje velikog prostora	Nekoliko, na ograničenom prostoru
Tačnost u merenju	Veliki broj senzorskih čvorova pruža tačnost	Mali broj čvorova, neophodno da budu izdržljive i velike preciznosti
Zadaci čvorova	Senzorski čvorovi su homogeni i izvode dodeljene zadatke (vibroakustični, senzori pokreta, ...)	Senzorski čvorovi su heterogeni i sprovode različite zadatke
Veličina čvora	Poželjno je da bude mali	Ključno je da bude mali
Topologija mreže	Fiksna ili statična. Hijerarhijska.	Promenljiva zbog kretanja tela. Telocentrična.
Brzina prenosa podataka	Najčešće homogena	Najčešće heterogena.
Zamenljivost čvora	Ne tako laka pristupačnost, ne omogućava laku zamenu	Relativno laka pristupačnost čvorovima na telu omogućava zamenu, dok je sa implantiranim to teže.
Životni vek čvorova	Od nekoliko meseci do godina	Od nekoliko meseci do godina
Napajanje energijom	Relativno lako i često se može zameniti	U slučajevima implantiranih senzora zamena je teža
Posledica gubitka podataka	Mogućnost kompenzovanja redundantnim čvorovima – slaba	Velike – potrebna ponovljena merenja, kašnjenje u realnom prenosu
Ljudska intervencija	Nije moguća	Moguća
Kanal prenosa	Vazduh, voda, na i u zemlji	Vazduh, na i kroz ljudsko telo

Tabela br. 1 Poređenje bežičnih senzorskih mreža i bežičnih nosivih mreža

Uobičajena upotreba BSM podrazumeva upotrebu velikog broja manjih senzorskih čvorova koje mogu da prikupljaju informacije iz svoje okoline. Svaki senzorski čvor je

opremljen malim procesorom koji pokreće određen operativni sistem koji upravlja memorijom, bežičnom komunikacijom, potrošnjom energije i sensorima. Oni se postavljaju na „mestima od interesa“ kako bi bili što bliži pojavama koje detektuju. Postavljeni senzorski čvorovi povezuju se jedan s drugim i prenose osetljive informacije na baznu stanicu, koja se obično naziva senzorsko čvorište [7] (*eng. Sink Node*), putem bežičnih veza (slika br. 2). Senzorsko čvorište prikuplja podatke sa svih senzorskih čvorova i obrađuje ih tako da generiše informacije o aktivnosti u senzorskom polju. Senzorsko čvorište takođe može poslužiti kao prolaz ka višim hijerarhijama mreže, npr. ka vođama klastera (*eng. Cluster Node*), drugim mrežama ili pristupnoj tački neke od širokopojsnih mreža (LTA, 5G ili Internet) [8] [9].



Slika br. 2 Model bežične senzorske mreže

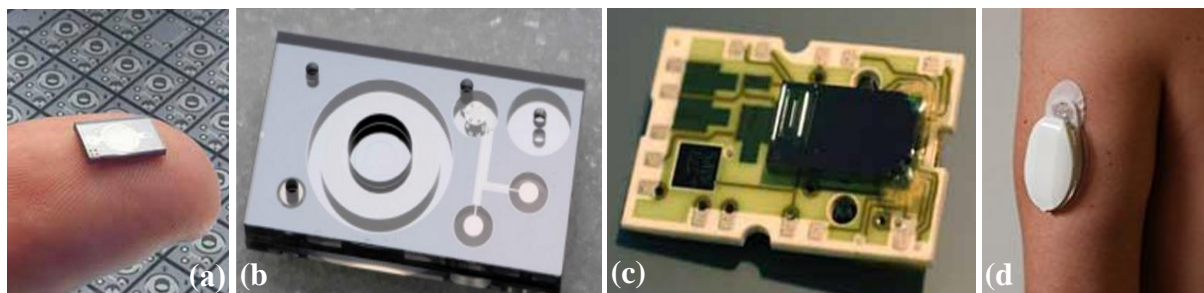
Dostignuća koja su ove BSM postigle na tehnološkom planu je samoorganizovanost, tolerantnost na greške, visoka preciznost, visoka osetljivost i energetska efikasnost [10].

## 2.2 Upotreba BSM i nosivih tehnologija u zdravstvenom monitoringu

U cilju unapređenja kvaliteta ljudskog života i zdravlja, a naročito na polju medicine, istraživači i naučnici su napravili znatan iskorak po pitanju sinergije bežičnih senzorskih mreža i nosivih telesnih uređaja. Prepoznajući u tome bitan ekonomski element, učešće su uzele mnoge vlade i zdravstvene institucije, čime su znatno unapređene zdravstvene usluge i nega, a ostvarene znatne uštede po pitanju zdravstvene zaštite. Upravo su nosive telesne mreže bile sredstvo kojim se mogao postići cilj pružanja efikasne zdravstvene nege. Istraživanja su pokazala da su se pacijenti veoma uspešno oporavljali u kućnim uslovima nakon

postoperativnih zahvata, daleko od mogućih zaraza, kao npr. *sepsa* – patogenih mikroorganizama koji se često mogu naći u bolničkim uslovima. Nedostatak ovakvog načina lečenja je bila udaljenost lekara od pacijenta i nemogućnost praćenja stanja pacijenta u realnom vremenu. Nadgledani sistem senzorske mreže na telu pacijenta može pomoći lekarima da u realnom vremenu prate njegovo zdravstveno stanje i tok oporavka. Daljim razvojem i unapređenjem sistema može se unaprediti kontrola medicinskih uređaja, pristup pohranjenim medicinskim podacima i eventualno hitna komunikacija sa pacijentom [11] [12]. Neprekidno nadgledanje nosivih telesnih mreža senzora može povećati rano otkrivanje hitnih stanja i bolesti kod rizičnih pacijenata, a takođe da pruži širok spektar zdravstvenih usluga osobama različitih stepena kognitivnih i fizičkih oštećenja. Probleme u razvoju i istraživanju spoja BSM i nosivih tehnologija mogu se prevazići interdisciplinarnim pristupom kroz informacione tehnologije, inženjerstvo i medicinu. Kada se tome doda mogućnost integracije sa širokopojasnom mrežom u cilju prenosa podataka i praćenja, onda možemo govoriti o nadgledanoj zdravstvenoj zaštiti ili *telemedicini*.

Veliku ulogu u razvoju nosivih tehnologija je upravo odigrala minijaturizacija senzorskih čvorova, njihova multifunkcionalnost, energetska održivost i smanjeni troškovi izrade. Istraživanja na polju spajanja različitih vrsta materijala je doprinela da se senzori mogu integrisati unutar tkanina ili nekog drugog odevnog materijala u samom procesu proizvodnje. Jedan od radikalnijih pristupa je implantiranje bežičnih senzorskih uređaja u telo, čime se omogućava pristup biohemijским procesima u telu, a samim tim preciznije merenje senzora. To je naročito bitno kada se nadziru pacijenti kojima u zavisnosti od stanja odmah treba primeniti i terapiju, kao npr. kod dijabetičara kojima u zavisnosti od stanja treba da se dozira nivo insulina. U takvim slučajevima, tehnologije poput MEMS (*eng. micro-electro-mechanical-systems*) u spoju sa nosivim senzorskim telesnim uređajima mogu upravljati insulinskim pumpama (*slika br.3*). Ovaj mehanizam povezan je sa posudom za jednokratnu upotrebu sa dovoljno kapaciteta za nekoliko dana terapije i elektronskim sklopom koji sadrži sve elemente potrebne za pogon i kontrolu profila ubrizgavanja, sa svim potrebnim informacijama i alarmnim sredstvima. Ovaj sklop je potpuno zapečaćen, vodootporan, minijaturni uređaj u optimalnom fiziološkom obliku, koji se može postaviti direktno na pacijentovu kožu. Lek se ubrizgava u intradermalni prostor preko fleksibilne kanile direktno povezane na pumpu. Ulogu senzorskog čvorišta igra upravljačka jedinica koja u isto vreme prati nivo šećera putem bežičnog senzora i upravlja radom insulinske pumpe.



Slika br. 3 Minijaturna insulinska pumpa NanoPUMP. MEMS pumpa  $10 \times 6 \text{ mm}^2$  (a) (b), mehanizam MEMS pumpe postavljen na keramičkom supstratu (c), izgled insulinske pumpe aplikovan na ruci pacijenta (d) [13].

Ovaj primer samo slikovito prikazuje koliki značaj imaju bežične senzorske mreže i njihov spoj sa nosivim uređajima, kao i pravac u kome se kreće istraživanja ovih tehnologija, kao i njihovu primenu. Doprinos razvoju i istraživanju svakako će dati unapređenja pojedinačnih tehnologija MEMS, bežične komunikacije, razvoj elektronike i biomehaničkih i hemijskih senzora. Ovi razvojni koraci uticaće na razvoj jeftinih, multifunkcionalnih senzorskih čvorova male veličine i koji mogu komunicirati na kratkim udaljenostima i minijaturnih senzorskih čvorova, koji će očitavati, obrađivati podatke i komunicirati sa drugim čvorovima.

### 2.3 Upotreba bežičnih senzorskih mreža i nosivih tehnologija u vojsci

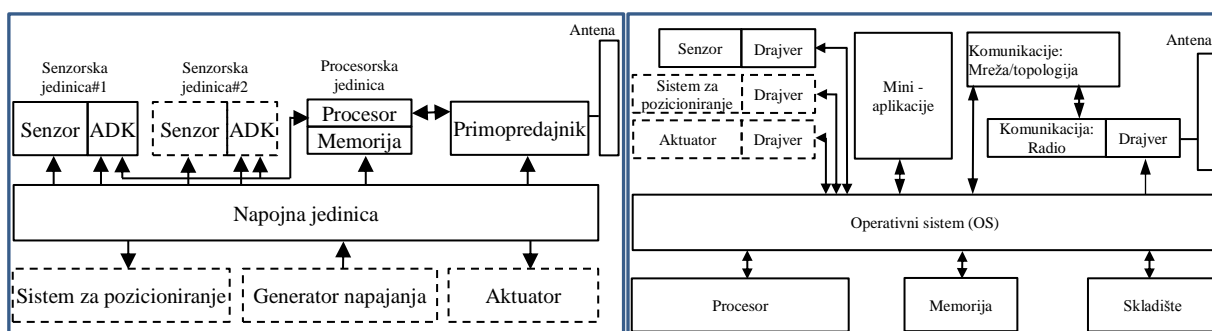
Karakteristika upotrebe borbenih jedinica u XXI veku i sama odlika asimetričnog ratovanja je da upotreba nesrazmerne i neograničene sile nije moguće, a u urbanim sredinama nije ni prihvatljiva. Na primeru angažovanja koalicionih i ruskih snaga na ratištima u Iraku, Avganistanu i Siriji, moglo se uočiti da su uslovi u borbi zahtevali čišćenje neprijateljskih urbanih područja od bloka do bloka. Sam kontekst angažovanja je bio blizak tzv. „Trostrukom blokovskom ratu“, gde su angažovane borbene snage u jednom trenutku, hranile i oblačile izbeglice - pružali humanitarnu pomoć, da bi u narednom trenutku, razdvajali zaraćene strane - sprovodeći mirovnu operaciju, a konačno se borili u oružanoj borbi malog ili srednjeg intenziteta. Sve to u istom danu, unutar jednog grada, unutar tri gradska bloka [14].

Složenost i veličina bojišta, kao i mešovitosť ruralnih i urbanih sredina unutar samih bojišta, implicira potpuno svest i poznavanje situaciji na istom. Kada na sve navedeno dodamo i činjenicu da treba predvideti protivnikove postupke, cilj sopstvenih snaga je da bolje razumeju operativno okruženje, kako bi se angažovane borbene snage manje izložile riziku i opasnosti. U takvim misijama, mrežnocentrično ratovanje koje je potpomognuto robusnim senzorskim umrežavanjem predstavlja jedno od najvažnijih koraka kojim se smanjuje nesigurnost u borbenim i neborbenim situacijama, pružajući rano upozorenje i praćenje nepredviđenih

događaja, kao na primer upad u oblasti koje se smatraju šticećenim i vitalnim za društvo i državu, ili pak nadzor nad već očišćenim terenima od neprijateljskih snaga, čime se uskraćuje prednost iznenađenja i obezbeđuje pravovremenost reagovanja [3].

Sagledavajući kompleksnost zadatka i načina upotrebe svojih operativnih snaga u ispunjenju zadanog cilja trebaju se razmotriti problemi koji će se prevazići odgovarajućom upotrebom bežičnih senzorskih mreža. Svakako njihova upotreba doprinosi boljem razumevanju slike bojišta, mestu i ulozi sopstvenih snaga što ima za cilj olakšavanja funkcije rukovođenja i komandovanja. Naposljetku tako dobijene informacije se procesiraju i distribuiraju drugim učesnicima. Ako bi smo mogli da grupišemo vojnu primenu bežičnih senzorskih mreža onda bi smo svakako mogli da izdvojimo tri dominantna polja upotrebe i to: prikupljanje podatka sa bojišta; bezbednosna zaštita vojnih infrastruktura i podrška življenju u njima; i logistika. Prikupljanjem podataka sa različitih vojnih platformi, kao što su avioni, sistemi oružja, borbenih vozila ili samih vojnika - vojna organizacija može povećati efikasnost svojih sistema inteligencije, nadzora i izviđanja. Ovako prikupljene informacije će omogućiti oružanim snagama da brže i preciznije identifikuju ključne pretnje. Da bi jedan takav sistem zadovoljio osnovne bezbednosne uslove, potrebno je da zapovednici u komandnom centru mogu blagovremeno i adekvatno da reaguju na događaje, stanje neprijateljskih i sopstvenih jedinica.

Bežična senzorska mreža sastoji se od velikog broja malih i jeftinih senzorskih čvorova sa minimalnom računarskom snagom i potrošnjom energije. Na slici br. 4 prikazana je generalna arhitektura senzorskog čvora BSM. Integracijom senzorskih sistema, komunikacijskih uređaja, aktuatora i sistema kontrole u postojeću vojnu infrastrukturu, vojska može postati efikasnija. Bežične senzorske mreže su potencijalno rešenje ovog problema.



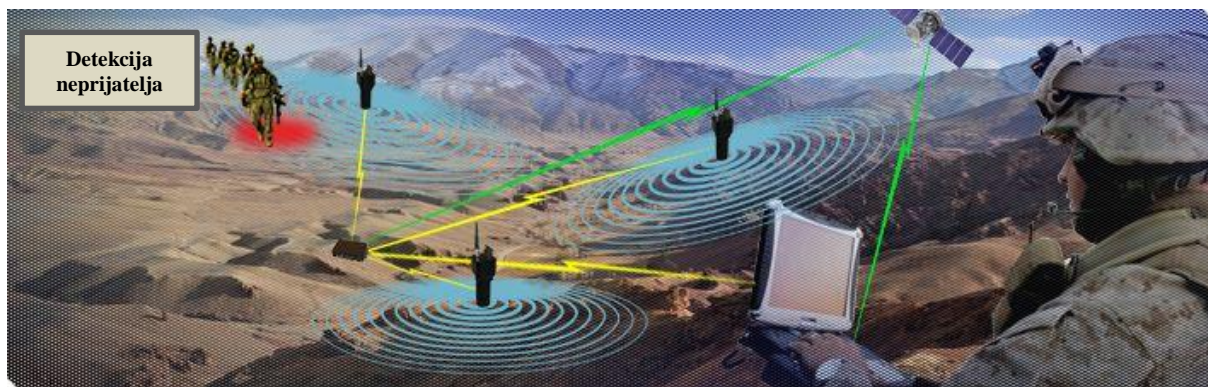
Slika br. 4 Hardverske i softverske komponente senzorskog čvora BSM

Bežičnim senzorskim mrežama moguće je vršiti detekciju i estimaciju različitih parametara okoline [15]. Vojna aplikacija bežičnih senzorskih mreža pokazala se od značajnog uticaja na vojnike na bojištu, a naročito kroz koncept „povezanog vojnika“, čime se zapovedniku



omogućava pristup bitnim informacijama i operativnoj slici bojišta kroz senzorsku mrežu razmeštenu u operativnom zahvatu jedinice. Vojna primena BSM bitno je definisana mogućnostima senzora kao osnovnim elementom mreže. Sensori mogu detektovati i eventualno meriti hemijske, biološke i eksplozivne pare, kao i postojanje ljudi ili objekata. Mogućnosti senzora predstavljaju jednu od ključnih odrednica načina i vrste vojne primene BSM. U slučaju bojišta i urbanog ratovanja upotreba BSM može smanjiti sumnju u pogledu toga gde će se neprijateljske snage rasporediti ili kakva će biti njihova uloga (slika br.5) [16].

Primena u vojne svrhe predstavlja samo jednu od moguće raznovrsne primene BSM i po mnogo čemu specifične implementacije, koja podrazumeva robusne eksploatacione uslove. Većina vojnih aplikacije BSM su usmerena na upravljanje, otkrivanje, prepoznavanje i praćenje susednih protivničkih ciljeva u vojnom okruženju. To je važno prilikom dodeljivanja zadataka jedinicama, distribuciji logističkih informacija, obaveštajnih podataka i navođenja sopstvenih snaga. U temeljima svake vojne primene leži komunikacija između učesnika, a vojna komunikacija, podrazumeva da mora biti zaštićena na određenoj lokaciji i u određenom vremenu [17].



Slika br. 5 Mesto i uloga BSM u praćenju stanja na bojištu

## 2.4 Budući pravci razvoja i sinergije bežičnih i nosivih senzorskih mreža

Kada razmatramo raspored BSM onda on može biti planski i precizan ili nasumičan (ad hoc) i manje precizan. Kada govorimo o nosivim tehnologijama, onda se tada podrazumeva da se senzori postavljaju planski i na mestima koji su od interesa za praćenje. Kombinacija bežičnih senzora i senzorskih mreža sa istraživanjem računara i veštačke inteligencije izgradila je interdisciplinarni koncept ambijentalne inteligencije kako bi se prevazišli izazovi sa kojima se susrećemo u svakodnevnom životu [18].

Prvobitni koraci na polju praćenja fiziološkog stanja ljudi podrazumevali su veliki broj senzora ili senzorskih čvorova povezanim žičnom vezom sa centralnom procesorskom jedinicom, koja bi te podatke prikupljala i obrađivala. Pouzdanost u razmeni podataka

senzora/senzorskog čvora sa centralnom jedinicom/senzorskim čvorištem je obezbeđivala visok stepen pouzdanosti u komunikaciji. Međutim, ovakav način razmene podataka je uzrokovao nelagodu u nošenju istih, a često je bio uzrok neuspelih očitavanja usled kidanja i istrošenosti žičnih veza usled pokreta udova i samog tela. Povezanost sa kablovima koji se koriste u većini trenutnih uređaja za monitoring predstavlja očite nedostatke, jer ograničavaju pokretljivost lica, mogu da izazovu iritaciju kože ili infekcije, u kritičnim situacijama mogu predstavljati opasnost po život i zdravlje. Bežične senzorske mreže predstavljaju značajno poboljšanje u poređenju s konvencionalnim sensorima [19]. Činjenica je da bežična veza nije uslov za praćenje fizioloških parametara kako sa nosivim tako i sa implantiranim sensorima, međutim imajući u vidu ograničavajuće okolnosti kablovskih senzorskih sistema, onda se kao imperativ u korišćenju nosivih telesnih senzorskih sistema, a naročito implantiranih senzora nameće korišćenje bežične tehnologije u savremenim nosivim telesnim senzorskim mrežama [20].

Primena BSM i nosivih tehnologija u vojne svrhe predstavlja samo jednu od mogućih primena i po mnogo čemu specifične implementacije, koja podrazumeva robusne eksploatacione uslove. Životni uslovi u kojima rade i žive vojnici se više nego štetni po njihovo zdravlje. Stres, veliko fizičko naprezanje, izloženost raznim hemijskim i biološkim supstancama, jonizujućem i nejonizujućem zračenju utiču na fiziološko stanje organizma vojnika. Ako se uzme u obzir da u takvim uslovima moraju da odlučuju ne samo o svojim životima, već i životima ljudi koje štite i brane, onda se značaj praćenja njihovih fizioloških funkcija još više uvećava. Većina vojnih aplikacije BSM/nosivih tehnologija zahtevaju izuzetnu samoorganizovanost, robustnost, tolerantnost na greške, visoku preciznost, visoku osetljivost i energetska efikasnost [10].

Sa društvenog aspekta veliki je značaj primene nosivih senzorskih mreža imajući u vidu da je cilj unapređenja kvaliteta ljudskog života i zdravlja uopšte, a naročito vojnika u sredinama štetnim po zdravlje. Značaj rada je veliki i na polju nauke, jer podstiče istraživače i naučnike da prave hrabre korake po pitanju sinergije bežičnih senzorskih mreža i nosivih telesnih uređaja. Može se reći da je potpuno jasno da nadgledani sistem senzorske mreže na telu vojnika može pomoći vojnim lekarima i komandnom osoblju da u realnom vremenu prate njegovo zdravstveno i fiziološko stanje ljudstva [3] [4]. Neprekidno nadgledanje nosivih telesnih senzorskih mreža može povećati rano otkrivanje hitnih stanja i bolesti kod vojnika, a takođe će moći da pruži uvid u stepen kognitivnih i fizičkih oštećenja.

U Vojsci Srbije, kao i puno drugih vojski u svetu, ne postoji fiziološki monitoring vojnika tokom stresnih i fizički vrlo zahtevnih aktivnosti u realnom vremenu tokom obuke ili izvršavanja borbeni i neborbenih operacija. To u mnogo čemu otežava sagledavanje

Uticaj fedinga na komunikaciju senzorskih čvorova u bežičnim nosivim telesnim senzorskim mrežama za vojnu primenu

---

psihofizičke sposobnosti vojnika, dovodi do njegovog neadekvatnog izlaganju naporu i opasnostima koje mogu biti fatalne po život. Nepotpunom slikom o svakom psihofizičkom stanju pojedinca, umanjuje efikasnost jedinice u celini i izlaže riziku ostale članove.

### 3. ANALIZA FUNKCIONALNOG MODELA BNTSM

#### 3.1 Analiza modela BNTSM za nadzor fizioloških procesa u organizmu

Tokom redovnih mirnodopskih i pogotovo tokom borbenih aktivnosti, vojnici trpe umor koji je rezultat dugog radnog vremena, otežanog okruženja, fizičkog naprezanja i velike težine tereta koji nosi, što vodi do iscrpljenosti organizma [21]. Vitalni znakovi vojnika mogu se pratiti slično kao i pacijenti u zdravstvu, sa ciljem praćenja njihove fizičke i zdravstvene spremnosti.

Upotrebom bežičnih tehnologija teži se postavci određenih standarda u njihovoj primeni, bez obzira na tip i vrstu tehnologija sa kojima se spajaju. Standardizacija omogućava interoperabilnost između istih ili sličnih tehnologija, a koja za posledicu ima široku upotrebu proizvoda, jer bi inače proizvođači uređaja zavisili od pojedinačnih fiksnih specifikacija pri razvoju svojih proizvoda [22]. Treba napomenuti da su veliki izazovi u razvoju BNTSM povezani su sa pouzdanošću mehanizama pristupa kanalu, što naročito treba imati u vidu sa povećanjem broja bežičnih senzora u mreži. Poređenje između tehnologija koje podržava BNTSM predstavljeno je u Tabeli br.2.

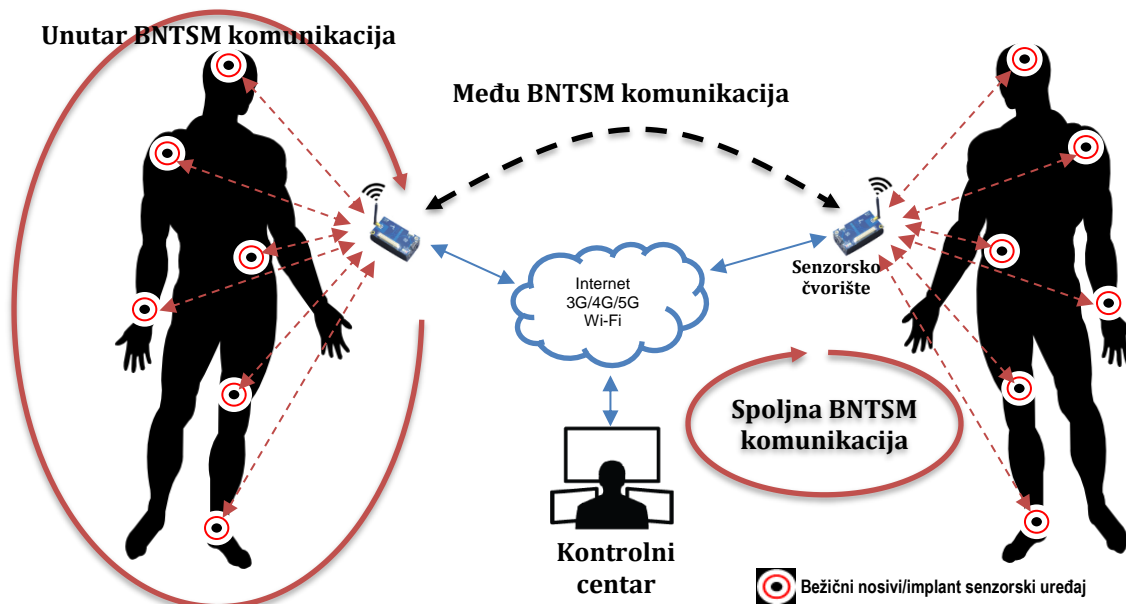
BNTSM polje	Tip primene	Primeri aplikacije
Zdravstvena zaštita	Medicina-nosive	Elektrokardiogram(ECG), Elektroencefalogram(EEG), Elektromiografija (EMG), Pulsni oksimetar (SPO <sub>2</sub> ), temperatura, krvni pritisak, doziranje leka
	Medicina-implanti	Kontrola dijabetesa
	Nemedicinska	Detekcija pokreta Bezbedna autentifikacija
Vojska i odbrana	Medicina-nosive	Procena zamora vojnika, otkrivanje opasne situacije po život
	Nemedicinske nosive	Otkrivanje opasnog gasa, detekcija požara
Sport	Medicina-nosive	Puls , temperatura, krvni pritisak, senzor pokreta
Zabava	Nemedicinska nosive	Prenos u realnom vremenu: prenos videa putem kamere, audio prenos mikrofona
		Potrošačka elektronika: Mobilni telefon, kamera
		Igra, virtualna stvarnost, ambijent, inteligencija, praćenje ličnih predmeta i društveno umrežavanje

Tabela br. 2 Polja rada i primene BNTSM [23]

Osnovni zadatak senzora je da detektuju fizičke promene u svom okruženju i da izvrše analogno-digitalnu konverziju izmerenih vrednosti. Kvalitet detekcije zavisi od toga koliko je napredna tehnologija koja treba da detektuje promenu, mikro-elektromehanički sistemi i nano tehnologije izrade samog senzora [24]. Senzori reaguju na fizički događaj (stimulans), kao npr. visoka temperatura, zasićenost krvi kiseonikom, srčani ritam i sl. Zatim prikuplja podatke o događaju, obrađuje ih i bežično prenosi do senzorskog čvora.

### 3.2 Način komunikacije u BNTSM

Tipična hijerarhijska struktura BNTSM obuhvata više osnovnih elementarnih čvorova koji su raspoređeni na ili u ljudskom telu ili su pak noseći uređaji. Senzorsko čvorište (Sink Node) ima ulogu koordinatora koji je odgovoran za kontrolu mreže i prikupljanje svih senzorskih podataka sa osnovnih senzora ili senzorskih čvorova. Prikupljeni podaci se zatim preusmeravaju na sledeći hijerarhijski nivo (Base Station ili neki vid koordinacionog centra) ili na konačno odredište (tj. kontrolni centar senzorske mreže) putem komunikacijskih pristupnih tačaka na brz i pouzdan način. Ugrađeni senzori kontinuirano prikupljaju velike količine podataka koje moraju biti pravilno obrađene kako bi se dobile potrebne informacije o fiziološkim promenama ili pak fizičkim promenama u okruženju. Obrada podataka je hijerarhijska da bi se iskoristila asimetrija resursa, očuvala efikasnost sistema i osigurala dostupnost podataka po potrebi. Posmatrajući cilj i namenu BNTSM, arhitektonski možemo izdvojiti tri vrste komunikacije: unutar BNTSM, među BNTSM i spoljna BNTSM komunikacija (*slika br.6*). **Unutar - BNTSM komunikacija** se odnosi na komunikaciju između različitih senzora pričvršćenih ili implantiranih na ljudsko telo, odnosno komunikaciju između telesnih senzora i senzorskog čvora.



Slika br. 6 Komunikaciona arhitektura BNTSM

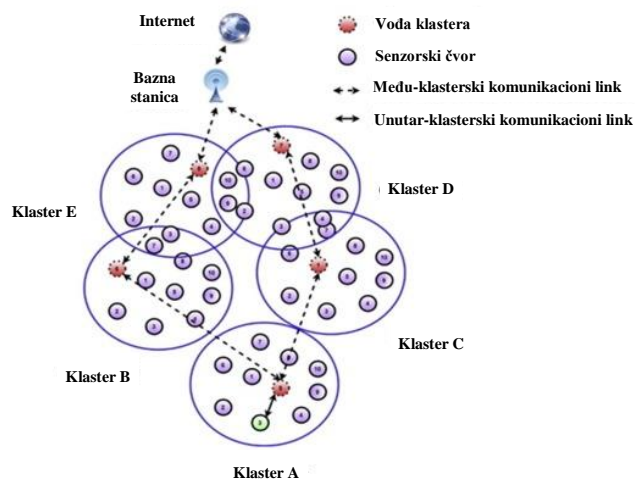
Takođe, ako je na ili u telu raspoređeno više kompleksnih bežičnih senzorskih uređaja, onda sa njima komunicira senzorski čvor, koji zatim komunicira sa senzorskim čvorištem. Čvor ili čvorište je takođe postavljen na ljudsko telo da bi se lokalno obrađivali prikupljeni podaci i vršilo upravljanje osnovnim senzorskim uređajima. Topologija mreže je najčešće zvezda, gde

senzorski čvorovi šalju svoje prikupljene podatke na senzorsko čvorište. Predmet rada će upravo biti unutar-BNTSM komunikacija senzora i čvorišta.

**Među - BNTSM komunikacija** se odnosi na komunikaciju između dve ili više BNTSM. U svakoj BNTSM, glavni čvor ima ulogu senzorskog čvorišta (*eng. Cluster Head*), koji je odgovoran za prikupljanje svih podataka iz elementarne mreže senzorskih čvorova i prosleđivanje tih podataka u centar za daljinsko upravljanje, kroz bilo koju okolnu mrežu (npr. Wi-Fi, 3G, 4 i 5G) [25]. Međutim, zbog mobilnosti korisnika i nepotpune dostupnosti komunikacijske infrastrukture u opasnim okruženjima i ruralnim područjima, teško je postići pouzdano prenošenje prikupljenih podataka. Među - BNTSM komunikacija uključuje komunikaciju između senzorskih čvorišta i koristi kooperativnu i multi-hop komunikaciju da bi se osigurao pouzdan prenos podataka od kraja do kraja u slučaju slabe pokrivenosti ili nedostupne mrežne infrastrukture.

**Spoljna - BNTSM komunikacija** se koristi u cilju povećanja performansi i pouzdanosti aplikacije. Da bi se omogućilo brzo i pouzdano prenošenje podataka prikupljenih od BNTSM do udaljenog kontrolnog centra, BNTSM komuniciraju sa spoljnim okruženjem kroz mnoštvo tehnologija, kao što su mobilni radio uređaji (PDA) ili mobilni telefon opremljen bežičnom mrežom, bežična senzorska mreža (WSN), bežično lokalno umrežavanje (WiFi) ili usluge mobilnih prenosa podataka (GPRS, 3G, 4G i 5G). Potrebno je da BNTSM bude efikasna u prikupljanju i objedinjavanju podataka u mrežnoj topologiji koja omogućava energetski efikasnu mrežu. Dosadašnja iskustva u organizovanju senzorskih čvorova kroz klastere i hijerarhijski pristup mreži pokazali su se efikasnim rešenjem za organizovanje senzorskih mreža sa ograničenom energijom, smanjujući potrošnju energije i smanjujući troškove komunikacije [26] [27]. Tehnike organizovanja mreže u klastere i grozdove imaju za cilj prikupljanje podataka među grupama osnovnih elementarnih čvorova gde bi se postavio vođa klastera (*eng. Cluster Head*), koji je zadužen za obavljanje agregacije podataka i komunikaciju do krajnje bazne stanice. Način protoka podataka u klasterizovanoj mreži prikazan je na slici br. 7. Senzorski čvorovi (Sensor Nodes) u BNTSM su podeljeni u grupe koje se nazivaju klasteri.

Svaki klaster može imati određen broj čvorova članova i glavnog čvora, koji se naziva vođom klastera (Cluster Head). Prikupljeni podaci od strane senzorskih čvorova se skladište ili šalju u realnom vremenu prema vođi klastera (CH), a on ih dalje prikuplja i tako prikupljene podatke šalje direktno na baznu stanicu ili pak koristeći komunikaciju sa više skokova. Pošto su BNTSM ograničenog propusnog opsega, performanse sistema za nadgledanje mogu da trpe i budu degradirane kada više senzora BNTSM-ova koegzistira u neposrednoj blizini i zauzimaju isti kanal istovremeno.



Slika br.7 Prikaz mrežne topologije BNTSM u klasteru

Posledica toga je da je nivo primljenog signala smanjen usled smanjenog kapaciteta prijemnog kanala [28]. Pored toga, BNTSM može da trpi ozbiljne interferencije kanala usled velikog broja radio signala, čime se znatno umanjuju komunikacijske performanse.

Shodno tome, odnos broja pogrešno prenesenih paketa podataka tj. stopa greške paketa (*eng. Packet Error Rate - PER*) raste, a ukupni broj uspešno prenetih paketa (*eng. Packet Reception Rate - PRR*), tj. primljenih paketa se smanjuje. Stoga zbog problema koegzistencije dolazi do uvećanja kašnjenja podataka usled ponovne emisiju paketa, što konačno smanjuje stopu iskorišćenja kanala [29].

Na osnovu svega iznetog može se videti koji su to sve različiti aspekti vezani za BNTSM. Polazeći od klasifikacije mogućih oblasti primene, moglo se sagledati koji su to zahtevi koje postoje u jednosm dizajnu BNTSM. Opisane su bežične tehnologije koje se razmatraju za BNTSM komunikacije, naglašavaju važnost definicije specifičnog standarda za podsticanje široko rasprostranjene difuzije ovih mreža. Zbog toga je potrebno pažnju posvetiti procesu standardizacije i pažnju posvetiti krajnjem korisniku koji mora da uoči stvarne koristi i poboljšanja koje dobija korišćenjem ovakve tehnologije.

### 3.3 Radio frekventna komunikacija u BNTSM

Postojeće tehnologije za BNTSM u oblasti bežične povezanosti na malim rastojanjima uključuju IEEE 802 porodicu bežičnih ličnih mreža (**WPAN**) i bežične lokalne mreže (**WLAN**), **Bluetooth** i **ZigBee**. Pregled i poređenje ovih tehnologija je dato u Tabeli br. 3. Poređenje je dato na skupu uobičajenih kriterijuma, kao što su: frekvencijski opseg, propusni opseg, brzina prenosa podataka, snaga prenosa, domet, energetske efikasnosti, topologije mreže, sigurnosti i

kompleksnost same primene određene tehnologije. Razmatrane su samo one karakteristike koje su adekvatne za BNTSM.

	UWB IEEE802.15.6	ZigBee IEEE802.15.4	Bluetooth(BR/LE) IEEE802.15.1	WLAN IEEE802.11 b/g
Frekventni opseg	402-405, 420-450,863-870,902-928,950-956 MHz 2.36-2.4, 2.4-2.4385GHz 3 – 10 GHz	868MHz/ 2.4GHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Propusni opseg	<500 MHz	2 MHz	1 MHz	20 MHz
Brzina prenosa	100-500/10 Mbps	0.25 Mbps	1-3/0.125-2 Mbps	11/54 Mbps
Snaga prenosa	-410 dBm	0/18 dBm	20/10 dBm	24 dBm
Domet	10/3 m	70-100m	10 m	100 m
Zahtevana energija	Niska	Niska	Srednja/Niska	Visoka
Topologija mreže	Point-to-point	Ad hoc, peer-to-peer, tree, star or mesh	Point-to-point/ mesh	Ad-hoc/ Infrstrukturna
Sigurnost	AES block/ 16 bit CRC	128 AES	64-128 bit encry. 16 bit CRC/ 128 AES	AES block/ 32 bit CRC
Kompleksnosts (uređaj/aplikacija)	Srednja	Niska	Visoka	Visoka

Tabela br.3 Komparativna analiza postojećih bežičnih tehnologija za BNTSM

**IEEE 802.11 - WLAN / Wi-Fi:** je skup zemaljskih, mrežnih tehnologija za komunikaciju podataka na niskim nivoima. WLAN standardi funkcionišu u frekvencijskim opsezima ISM od 2.4 GHz i 5 GHz [30]. IEEE 802.11 radi na tri glavna opsega. Niski opseg koji ima maksimalnu snagu prenosa od 50 mW, srednji sa maksimalnim 250 mW i visoki opseg sa najviše 1 W. Bežični standardi kao što su 802.11 a, 802.11 b i 802.11 ac imaju svoje prednosti i nedostatke koji čine korišćenje Wi-Fi neadekvatnim za praćenja u stvarnom vremenu i BNTSM. Na primer, dok 802.11 a pruža veliku maksimalnu brzinu i regulisane frekvencije za sprečavanje smetnji od strane drugih uređaja, ali ga karakteriše je visoka cena i mali opseg koji se lako može ometati. Takođe, iako 802.11 b ima nisku cenu i pruža dobar signal u opsegu, često pati od smetnji u WLAN prenosu. Tehnologija „**Wi-Fi mreže male snage**“ je još jedna bežična tehnologija koja je nedavno istraživana u aplikacijama za bežične senzore, izmenjena na osnovu originalnog IEEE 802.11 standarda kako bi imala manje cikluse operacija, predajnu snagu i druge mogućnosti u cilju uštede energije [31]. Ogroman broj uređaja koji koriste Wi-Fi tehnologiju koja se često koristi kod kuće, na poslu, u bolnicama, na pametnim telefonima i generalno u svakodnevnom životu doprineo je napretku „**Wi-Fi mreže male snage**“. Cilj upotrebe „**Wi-Fi mreže male snage**“ u integrisanim i nosivim senzorskim tehnologijama je potreba da se osnaži koncept **IoT**, koja može dodatno ga učiniti interesantnim u BNTSM primenama i učiniti dostupnim većem broju korisnika.



**IEEE 802.15.1 - Bluetooth:** je tehnologija koja je zamišljena kao standard bežične komunikacije kratkog dometa, veliku aktuelnost doživela je sa ekspanzijom mobilnih uređaja gde se široko koristi za povezivanje različitih uređaja za podršku prenosa podataka i glasovnih aplikacija. Uglavnom je usvojena u primeni aplikacija za zdravstvo i telemedicinu [32] [33] [25]. Bluetooth uređaji rade u ISM opsegu 2.4 GHz, koristeći skakanje frekvencije među 79 kanala širine 1 MHz nominalnom brzinom od 1.600 skokova /sek sa ciljem umanjenja smetnji. Glavni nedostatak Bluetooth tehnologije je u činjenici da i pored velike širine opsega i svojstva mreže malih dimenzija, ova tehnologija nije prikladna da podrži brzi prenos podataka, dugo vreme funkcionisanja senzorskih uređaja i multi-hop komunikaciju. Takav nedostatak čini Bluetooth standard neprikladnim za BNTSM aplikacije. Bluetooth niske energije (eng. Bluetooth low energy -BLE) je izvedena opcija Bluetooth standarda [34]. Predstavljena je kao pogodnije rešenje za BNTSM aplikacije zbog manje potrošnje energije koristeći rad sa malim radnim ciklusom (*eng. duty cycle operation*). Međutim to može predstavljati problem, kada se zbog ušteda energije pojedini delovi sistema ili senzora „gase“, što može učiniti sistem nefunkcionalnim. To ovu BLE tehnologiju čini neprikladnim za kritične aplikacije za praćenje (npr. kod urgentnih stanja, ozbiljnih hroničnih bolesnika, vojnoj primeni) koje zahtevaju učestalo slanje podataka.

**IEEE 802.15.4** – je bežična tehnologija za komunikacione sisteme kratkog dometa prvobitno namenjen za aplikacije sa ne tako striktnim zahtevima u pogledu protoka i kašnjenja u PAN mrežama. Ključne karakteristike se tiču niske složenosti, niske cene, niske potrošnje energije i niske brzine prenosa podataka, koje treba da podrže jeftine statične ili mobilne uređaje. IEEE 802.15 TG4<sup>1</sup> je objavio standard fokusiran na definiciju PHY i MAC slojeva za implementaciju BSM [35]. Na gornjim slojevima, koji su van okvira standarda, jedno od najčešće korišćenih rešenja je ZigBee stek protokola, preciziran od strane industrijskog konzorcijuma ZigBee Alliance [36].

**IEEE 802.15.4 – ZigBee:** je trenutno najrašireniji radio standard u BNTSM. U poređenju sa Bluetooth, ZigBee standard nudi veće područje pokrivanja i bolje performanse pod smetnjama. Ovaj standard je usmeren na aplikacije sa niskom brzinom prenosa i niskom potrošnjom energije. Standard navodi ukupno dvadeset sedam poludupleks kanala u tri nelicencirana frekventna opsega, čija je alokacija detaljno opisana prema sledećem:

---

<sup>1</sup> IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4), <https://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>.

- 868 MHz opseg : sastoji se od jednog kanala koji pokriva opseg između 868.0 i 868.6 MHz, i koristi se samo u Evropi. Brzina prenosa od 20 kbit/s se postiže Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) Binary Phase Shift Keying (BPSK) modulacijom.
- 915 MHz opseg: prostire se između 902 i 928 MHz, sa deset dostupnih kanala sa brzinom od 40 kbit/s sa DSSS BPSK modulacijom, ali različitim chip rate. Koristi se u Severnoj Americi i Pacifičkoj regiji.
- 2.45 GHz ISM opseg: se prostire između 2400 do 2483.5 MHz, podeljen u šesnaest kanala sa brzinom prenosa od 250 kbit/s, gde je centralna frekvencija  $f_c$ , definisana kao  $f_c \text{ [MHz]} = 2405 + 5 \cdot (n_c - 11)$ , pri čemu je  $n_c = \{11; \dots; 26\}$  broj kanala [35]. Za potrebe ovog opsega se koristi DSSS Offset Quadrature Phase Shift Keying (O-QPSK) modulacija.

Konkretno, ZigBee uređaji mogu raditi u ISM opsezima, sa brzinom prenosa od 20 Kbps do 250 Kbps [30]. ZigBee podržava tri vrste topologija: zvezdu, stablo - klaster i mesh topologiju. ZigBee nudi neke prednosti u odnosu na druge standarde kao što su održavanje različitih mrežnih topologija, multi-hop rutiranje bez obzira na topologiju mreže. Takođe, troši manje energije, procesorskih i memorijskih resursa. Upotreba ZigBee tehnologije može da obezbedi određen nivo bezbednosti aplikacija. Maksimalna brzina u ZigBee standardu je 250 Kbps pri 2,4 GHz što ga čini veoma energetski efikasnim uređajem. Zbog niske cene koštanja je rasprostranjena njegova primena u industriji. Međutim, brzina prenosa podataka od 250 Kbps nije dovoljna za rad u realnom vremenu i sa velikim brojem senzorskih čvorova u BNTSM, jer prouzrokuje velika kašnjenja u isporuci paketa podataka [37]. To se naročito ogleda u slučajevima audio i video realnog prenosa. To može imati veoma velikih posledica kada se BNTSM koriste u kritičnim i opasnim situacijama, gde je imperativ brz prenos podataka sa senzora do monitoring centra.

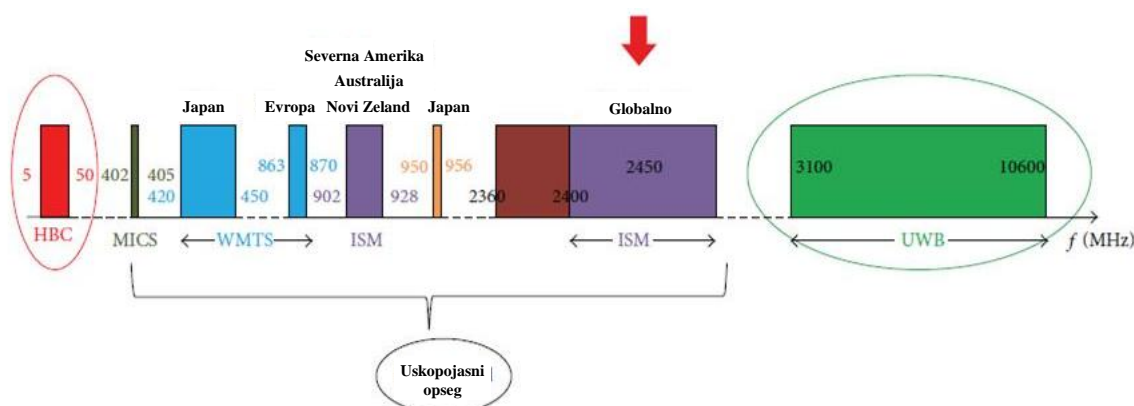
U nekoliko navrata je amadmanima uneta izmena u standardima kojima se uticalo na povećanje protoka, smanjenje potrošnje energije i povećanje preciznosti u određivanju dometa i lociranja. Neki od nedostataka ZigBee tehnologije su smetnje koje WLAN ostvaruje nad njima. Generalno, ZigBee je tehnologija koja može imati ograničenu primenu u BNTSM, njen najveći nedostatak su nemogućnost veće skalabilnosti spram male potrošnje energije, a takođe je ograničena u pogledu univerzalne primene u BNTSM. I pored takvih ograničenja ZigBee IEEE 802.15.4 je najkorišćeniji radio standard u BNTSM. Njegove glavne prednosti nad konkurentima je veće područje pokrivanja i bolje performanse pod smetnjama.

Standard takođe definiše i algoritam za enkripciju koji se koristi za šifrovanje podataka koji se šalju. Algoritam koji se koristi je Advanced Encryption Standard (AES) sa dužinom

ključa od 128-bita koji ne služi samo za enkriptovanje već i da bi potvrdio autentičnost podataka u cilju zaštite integriteta podataka [38].

U fokusu primene su aplikacije sa niskom brzinom prenosa i niskom potrošnjom energije.

**IEEE 802.15.6 – UWB:** Prevazilazi postojeće probleme u radio komunikaciji u BNTSM, a koje se odnose na nedostatke WLAN, Bluetooth i Zigbee, i u mnogo čemu odgovara zahtevima BNTSM u skladu sa njihovom primenom. Standard u bežičnoj tehnologiji za uređaje male snage. Ovaj standard omogućava komunikaciju kratkog dometa oko ili unutar ljudskog tela, međutim što je naročito važno, nije ograničena na ljude. Standard definiše mehanizme za bolju koegzistenciju sa drugim standardima bežične komunikacije, pregled je dat na slici br. 8.



Slika br. 8 Spektralni raspored u standardu IEEE 802.15.6 za primenu u BNTSM [39]

Predloženi standard koristi različite frekvencijske opsege za prenos podataka:

a ) uski opseg (Narrow Band – NB: 400, 800, 900 MHz i 2,3 i 2,4 GHz) (tabela br. 4),

- 402-405 MHz: MICS opseg je veoma prihvaćen iako mu je propusni opseg ograničen,
- 420-450 MHz: WMTS opseg, dostupan u Japanu;
- 863-870 MHz: WMTS opseg; dostupan u Evropi;
- 902-928 MHz: ISM opseg; mogućnost korišćenja bez licence u Severnoj Americi, Australija i Novi Zeland.
- 950-956 MHz: dostupan u Japanu;
- 2360-2400 MHz: novo usvojeni standard za korišćenje u BNTSM;
- 2400-2483.5 MHz: ISM opseg; dostupan širom sveta, ali mogu postojati problemi u koegzistencije sa drugim standardima koji rade u istom opsegu.

b) ultra široki opseg (Ultra-Wide Band: 3.1–11.2 GHz)

Ovaj opseg se deli na niži (3,25-4,75 GHz) i viši opseg (6,6-10,25 GHz), pri čemu se oba se sastoje od operativnih kanala od 500 MHz svaki. Ovaj UWB opseg je posebno dizajniran da ponudi robusne performanse za operacije visokog kvaliteta, niske složenosti i ultra male snage, što predstavlja primarne aspekte u radu BNTSM, gde su ljudska bezbednost i pitanja koegzistencije od najveće važnosti. Takođe su definisana dva operativna režima za:

- medicinske i nemedicinske aplikacije i
- usluge visokog kvalitet za visokoprioritetne medicinske aplikacije.

Frekvencijski opseg	Komponenta paketa	Modulacija	Brzina simbola (Kbps)	BCH kodovi (n,k)	Brzina prenosa podataka (Kbps)
402-405 MHz	PLCP Zaglavlje	$\pi/2$ -DBPSK	187.5	(31, 19)	57.5
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	187.5	(63, 51)	75.9
	PSDU	$\pi/4$ -DBPSK	187.5	(63, 51)	303.6
420-450 MHz	PLCP Zaglavlje	GMSK	187.5	(31, 19)	57.5
	PSDU	GMSK	187.5	(63, 51)	75.9
	PSDU	GMSK	187.5	(63, 51)	151.8
863-870 MHz	PLCP Zaglavlje	$\pi/2$ -DBPSK	250	(31, 19)	76.6
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	250	(63, 51)	101.2
	PSDU	$\pi/4$ -DBPSK	250	(63, 51)	404.8
902-928 MHz	PLCP Zaglavlje	$\pi/2$ -DBPSK	300	(31, 19)	91.9
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	300	(63, 51)	121.4
	PSDU	$\pi/4$ -DBPSK	300	(63, 51)	485.7
950-956 MHz	PLCP Zaglavlje	$\pi/2$ -DBPSK	250	(31, 19)	76.6
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	250	(63, 51)	101.2
	PSDU	$\pi/4$ -DBPSK	250	(63, 51)	404.8
2360-2400 MHz 2400-2483.5 MHz	PLCP Zaglavlje	$\pi/2$ -DBPSK	600	(31, 19)	91.9
	PSDU	$\pi/2$ -DBPSK	600	(63, 51)	121.4
	PSDU	$\pi/4$ -DBPSK	600	(63, 51)	485.7

Tabela br. 4 IEEE802.15.6 modulacioni parametri [39]

c) opseg za komunikaciju na ljudskom telu (Human Body Communication: 10–50 MHz)

Ovaj opseg se pre svega koristi u implantiranim i digestalnim sondama, gde se ljudsko telo koristi kao komunikacioni medijum. Opseg rada je usredsređen na 21 MHz sa propusnim opsegom od 5,25 MHz.

Bežični komunikacijski standard IEEE 802.15.6 je primenljiv u nosivim aplikacijama (u samoj senzorskoj mreži na telu, upravljanju fiziološkim stanjem i implantatima senzorske mreže) i ostalim aplikacijama (prenos video/audio u realnom vremenu, prenos podataka i zabava) [25]. Kraći domet UWB tehnologije, u poređenju sa ranije uvedenim standardima, pokazuje se kao prednost, pošto ima skromnije zahteve za napajanjem, oprema može biti manjih dimenzija i mogućnost zloupotrebe i napada na mrežu je ograničena. Zbog izloženosti tela

elektromagnetnom polju bežičnih komunikacionih uređaja u BNTSM i stepena specifične apsorpcije ljudskog tela (*eng. Specific Absorption Rate - SAR*), upotreba UWB radio-komunikacijskih uređaja male snage je dodatni motiv. Optimizacijom raspoložive energije u baterijama i omogućavanjem radio uređajima da rade na vrlo maloj snazi prenosa su još jedan garant bezbednosti uređaja od malicioznih napada. S druge strane radio uređaji izloženi velikoj snazi nekog namernog radio ometača mogu dovesti do otkaza cele mreže na telu.

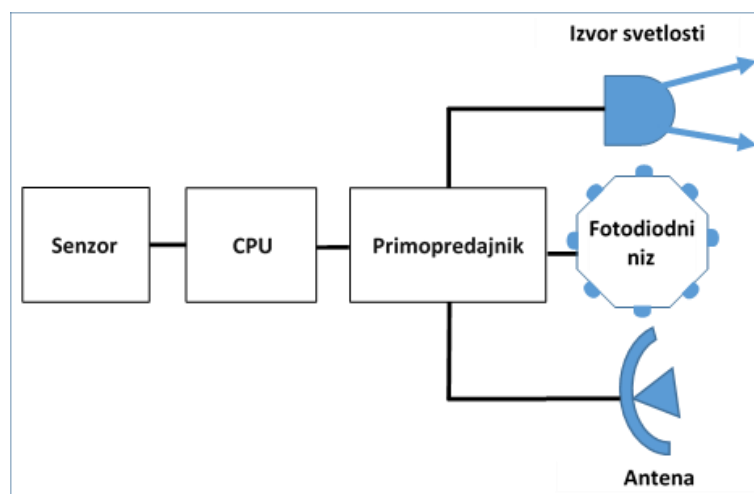
### 3.4 Bežični optički prenos u BNTSM

Opšte prihvaćeni koncept komunikacije u BNTSM je radio-frekventna komunikacija (RF). Ovakav način komunikacije često nije moguć ako postoji neprihvatljiv nivo RF smetnji, koji onemogućava efikasan prenos podataka između senzorskih čvorova. Ukoliko dolazi do značajnog rasipanja elektromagnetnih talasa to može imati posledice po bezbednost same mreže. Curenje elektromagnetne energije usled neadekvatne elektromagnetne kompatibilnosti može da utiče na efikasan rad samih senzora, što može dovesti do katastrofalnih posledica. U ovakvim slučajevima nije poželjno koristiti radio komunikaciju za prenos podataka u BNTSM. Zbog ovoga se u istraživanjima BSM i BNTSM raspravlja o efikasnom načinu komunikacije korišćenjem optičkih bežičnih komunikacija u slobodnom prostoru [40] [41].

**Bežični optički prenos** (*eng. Free Space Optics - FSO*) je pokazao svoj potencijal, zbog potrebe manje energije za uspostavljanje komunikacionog linka. Kod FSO linkova predajnik i prijemnik moraju biti na liniji vidljivosti (*eng. Line of Site - LOS*). Ono što se pokazalo u praksi je da komunikacioni FSO linkovi nisu uvek stacionarni, već da su često platforme koje nose FSO linkove mobilne. Njihov cilj je da se olakša komunikacija korisnicima koji menjaju lokaciju, koji se trenutno kreću ili su previše mobilni da bi stacionarni linkovi ispunili njihove zahteve. Polazeći od toga, u borbenim dejstvima se borbene trupe kreću veoma brzo i prelaze velike distance u samo jednom danu. Uloga mobilne FSO platforme bi omogućila krajnjem korisniku da odabere odakle će signal biti poslat i daje fleksibilnost koju stacionarna platforma ne može da obezbedi. Jedna od mogućnosti je da se koristi u komunikacionim vezama zemlja-vazduh, poput mobilne FSO platforme koja se montira na dron ili bespilotnu letelicu (**eng. Unmanned Aerial Vehicle – UAV**). Ovakve platforme bi omogućile krajnjem korisniku da pomeri tačku prenosa ili prijema dalje od njegove trenutne lokacije, povećavajući poziciju sigurnost i eventualno omogućavajući UAV-u da pronađe oblast sa jačim signalom. Ovakve letelice se mogu koristiti kao minijturni releji, primajući glavni signal od spoljnog predajnika i prenoseći ga krajnjem korisniku preko manjeg predajnika smeštenog na telu uređaja. Druga opcija je da se Sink Node mobilne FSO platforme postavljaju na kamione ili

terenska vozila, dok se senzorski agregacioni čvorovi mogu rasporediti bilo gde pa čak i u ranac.

U radu se pošlo od pretpostavke da se za komunikaciju koristi hibridni RF/FSO. U ovoj hibridnoj metodi FSO se redovno koristi, ali kada predajnik i prijemnik nisu u LOS-u, koristi se RF. Izgled funkcionalnog modela u obliku blok dijagrama je dat na slici br. 9.



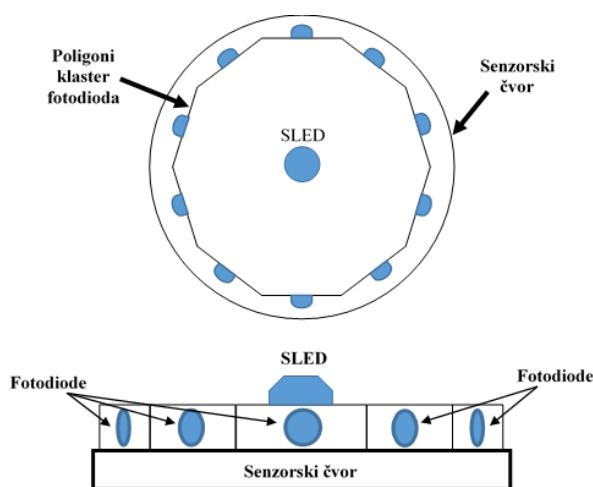
Slika br. 9 Blok dijagram RF/FSO bežičnog senzorskog čvora u BNTSM

U radu se predlaže hibridni RF/FSO sistem bežične senzorske mreže koja treba da prevaziđe negativne karakteristike samih sistema pojedinačno. Upotreba bežičnih senzorskih mreža na bojnopolju podrazumeva komunikacioni prostor koji je podvrgnut intenzivnom ometanju i pokušaju presretanja komunikacionih kanala od strane neprijatelja. Takođe upotreba operativne tehnike i ljudstva podrazumeva njihovo angažovanje u svim vremenskim uslovima tokom cele godine. U radu se opisuje dizajn čvora koji sadrži višestruke primopredajnike sastavljene od RF i FSO komunikacionih modula.

Dosadašnja istraživanja na polju RF komunikacionih modula u bežičnim senzorskim mrežama su iznedrila mnogobrojna rešenja, dok je broj istraživanja koja uzimaju u razmatranje hibridne RF/FSO module veoma ograničen. Najčešće ograničenje RF komunikacionih modula je ometanje. U radu se istražuje mogućnost razvoja jeftine implementacije FSO komunikacionog sistema u već postojeći RF komunikacioni sistem bežične senzorske mreže. Osnovna zamisao je da svaki senzorski čvor je opremljen sa optičkim predajnikom i prijemnikom konfigurisanim u poligoni niz, koji ima ulogu dobijanja što boljeg prijemnog polja u krugu od  $360^{\circ}$ . Kada snop svetlosti osvetli fotodiode čvor može da prima poruke od drugog čvora, poput FSO komunikacionih sistema. Prednost ovakvih FSO sistema su postizanje većih udaljenosti između senzorskih čvorova koji su na liniji optičke vidljivosti.

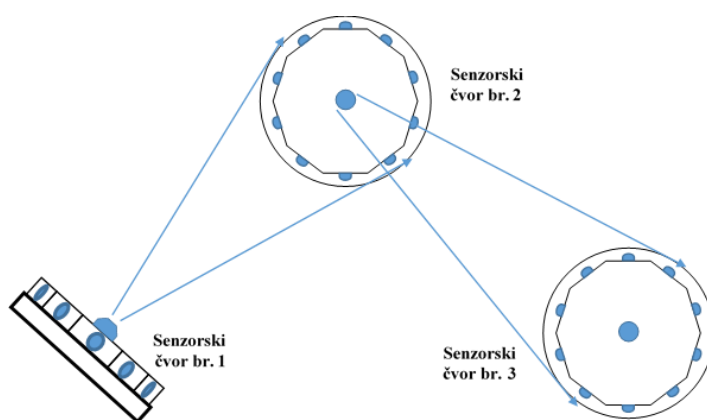
Kao logičan izbor izvora svetlosti nameće se upotreba **superluminiscentne svetleće diode** (SLED). Ove diode su širokopolasni poluprovodnički uređaji koji su blisko povezani sa svojim poznatijim srodnicima, laserskim diodama i diodama koje emituju svetlost (LED). Sve tri arhitekture se sastoje od pozitivno (p) -dopiranih i negativno (n) - dopiranih sekcija i emituju svetlost prilikom protoka električne struje kroz njih. PN spoj poluprovodničkog materijala je dizajniran da proizvede široku distribuciju energije parova elektron - rupa, što rezultira emisijom širokog opsega optičkih frekvencija iz njihove rekombinacije. Ovi SLED-ovi su sposobni da emituju svetlost visokog intenziteta (100-2500 mV) u obliku konusa prilično velikog ugla. Oni su prilično brzi i imaju vremena odziva reda veličine 80 ns. Ya te potrebe se koristi šema pomoćnih nosilaca modulisanih intenzitetom, gde je svakom predajniku dodeljena njegova jedinstvena frekvencija pomoćnog nosioca u opsegu MHz. Pored toga moguće je koristiti CDM moduliranje (code-division multiplexing).

Na prijemnoj strani se formira fotodiodni niz uglovno raspoređen koji se povezuje na svaki senzorski čvor bežične senzorske mreže [42]. Fotodiode su raspoređene u jednoj ravni sposobne za direktnu detekciju svetlosti sa SLED-a koji se nalazi u ravni. Sve fotodiode u takvom klasteru su povezane paralelno tako da se fotostruje sabiraju u stepenu pretpojačala. Na fotodiode pada snop svetlosti sa SLED predajnika bžičnog senzorskog čvora. Tek kada jedna od fotodioda primi odgovarajući signal pomoćnog nosioca, uspostavlja se komunikaciona veza. Šematski dijagram klastera fotodioda sa ugaonom raspodelom i predajnom SLED diodom na senzorskom čvoru je prikazan na slici br. 10.



Slika br.10 Izgled bežičnog senzorskog čvora sa optičkim predajnikom i prijemnikom

Ovako dizajniran RF/FSO senzorski čvor bežične senzorske mreže omogućava da više senzorski čvorova međusobno komunicira, jer predajna SLED dioda svojom širokougaonom emisijom daje mogućnost da klusterski niz fotodioda bude zahvaćen emisionim snopom kada su predajni i prijemni senzorski čvor u različitim ravninama (slika br.11). Kao što se vidi senzorski čvorovi međusobno komuniciraju sve dok fotodiodni klaster određenog čvora ostaje u vidnom polju SLED predajnika drugog čvora, komunikaciona veza između njih može se potencijalno uspostaviti. Stoga je u predloženim BSM zasnovanim na FSO komunikacionim sistemima moguća mobilnosti između dva čvora. Ako se uzme u obzir i mogućnost uređenja bežičnih senzorskih čvorova u mesh mrežu, senzorskoj mreži se daje mogućnost da obezbedi potpunu povezanost svih čvorova sa vođom klastera i dalje sa komandnim centrom.



Slika br. 11 FSO komunikacioni sistem bežične senzorskog čvora

Do sada je eksperimentalno utvrđeno da kod hibridnog RF/FSO BSM energija traje najmanje dva puta duže, nego kod standardne RF BSM. Zato se smatralo da je izbor hibridne RF/FSO BNTSM odličan izbor u pogledu uštede energije. Opseg talasnih dužina laserskog snopa se mogu kretati od 400nm do 1550nm. S tim u vezi potrebno je potpuno razumevanje kako prostiranje svetlosti kroz različite medijume može biti ometano od strane atmosferskih prilika, koje za posledicu ima slabljenje u komunikacionom kanalu, pa čak i potpunog gubitka signala. Prednost bežičnog optičkog prenosa u odnosu na radio prenos je u kapacitetu linka, koji značajno može obezbediti veće protoke, što je veoma bitno kada je u pitanju prenos multimedijalnih podataka. Kada se govori o potpunoj svesnosti okruženja pojedinca, često se za te potrebe razmatra i upotreba multimedijalnih senzorskih čvorova, koji za potrebe potpunog monitoringa prenose sliku ili video sa tela pojedinca analizirajući okruženje ili fizičko stanje lica u zahtevnoj okolini.



### **3.5 Bezbednost u BNTSM**

Kada govorimo o bezbednosti BNTSM mora se uzeti u obzir da su ovakvi sistemi zbog svojih ograničenih hardverskih (manja računarska snaga, manje memorije) i energetske kapaciteta veoma laka meta za razne napade [43] [44] i zato je potrebno obratiti pažnju na kritične tačke u mreži zbog čega bi ona bila ugrožena od strane uljeza [45]. Razmeštaj i rad BSM se odvija u kontrolisanom i nekontrolisanom okruženju, prijateljskom i neprijateljskom. Da bi se postigla bezbednost u komunikaciji senzorskih čvorova potrebno je obezbediti autentičnost, pristupačnost, poverljivost, verodostojnost, aktuelnost i tajnost podataka koji se prenose kroz komunikacioni kanal. U literaturi postoje četiri različite klase sigurnosnih pretnji koje su uobičajene u računarskim sistemima, kao i u senzorskim mrežama [46]. To su prekid, presretanje, modifikacija i fabrikovanje. Hibridna RF/FSO BSM u pogledu gore navedenih pretnji pruža dodatnu sigurnost u pogledu presretanja informacija i otpornosti na ometanje komunikacionog kanala.

### **3.6 Energetska efikasnost BNTSM**

Bežične senzorske mreže se u svom radu oslanjaju na bateriju, koje u zavisnosti od kapaciteta i potrošnje definišu životni vek jednog senzorskog čvor i same mreže u celini. Jedan od bitnih uslova u projektovanju BNTSM je dug životni vek, zbog čega je motivacija za razvojem hibridne kombinacije FSO i RF tehnologije velika. Raniji rezultati pokazuju da RF/FSO bežične senzorske mreže imaju životni vek dvostruko duži od bežičnih senzorskih mreža sa RF komunikacijom. Energiju baterije troše sve aktivnosti senzora: detekcija, obrada, skladištenje i komunikacija, međutim optimizacija energije koja se troši u komunikacijama je jedan od najvažnijih problema energetske efikasnosti [8], zapravo radio troši značajan deo energetske kapaciteta senzora. Da bi se postigle veće uštede energije potrebno je da se radio uključuje prema potrebi, ali u tom slučaju senzorski čvor gubi neprekidnost u komunikaciji sa ostatkom mreže. Kao jedan od perspektivnih pristupa se razmatra zasnivanje komunikacije na FSO linkovima [47].

Upotreba optičkih bežičnih komunikacionih linkova u zemaljskim aplikacijama ističu jedan od glavnih nedostataka, a to je uticaj vremenskih uslova kao što su magla, kiša ili sneg na optički signal, što se mora uzeti u obzir prilikom projektovanja i analize BNTSM. U ovom radu se razmatraju performanse hibridnih bežičnih senzorskih mreža i štetnih uticaja magle, kiše, snega i visoke temperature. Dosadašnji rezultati pokazuju da se ovakvim načinom rada

Uticaj fedinga na komunikaciju senzorskih čvorova u bežičnim nosivim telesnim senzorskim mrežama za vojnu primenu

---

u kombinovanoj hibridnoj mreža može obezbediti efikasna potrošnja energije što rezultira približno dvostruko dužim životnim vekom senzorske mreže, nego samo sa RF vezom [47].

#### 4. VOJNA PRIMENA BNTSM

Moderne vojske već više od dve decenije vrše laboratorijsko i terensko istraživanje na polju praćenja fiziološkog statusa vojnika. Tako su, nakon razvoja i testiranja najmanje pet glavnih nosivih senzorskih sistema, napori vojske SAD rezultirali specifikacijama za sistem udaljenog nadzora koji se nosi na grudima, Equivital system - „Black Ghost“<sup>2</sup> koji je trenutno zlatni standard za nesmetani nadzor fizioloških funkcija ljudi izloženih ekstremnim naporima i otežanim uslovima života i rada (vojnika, rudara, radnika u opasnim postrojenjima i sl.). Equivital™ Black Ghost (*slika br. 12*). je nosiva telesna senzorska tehnologija koji meri EKG, broj otkucaja srca, frekvenciju disanja, temperaturu kože, aktivnost i položaj tela i povezuje se sa spoljnim sensorima radi čuvanja i prenosa njihovih podataka. Ova nosiva tehnologija senzora korišćena je za prikupljanje jedinstvenih i korisnih fizioloških podataka o vojnicima u obuci i operativnim okruženjima u potpuno realnim uslovima. Sistem prati fiziološki status, bezbednost i performanse svakog člana tima u realnom vremenu. Prednost sistema je da su svi senzori postavljeni u jednom centralnom uređaju koji se nosi na telu (grudima ili pazuha). Broj senzora kojima se prate je ograničen, a pozicija na telu na kojoj je postavljen uređaj nije uvek najbolja za kvalitetno očitavanje vrednosti fizioloških procesa. Sa novim modelom EQ02 + je dodata mogućnost povezivanja sa bežičnim sensorom za merenje.



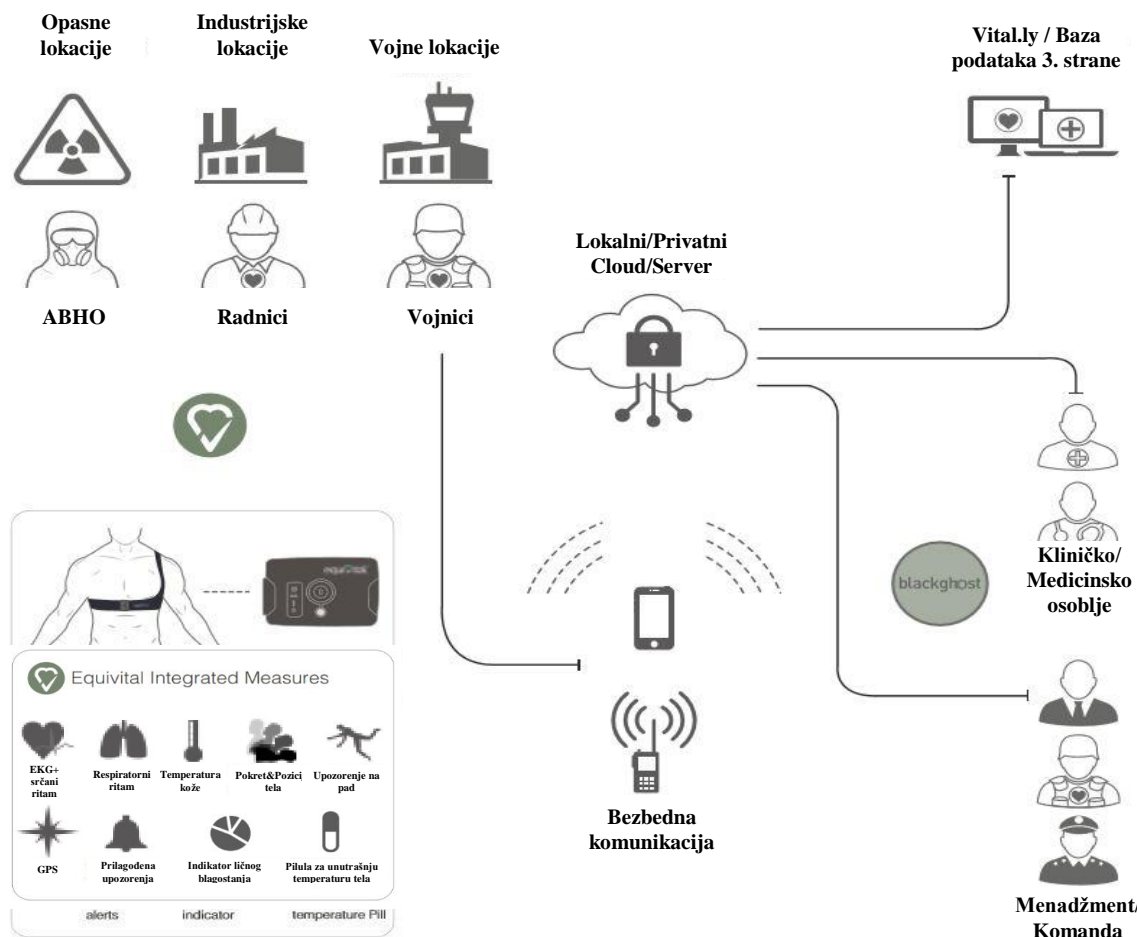
Slika br. 12 Sistema Equivital™ Black Ghost EQ01(levo),EQ02(sredina) i EQ02 +(desno)

Upotreba „Black Ghost“ za vojnu obuku pruža objektivne podatke o vojnikovim performansama i povećava svest o psihofizičkom stanju vojnika, što rezultira pozitivnim ishodima obuke. Ako se stanje lica prate u odnosu na početne vrednosti, može se doći do podataka o stanju toplotnog stresa i umora organizma, na osnovu kojih je moguće istaći područja koja je potrebno dalje razvijati [48].

---

<sup>2</sup> Equivital Hidalgo Ltd, Unit F, Trinity Court Buckingham Business Park Anderson Road Cambridge

Uređaj daje momentalan i neposredan uvid u rad i dobrobit čitavog tima tokom vežbe (slika br. 13). Ako se stanje lica prate u odnosu na početne vrednosti, može se doći do podataka o stanju toplotnog stresa i umora organizma, na osnovu kojih je moguće istaći područja koja je



Slika br. 13 Arhitektura nosivog telesnog senzorskog sistema Black Ghost

potrebno dalje razvijati [48]. Pored ovoga primera i drugi slučajevi su u svojim naporima doveli do razvoja nosivih sistema, uključujući senzore, algoritme za obradu signala, metode upravljanja tokovima podataka, strategije prenosa podataka i algoritme za pretvaranje podataka u delotvorne informacije koje se bave praktičnim potrebama vojske. Internacionalno na ovom polju rade mnoge vojne naučne institucije, univerziteti i istraživački centri među kojima su:

- Norwegian Defence Research Establishment - Istraživački institut Norveška,
- Defence Science and Technology Group – Agencija Australijske vlade,
- Army Research Laboratory – SAD,
- Institute of Creative Technologies – Univerzitet u Kaliforniji, SAD,
- Navy Health Research Center – SAD,

- Air Force Research Laboratory – SAD,
- DARPA – SAD,
- Netherlands Organisation for Applied Scientific Research – Holandska kompanija.

Mnoge vojske su pokrenule programe modernizacije vojnika za 21. vek, koji podrazumeva da pored boljeg naoružanja, opreme za preživljavanje u surovim uslovima, boljoj povezanosti i informisanosti o operativnoj situaciji u svom okruženju (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence – C<sup>4</sup>I) koncept budućeg vojnika uključuje i nosive tehnologije za psihofizički nadzor. Neki od tih programa su:

- Future Force Warrior – Nett Warrior, SAD,
- Land 200/Plan Beersheba – Australija,
- Fantassin à Équipement et Liaisons Intégrés – FÉLIN – Francuska,
- Infanterist der Zukunft – IdZ – Nemačka,
- Norwegian Modular Arctic Network Soldier – NORMANS – Norveška,
- Advanced Combat Man System – ACMS – Singapur,
- Integrated and Modular Engagement System for the Swiss Soldier – IMESS - Švajcarska,
- Future Integrated Soldier Technology – FIST – Velika Britanija.

Veliki deo istraživačkih napora se sprovodi kroz kooperaciju NATO zemalja i panel HFM RTG-260 “Enhancing Warfighter Effectiveness with Wearable Bio Sensors and Physiological Models” u koji su uključene Kanada, Francuska, Nemačka, Italija, Norveška, Singapur, Švajcarska, Velika Britanija i SAD.

#### **4.1 Pravci razvoja BNTSM za vojnu primenu**

Puno je izazova koje se javljaju u izradi mogućeg modela BNTSM za vojnika. Više nego ikada se vodi računa o zaštiti vojnikovog života, kao jednog od prvog i najbitnijeg resursa u vojnoj organizaciji. S tim u vezi smo mogli uočiti da se bezbednost značajno popravila u odnosu na 20 i 30 godina ranije. Pored fizičke zaštite (pancira) od metaka i šrapnela, vojnik 21. veka se štiti i od drugih činilaca koji mogu ugroziti njegov život, kao npr. hemijski agensi, ekstremni meteorološki uslovi (visoka temperatura, hladnoća, voda i sl.), fiziološka iscrpljenost usled ekstremnih napora ili rada i boravka u ekstremnim uslovima. U proteklim godinama je registrovano više slučajeva iznenadne smrti pripadnika vojske tokom redovne fizičke obuke. Tako su tokom obuke četiri studenta Vojske SAD umrli od hipotermije prilikom izvođenja vežbi u močvari 1977. godine. Kada su 1995. godine na istom treningu umrli još četiri studenta

tokom obuke za elitne jedinice Rendžera Vojske SAD, fiziološki monitoring i GPS praćenje pojedinaca postali su hitan prioritet u istraživanju kako Vojske SAD, tako i ostalih vojski sveta.

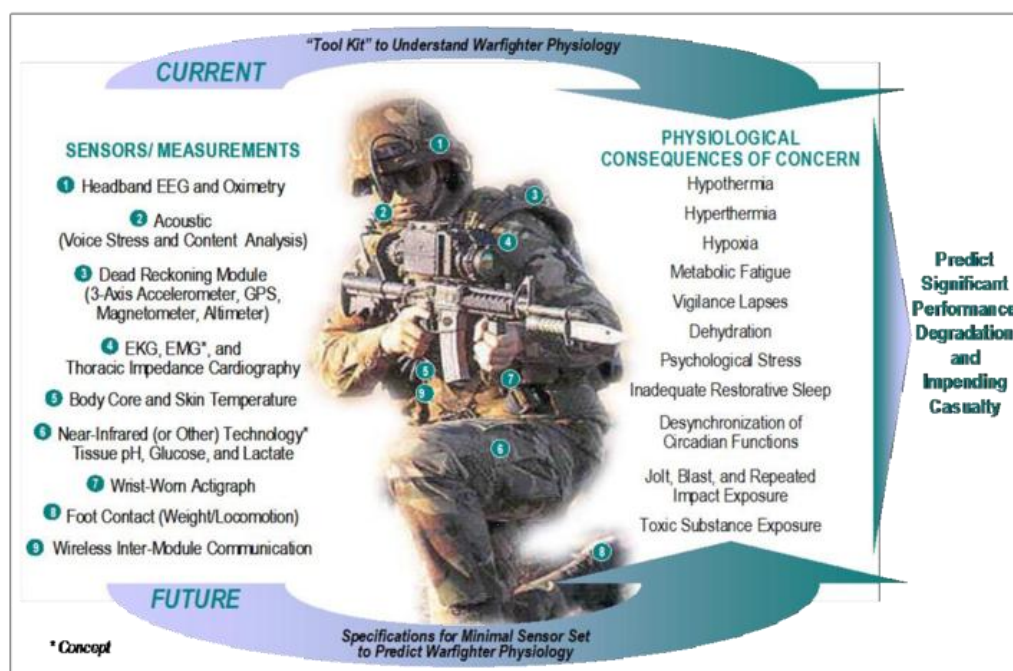
Uslovi naprezanja u borbenim dejstvima se simuliraju kroz redovnu mirnodopsku obuku, tako da su uslovi u kojima se telo vojnika napreže tokom uvežbavanja borbenih radnji mogu uzeti kao referentni za ispitivanje modela BNTSM za praćenje fiziološkog stanja vojnika. Napredak u senzorskim tehnologijama omogućio je bezbroj mogućnosti za efikasno praćenje ljudske aktivnosti u opasnoj okolini, kao i pomoć zaposlenima u kritičnim situacijama. Ova rešenja su heterogena u pogledu arhitekture i topologije. Heterogenost arhitekture odnosi se na različito korišćenje senzorske mreže (npr. jedan senzor, bežična senzorska mreža ili bežična telesna mreža) i koji su raspoređeni u opasnom okruženju i registruju fizičke pojave (npr. praćenje položaja, otkrivanje vibracija, merenje temperature i otkrivanje upada). Razvijene mreže se kreću od statički raspoređenih senzorskih čvorova do pokretnih čvorova koje nose pojedinci ili senzorskih čvorova ugrađenih u vozila. Svaka vrsta ove mreže ima svoju arhitekturu koja može zavistiti od velikog broja faktora iz svog okruženja. Zbog ograničene energije senzorskih mreža i pretnji povezanih sa nadgledanim okruženjem, potrebno je obezbediti održavanju mreže kako bi se osigurala neprekidna dostupnost mreže i efikasan nadzor. Druga vrsta heterogenosti odnosi se na topologiju razmeštenih mreža. Zapravo, dok neke BNTSM imaju statičku topologiju ili ograničenu pokretljivost (npr. pacijenti u bolnici ili rudari), drugi BNTSM mogu biti skloni putovanju i kretanju na vrlo velikim udaljenostima (npr. vojnici na bojnom polju, patrole u pograničnim linijama, timovi vatrogasaca u šumskim požarima i ekipe hitne pomoći na mestu koje je pogodila elementarna nepogoda). Mobilne BNTSM mreže često mogu doživeti gubitke konekcije, zbog čega ne mogu biti praćeni, a podaci sa njih ne mogu biti preneti na vreme u komandni centar.

Vojnici današnjice već koriste širok izbor nosivih tehnologija, npr. GPS, naočare za noćno osmatranje, daljinomer, radio uređaje, PDA i druge predmete. Ove nosive tehnologije koje nose i koriste vojnici predstavljaju pojedinačni vojnikov tehnološki sistem. Tom sistemu potrebno je dodati još jedan element, koji bi dodatno unapredio viziju „*povezanog vojnika na bojnom polju*“. Taj element upravo predstavlja „nadzor fiziološkog stanja vojnika u realnom vremenu“ (i predstavlja sasvim novu kategoriju nosivih tehnologija u vojsci). Sama ideja nije nova, ali je sa razvojem komunikacijskih, senzorskih, računarskih i mrežnih tehnologija, njihovom minijaturizacijom i smanjenjem troškova dobila na značaju. Tehnologija nadzora fiziološkog stanja vojnika u realnom vremenu je jedna od stvari koje su nedostajale i čija je uloga da omogući svakom pojedincu i njegovom neposrednom vođstvu delotvorne informacije

o fiziološkom statusu koje su potrebne da se osiguraju zdravlje i spremnost pojedinca i jedinice. Ove informacije, kao i alati za pomoć u odlučivanju pojedinačnom vojniku i vođi jedinica, predstavljaju „mogućnosti preobražaja“, tj. znanje stečeno iz nosivih predmeta ili interneta koji poboljšavaju, ali ne zamenjuju dobru obuku i intuiciju vođe [49].

Značajna dostignuća na tom polju dala su doprinos razvoju komercijalnih standarda i uređaja, a koja su sertifikovana od relevantnih međunarodnih medicinskih institucija. Ovaj sistem se uveliko koristi za prikupljanje podataka na terenu i preciziranje algoritama i koncepata rada u različitim aplikacijama. Takođe, značajan doprinos koji razvoj ovog sistema nadzora može da obezbedi je dobijanja fizioloških podataka o vojnicima tokom obuke i u borbenom okruženju, tokom obavljanja svojih zadataka pod stresnim uslovima, a koje se u laboratoriji ne mogu lako ponoviti. Značaj podataka dobijenih na ovaj način mogu pomoći da se usmere promene u doktrini rada i obuke.

Vojske širom sveta imaju dugu istoriju istraživanja i razvoja na nosivim sistemima za nadzor fiziološkog stanja vojnika. Kao što se može videti još su Karl Friedl i Janet Reece daleke 1999. godine dali načelni okvir kako će izgledati budući sistem fiziološkog nadzora vojnika putem nosivih tehnologija i senzorskih uređaja (*slika br. 14*). Kao što možemo videti BNTSN pruža informacije koje delotvorno mogu pomoći samom pojedincu da prati unutrašnje stanje



Slika br. 14 Rani koncepta fuzije podataka sa BNTSM za predviđanje fizioloških ishoda od značaja za vojnu obuku i borbeno operativno okruženje [49]

svog organizma, ali i njegovom vođi tima. Ono što BNTSM mogu pružiti ne samo u vojnim aplikacijama, već i u svim ostalim gde je to potrebno (vatrogasci, sportisti, fizički radnici, pacijenti i sl.) su: procena termičko naprezanja i upravljanje radnim opterećenjem, procena i upozoravanje na neurokognitivni status, neprekidna procena fizičkog umora i njegovo izbegavanje, rano upozorenje i ublažavanje povreda koštano-mišićnog sistema, praćenje stanja hidratacije tela i upravljanje metaboličkim rezervama u telu. Analizom podataka dobijenih na ovaj način mogu se uočiti i pratiti dublji procesi u organizmu i upravljati procesima kojima se može izbeći fatalan ishod. Uočavanjem stanja organizma blagovremeno se vojniku može sugerisati da modifikuje ishranu, smanji zamor tela ili izvrši blagovremenu hidrataciju radi potpune optimizacije svojih performansi.

Na ovaj način vojska može izgraditi još jednu borbenu sposobnost, a to je nadgledanje stanja spremnosti sopstvenih snaga, koja se kroz mrežno-centričnu platformu može distribuirati za sve nivoe komandne strukture u operativnim okruženju. Na osnovu dobijenih informacija moguće je dobiti kratkoročnu, srednjoročnu i dugoročnu procenu borbenih snaga. Kratkoročna procena obuhvata budnost, spremnost za zadatak i status mišićno-koštani sistema (umor i predstojeće povrede mišićno-koštanog sustava). Srednjoročna procena uključuju neurokognitivni status (raspoloženje i kognitivna stanja), a dugoročno procena imuno-odbrambeni odgovori domaćina (iščekivanje nadolazeće bolesti). Trenutno dostignuti nivo tehnološkog razvoja senzora, algoritmi predviđanja i sl., čine ove indikatore spremnosti sposobnim za detekciju. S tim u vezi govorimo o kratkoročnim i srednjoročnim procenama koje služe komandnoj strukturi i vojnicima. Dugoročne procene zahtevaju i da se BNTSM eksploatiše u dužem vremenskom periodu, što bi moglo otvoriti mogućnosti za: praćenje statusa ranjenika, samostalnog nadgledanja fiziološkog i zdravstvenog stanja i praćenje i dokumentovanje izloženosti sopstvenih snaga štetnim uslovima u životnoj sredini.

Veoma rano su vojna istraživanja i vojna industrija pokazala interesovanje za sistem nadgledanja zdravstvenog stanja vojnika, pa su prvi sistemi bili uređaji koji su se nosili na zglobu ruke i merili su srčani ritam. Tehnologija je bila takva da su sami uređaji bili veoma glomazni i teški za nošenje [50]. Ove ideje su sada preuzete i realizovane od trenutno najvećih komercijalnih proizvođača nosivih tehnologija i IoT (Apple, Huawei, Samsung, Mio Labs i sl.).

Ako se detaljnije razmotre komercijalno dostupni sistemi za fiziološki nadzor telesnih funkcija, mogli bi smo doći do zaključka da je možda jednostavnija upotreba ovakvih komercijalnih sistema i njihovo neznatno prilagođenje za vojnu primenu. Nažalost, teško je



potvrditi rad komercijalnih sistema, jer oni ne pružaju naučno validne podatke i gotovo su u potpunosti intelektualna svojina svojih proizvođača, kao i njihovi sistemi i algoritmi. Objektivno testiranje i evaluacija ovih komercijalnih proizvoda od strane vojnih institucija i organizacija pokazala je da preciznost i tačnost komercijalnih sistema mogu veoma varirati, a aplikacije i rezultati uglavnom ne zadovoljavaju potrebe vojske. Današnji , razvoj tehnologije tako brzo napreduje da dok se izradi jedna studije, ista može biti prevaziđena jer se na tržištu pojavio bolji uređaj sa novim mogućnostima.

Iz svih ovih razloga, za vojsku je ključno da razvije sopstveni tehnološki sistem za nadzor fiziološkog stanja vojnika i da kroz naučno-istraživačke institucije kontinuirano identifikuju, ocenjuju i koristi bilo koje vredne novine u tehnološkom sistemu povezanog vojnika. Zato je bitno održavati bliski kontakt sa naučnom-istraživačkom zajednicom, koje mogu da razumeju trenutne i buduće vojne potrebe za razvojem BNTSM i kontinuirano rade u sinergiji na oblikovanju tehnologija kako bi ispunili potrebe vojske. Razmatrajući koji bi model bio prihvatljiv za vojsku mišljenja sam da on treba da bude negde između performansi komercijalnih fitnes sistema i performansi sistema za klinički nadzor fiziološkog stanja lica, pri čemu je od presudnog značaja da razvojni napor BNTSM postignu pravi balans prihvatljivosti, preciznosti, tačnosti, skalabilnost, veličine, težine, snage i cena.

#### **4.2 Funkcionalni model BNTSM za fiziološki nadzor vojnika**

Osnovna zamisao BNTSM za monitoring vojnika je da spreči da vojnici upadnu u neki od stanja šoka (hipovolemiski, hipoglikemiski, promrzline ili opekotine ) tokom fizičke obuke ili pak tokom izvođenja borbenih operacija usled izlaganja telu ekstremnim fizičkim i psihičkim naporima, kao i ekstremnim meteorološkim uslovima okoline. Zato je potrebno je postaviti dovoljan broj senzora blisko na telu (ili u telu npr. temperaturna sonda u obliku kapsule) kako bi se blagovremeno uočile njihove fizičke i kognitivne performanse. To treba da pomogne licima koji prate njihov status da daljinski otkriju potencijalnu žrtvu i da blagovremeno izvrše njegovu trijažu i zbrinjavanje. Osnovni model BNTSM za praćenje fiziološkog statusa treba da integriše dovoljan broj senzora kako bi sistem mogao da postigne pretpostavljene ciljevi [51]. U radu će se obratiti pažnja samo na one senzore koji će se nalaziti na senzorskim čvorovima koji će bežičnim linkom biti povezani sa senzorskim čvorištem. Pristup ovom problemu možemo posmatrati sa stanovišta da svi senzorski čvorovi komuniciraju sa senzorskim čvorištem kao agregacionim elementom kao jedinom funkcijom ili kao sa agregacionim elementom koji je u isto vreme i senzorski čvor. To u velikoj meri određuje mogući položaj na telu vojnika agregacionog čvora, a samim tim i uslove za prostiranje radio talasa od senzora do

agregacionog čvora. U slučaju da je agregacioni čvor ujedno i senzorski čvor, najverovatniji položaj bi bio u prednjoj poluhemisferi tela, jer većina, ako ne i svi senzori bi se postavljali u toj hemisferi tela. U slučaju da agregacioni čvor obavlja samo funkciju agregacije, u tom slučaju je verovatnije da bude u zadnjoj poluhemisferi tela u kome je smeštena sva oprema koju vojnik nosi tokom aktivnosti. Takođe se mora posmatrati položaj agregacionog senzorskog čvorišta u odnosu na položaj koji ima u odnosu na vođu klastera (Cluster Head) koji ima ulogu da prikuplja podatke sa više pojedinačnih uređaja. Uobičajeno je vođa tima bude u istoj liniji sa svojim timom ili neznatno iza njih, što u tom slučaju definiše zadnju hemisferu tela kao najpodesniju mesto za postavljanje senzorskog čvorišta sa koje može da ima najbolju putanju radio talasa do vođe klastera. Međusobni položaj primopredajnika senzorskog i agregacionog čvora u velikoj meri određuje kakva će putanja radio talasa biti i koliki će to uticaj imati na nivo primljenog signala na prijemniku.

Osnovni model BNTSM bi uključivao:

- Sistem detekcije životnih znakova: merenje otkucaja srca i EKG, disanje, orijentacija tela i temperatura kože;
- Monitor unosa tečnosti: merač protoka pričvršćen na vojnički balon/čuturicu za vodu;
- Akcelerometar (aktigraf)<sup>3</sup>: procenjuje period odmora na osnovu stanja mirovanja/pokreta;
- Merenje temperature tela: Izmerena temperatura gutanom telemetrijskom tabletom;
- Vizuelno praćenje neposredne okoline,
- Centralni senzorski čvor: Integriše senzorske signale i predstavlja centralni komunikacijski čvor za niz bežičnih senzora.

Pored mreže senzora, sistem treba da poseduje i algoritme koji sirove podatke iz različitih senzora pretvara u informacije koje se mogu pratiti kao zaokružen fiziološki status vojnika.

Algoritam bi omogućavao informacije o:

- Stanju životnih funkcija: verovatnoća da je neko živ ili mrtav;
- Termalno stanje: termički odziv pojedinca; normalno ili u opasnosti od vrućine ili hladnoće;

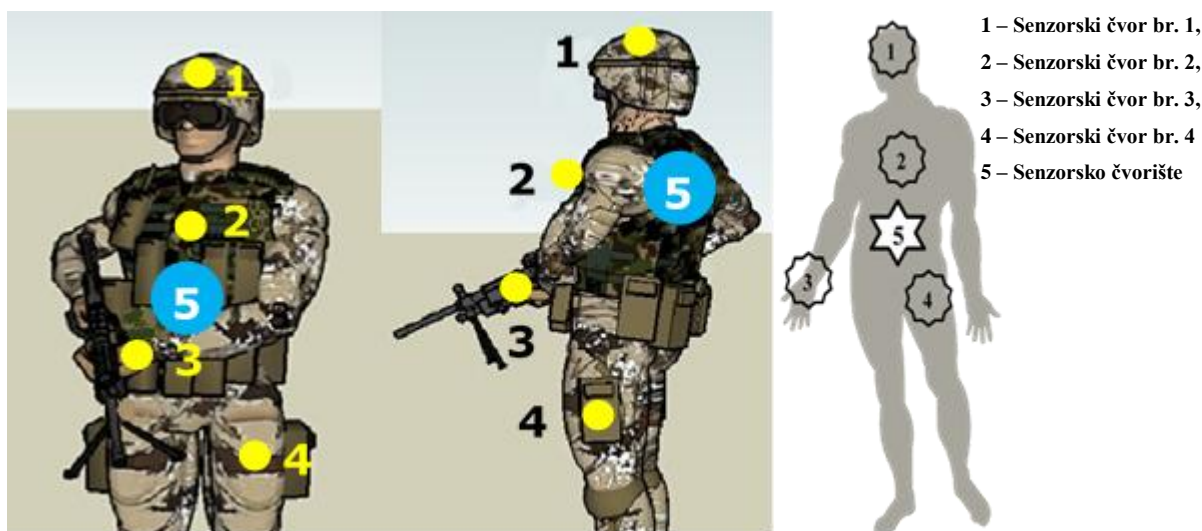
---

<sup>3</sup> Aktigrafija je neinvazivna metoda praćenja ciklusa odmora / aktivnosti čoveka. Jedinica se obično nalazi u pakovanju nalik na ručni sat koji se nosi na zglobu. Pokreti aktigrafske jedinice se kontinuirano beleže, a neke jedinice mere i izlaganje svetlosti.

- Stanju hidratacije: potrošnja tečnosti pojedinca; hidrirani , dehidrirani ili prekomerno hidrirani;
- Kognitivnom stanje: procena kognitivnih funkcija iz pojedinačne istorije odmaranja; ovo bi se radilo na osnovu srčanog ritma npr. kada odmara telo ima neki stabilan i niski nivo srčanog ritma i na osnovu kretanja tela što bi se procenjivalo aktigrafom;
- Neposrednoj okolini, čime bi se mogla vršiti vizuelna procena stanja okruženja u kojoj se nalazi vojnik.

Funkcionalni model BNTSM za praćenje fizioloških parametara vojnika u ovom radu će registrovati sledeće fiziološke parametre: elektrokardiogram (EKG), elektroencefalogram (EKG), fotopletizmogram (PPG)<sup>4</sup>, galvanski odgovor kože (GSR)<sup>5</sup>, krvni pritisak (BP) koji je dobijen analizom vremena propagacije pulsa (PTT) i telesna temperatura.

Predloženi BNTSM za praćenje sastoji se od četiri senzorska čvora strateški postavljena na određenim lokacijama ljudskog tela radi uvida u fiziološke parametre. Na slici br. 15 prikazana je šema BNTSM koji se sastoji od četiri senzorska čvora i jednog senzorskog čvorišta (agregacioni element).



Slika br. 15 Šematski raspored senzorskih čvorova u BNTSM

**Senzorski čvor br. 1** treba da dobije jedan kanal bipolarnog EEG signala iz frontalnog dela glave. Senzorski čvor se može nositi u obliku elastične provodljive trake oko glave ili pak ceo sklop može biti integrisan unutar vojničkog šlema (slika br.16). Pored toga senzorski čvor se

<sup>4</sup> Jednostavna i jeftina tehnika koja se koristi za detektovanje volumena krvi u mikrovaskularnom sloju tkiva koji se usled pritiska šire i skupljaju. PPG optički senzor emituje svetlosne signale koji se reflektuju sa kože, a zatim koristeći tehnologiju detekcije kretanje meri tačno i kontinuirano protok krvi.

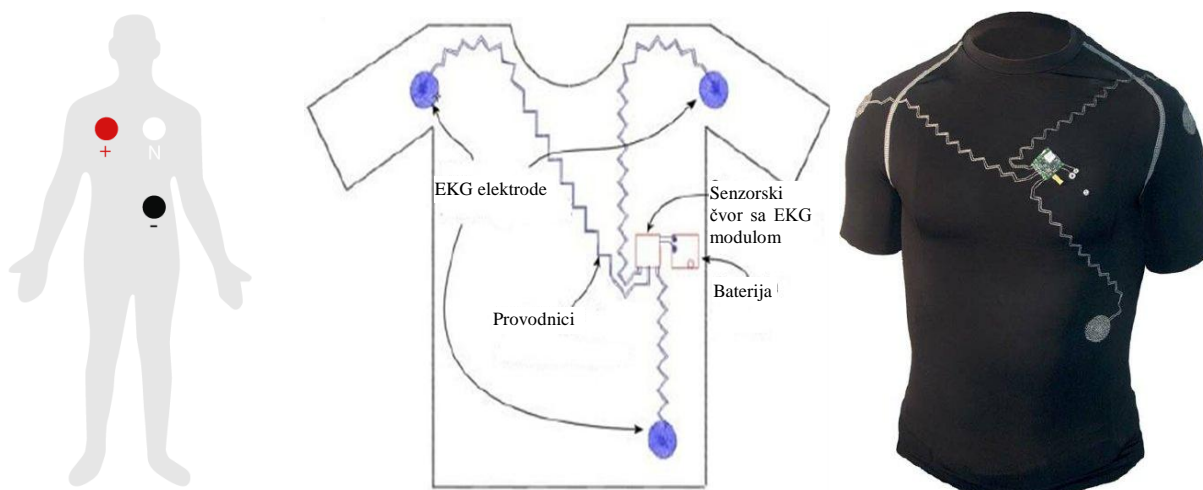
<sup>5</sup> Galvanski odgovor kože (GSR), takođe nazvan Elektrodermalna aktivnost (EDA) i provodljivost kože (SC), je merilo neprekidnih promena u električnim karakteristikama kože, npr. provodljivost , prouzrokovano znojenjem tela, što može biti pokazatelj mentalnog stresa, uzbuđenja, početan napada ili srčanog udara.

može postaviti kao multimedijalni senzorski čvor koji bi sa najviše tačke na telu prikupljao slike okoline onoga što vidi vojnik iz svoje perspektive.



Slika br.16 Šematski raspored elektroda i senzorskog čvora u šlemu

**Senzorski čvor br. 2** treba da dobije EKG na osnovu 1. bipolarnog odvoda sa gornjeg dela grudnog koša i telesne temperature subjekta na osnovu temperature kože. Senzorski čvor se može nositi u obliku medicinske majice u kojoj je integrisan ceo sklop elektroda, elektronike i baterije ili pak u vidu pojasa koji se može nositi preko grudi (*slika br. 17*).



Slika br. 17 Šematski raspored elektroda i senzorskog čvora na grudima

**Senzorski čvor br.3** treba da dobije PPG, GSR i signale pokreta; PPG signali se dobijaju sa kažiprsta, GSR se dobija sa kažiprsta i srednjeg prsta, dok se signali pokreta dobijaju sa zglobova šake uz pomoć akcelerometra i aktigrafa. Takođe se sa senzora na kažiprstu senzora dobija informacija o zasićenosti krvi kiseonikom i temperatura tela (*slika br. 18*). Neki ga zovu petim vitalnim znakom, nakon brzine pulsa, brzine disanja, telesne temperature i krvnog pritiska,

zasićenost krvi kiseonikom (*eng. peripheral capillary oxygen saturation SpO<sub>2</sub>*) predstavlja veoma brzu, laku i neinvazivnu metodu [52].



Slika br.18 Šematski raspored elektroda i senzorskog čvora u balističkoj rukavici

Senzorski čvor se sa svojim sastavnim delovima i sensorima u potpunosti integriše u balističke rukavice.

**Senzorski čvor br. 4** dobija signale sa sonde kojima se meri ambijentalna temperatura, vlažnost, zagađenosti vazduha i protokomera balona/čturice za vodu. Senzorski čvor u potpunosti može biti integrisan na uniformi, bez potrebe da bude u kontaktu sa telom. Senzorski čvorovi prikupljaju fiziološke signale i prenose ih do senzorskog čvorišta (Sink Node) koristeći UWB bežičnu komunikaciju.

**Senzorsko čvorište br. 5** bežično komunicira sa svim senzorskim čvorovima i objedinjava sve registrovane, očitane i izmerene pojave i vrednosti, a zatim takve podatke bežično šalju na vođu klastera radi dalje analize i interpretacije.

Ono predstavlja agregacionu tačku koja objedinjava sve očitane vrednosti i predaje sledećem senzorskom čvorištu u hijerarhiji, a takođe i da prima osnovne komande i podatke za retranslaciju. Osnovna zamisao je da ovo čvorište bude RF/FSO bežični senzorski čvor.

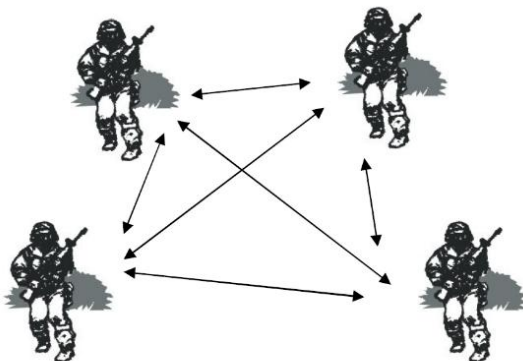
#### 4.3 Telekomunikaciona mreža senzorskih čvorova

U toku rada BNTSM generiše velike količine podataka, što za posledicu ima zahtev da bežična mrežna infrastruktura kao transportni medijum bude robusna i efikasna. Aktivni delovi mreže, tj. senzori zahtevaju povezivanje sa senzorskim agregatorima (*eng. gateways*). Sama transportna infrastruktura može imati više oblika: lokalna mreža (WLAN), Wi-Fi i lična mreža (PAN) kao što su ZigBee, Bluetooth, Ultra-Wideband (UWB) i bežični optički prenos (FSO). Senzorski čvorovi koji predstavljaju vođe klastera i čvorišta podataka/bazne stanice mogu svoju vezu sa komandnim centrom ostvariti putem širokopojasne mreže (WAN) kao što su 4G

LTE/5G, putem komandnog radio uređaja ili FSO linkom. Senzori u okviru klastera treba da koriste radio komunikacije sa malom snagom i niskom brzinom prenosa podataka, poput ZigBee, UWB ili FSO što im omogućava da imaju duži vek baterije.

Upotrebom širokopolasne mreže za komunikaciju 4G LTE, LTE-A i 5G. Obezbeđuju se značajno veće brzine prenosa podataka, sa mogućnošću od 100 Mbps downstream i 50 Mbps upstream, smanjenim vremenom kašnjenja i skalabilnim kapacitetom propusnog opsega. Trenutni stepen razvoja postojećih mreža obezbediće budućim širokopolasnim mrežama brzine od 1Gbps downstream i 500Mbps upstream [53]. Takođe upotreba FSO linkova može obezbediti brzine od 100Mbps do 2.5 Gbps, pri čemu treba imati u vidu da je ovo nelicencirana tehnologija koja koristi modulirane lasere za prenos informacija kroz atmosferu. Koristeći laserski zrak, FSO može da prenosi i prima podatke, glas i video, informacije kroz vazduh.

Ovo je veoma važno kada imamo u vidu da agregacione tačke kao vođa klastera ili bazne stanice primaju veoma velike količine podataka, koje moraju da efikasno i u realnom vremenu proslede dalje. Povezanosti senzorskih čvorova na nosivim platformama kroz napredne komunikacione sisteme treba da omogući postojećim čvorovima u sistemu da međusobno komuniciraju na distributivnom i kooperativnom nivou (*slika br.19*).



Slika br.19 Povezanost senzorskih čvorova na distributivnom i kooperativnom nivou

Upotreba sve razvijenijih algoritama u mašinskom učenju dovešće do toga da će sistem samostalno donositi odluke u realnom vremenu na osnovu očitanih senzorskih podataka i predviđati buduće vrednosti na osnovu očitanih podataka u prošlosti i prošlih iskustava [54]. Upotreba nekog nivoa veštačke inteligencije na pojedinačnim senzorskim čvorovima može doprineti tome da sam korisnik najpre bude upozoren na kritično fiziološko stanje organizma. Na osnovu tako obrađenih podataka sistem će biti u mogućnosti da izvrši klasifikaciju podataka

i da iste dostavlja u vidu kraćih poruka ili izveštaja, čime se smanjuje vreme reagovanja na događaje [55].

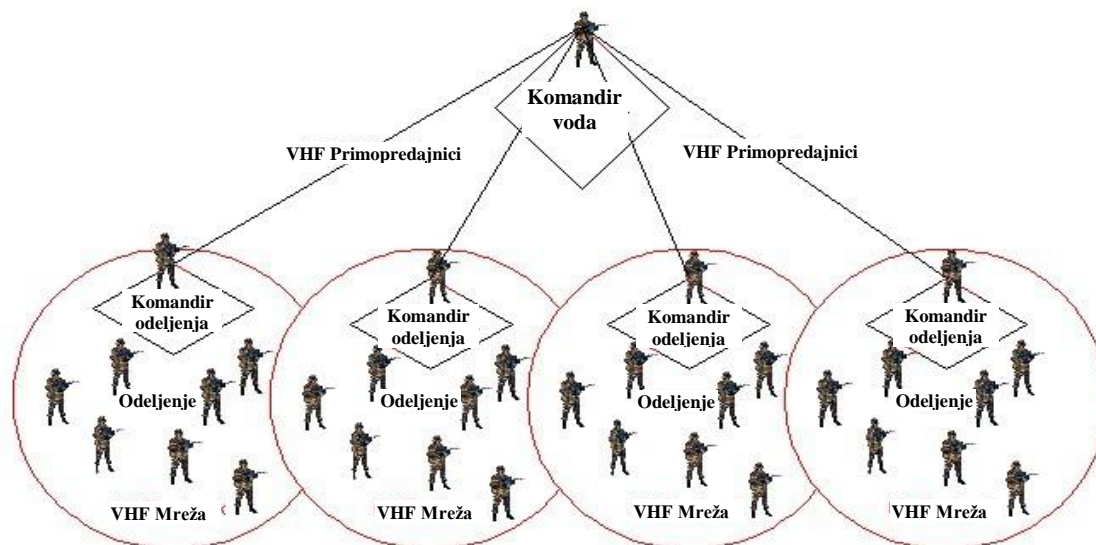
#### 4.4 Hijerarhijska komunikacijska struktura BNTSM

Dosadašnja istraživanja na polju implementacije senzorskih mreža i nosivih tehnologija na telu, kao jedan od problema ističu komunikaciju senzora i MAC sloja u OSI modelu [56]. U ranijim istraživanjima se ta komunikacija senzora zasnivala na topologiji „zvezde“, sistemu u kome su se podaci sa više senzora slali u tačno definisanim vremenskim prozorima na senzorsko čvorište na takav način da ne dođe do sudara [57]. Prozori za prenos su se sinhronizovali pomoću kontrolnih signala koje je periodično slalo senzorsko čvorište. Sa stanovišta usmeravanja paketa podataka sa senzora, većina postojećih BNTSM usvojilo je topologiju „zvezda“ ili „stabla“, što znači da je fizički moguć put između bilo kog para senzora na telu u bilo kojem trenutku. Međutim, ovi modeli se ne primenjuju u mrežama koji mogu tolerisati kašnjenje prilikom usmeravanja, kako je zamišljena mreža u ovom radu, gde čak krajnja fizička povezanost između nekih parova čvorova ponekad ne može biti prisutna.

Hijerarhijska komunikacijska struktura unutar BNTSM treba da obezbedi skalabilnost mreže [58] [59] [60] [61] [62]. Sama mreža, kao što smo ranije rekli, sastoji se od komandnog centra, bazne stanice, vođa klastera (hardverski jači senzorski čvora) i senzorskih čvorova (postavljeni na svakog vojnika pojedinačno) uvezanih na vođe klastera. Komunikacija između komandnog centra i bazne stanice (komandir voda) bi se odvijala preko standardnog TCP/IP protokola. Komunikacijska veza bi se odvijala preko putem LTE/5G mreže, taktičkog radio uređaja ili FSO linka. Takođe, veza između bazne stanice (komandira voda) i vođe klastera (komandir odeljenja) bi se zbog robusnosti i uslova eksploatacije odvijala preko manjeg taktičkog radija. Unutar samog BNTSM na nivou tima (odeljenja) komunikacija između pojedinačnih senzorskih čvorova (vojnika) bazirala bi se na energetski efikasnom IEEE 802.15.6 standardu (*slika br.20*) [63].

Zamisao je da senzorski čvorovi očitane vrednosti prosleđuju vođama klastera, gde se može vršiti preliminarna obrada očitanih vrednosti, a onda se prosleđuju baznim stanicama i komandnom centru gde se oni spajaju, obrađuju, vizualizuju i prezentuju operateru [64] [65] [66] [67]. Takođe postoji protok podataka od komandnog centra ka nižim hijerarhijskim uređajima u obliku konfiguracijskih instrukcija, zahteva za reprogramiranjem senzorskih čvorova ili pak komandi za resetovanje čvora [65] [68]. Celokupna komunikacija između bazne

stanice, vođa klastera i senzorskih čvorova je zaštićena softverskom enkripcijom (kriptovanjem) i hardverskom komunikacijskom zaštitom (skokovita promena frekvencije).



Slika br. 20 Hijerarhijska komunikacijska struktura BNTSM na nivou voda

Nakon toga je komunikacija senzorske mreže uspostavljena, gde se sve poruke koje se razmenjuju smatraju zaštićene od oticanja i od eventualnog ometanja.

Uzimajući u obzir sve navedeno BNTSM se može smatrati multimrežom, platforma koja mora da reši nekoliko nedostataka: interakcije i mešanje BNTSM sa drugom opremom koju nosi vojnik; komunikacija heterogenih uređaja (senzori) na različitim slojevima skupova protokola; nedostatak standardizacije na nivou mreže / podmreže; Nepostojanje integrisanog nivoa aplikacije za donošenje odluka.

#### 4.5 Hardver funkcionalnog modela BNTSM za vojnu primenu

Da bi se empirijski proverili postavljene hipoteze u radu, potrebno je obezbediti hardversko okruženje u kojima bi se mogli modelirati i simulirati uslovi koji su približni realnim. U takvim uslovima potrebno je da se izvrše neophodna merenja i da se postave početni zahtevi za prikupljanje podataka. U nedostatku resursa renomiranih istraživačkih i razvojnih instituta, za izgradnju merno akvizicijskog senzorskog uređaja i njegovih podsistema, može se krenuti od dostupnih komponenti sa komercijalnog tržišta. Osnovu ovakvog sistema čine razvojne ploče sa programskim kontrolerima, adekvatnim sensorima i radi komunikacijskim uređajima. Kako bi se ovi pojedinačni elementi povezali u kompaktnu funkcionalnu celinu potrebno je napisati *embedded* softver koji će omogućiti da podsistemi međusobno komuniciraju i izvršavaju postavljene zadatke. Te zadatke možemo izdvojiti kao:



- Uspostavlja i održava komunikaciju na nivou senzorski čvor – akvizicioni čvor (senzorsko čvorište),
- Akvizicija podataka sa senzorskih čvorova i njihova obrada,
- Merenje vrednosti izlazno/ulaznih signala, njihova A/D konverzija, obrada, analiza i prikaz,
- Komunikacija sa personalnim računarom u cilju više analize izvršenih merenja.

Karakteristike sistema moraju biti takve da omoguće veliku brzinu odabiranja u velikom periodu vremena, za šta je potrebna razvojna ploča sa dovoljno velikom računarskom snagom mikrokontrolerske jedinice, dovoljnim brojem ulaznih portova za komunikaciju sa sensorima, ulazno/izlaznim portovima za vezu sa radio i FSO modulima, USB/Serial konekciju sa personalnim računarom.

Senzorsko čvorište kao agregacioni element u mreži treba da ima najveće računarske, memorijske i komunikacijske kapacitet. U tom pogledu tokom analize potrebnih performansi i dostupnosti došlo se do zaključka da bi programabilna mikrokontrolerska ploča Arduino DUE sa 32-bit ARM procesorom na 84MHz taktu podržala sve planirana testiranja (slika br. 21). Mogućnost proširenja drugim pločama i modulima istog ili sličnog proizvođača, čini sistem



Slika br.21 Programabilni mikroračunar Arduino DUE

Microcontroller	AT91SAM3X8E
Operating Voltage	3.3V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-16V
Digital I/O Pins	54 (of which 12 provide PWM output)
Analog Input Pins	12
Analog Output Pins	2 (DAC)
Total DC Output Current on all I/O lines	130 mA
DC Current for 3.3V Pin	800 mA
DC Current for 5V Pin	800 mA
Flash Memory	512 KB all available for the user applications
SRAM	96 KB (two banks: 64KB and 32KB)
Clock Speed	84 MHz
Length/ Width/ Weight	101.52 mm/53.3 mm/36 g

Tabela br. 5 Tehničke karakteristike ploče Arduino DUE

skalabilnim i robusnim za planirane uslove. Veliki broj analognih i digitalnih ulaza/izlaza pruža velike mogućnosti u radu sa istom (tabela br.5)

Radio i FSO komunikacijski moduli na osnovu kojih je moguće izvršiti potrebna testiranja i merenja su (tabela br. 6):




 <p>NRF24L01 Primopredajnik</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Univerzalni ISM opseg, monolitni primopredajni čip radi u opsegu 2.4-2.5GHz</li> <li>• Generator frekvencije, unapređen tip, SchockBurst™, kontrola moda, pojačavač snage, kristalni pojačavač, modulator, demodulator</li> <li>• Ekstremno mala potrošnja struje, kroz SPI interfejs</li> <li>• Ugrađena 2.4GHz antena, prijem podataka kroz šest kanala</li> <li>• Veličina: 15 x 29mm (uključujući antenu)</li> <li>• Mali operativni napon: 1.9-3.6V</li> <li>• Mala potrošnja energije</li> <li>• 125 ch., multi-point komunikacija i frekvencijski „hopping“</li> <li>• Velika brzina: 2Mbps,</li> <li>• Vreme transmisije veoma kratko</li> <li>• Mala cena koštanja</li> <li>• SPI interfejs: hardver SPI port, MCU I/O portovi</li> </ul>
 <p>SLED</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tip: SLED (EXS210035-02)</li> <li>• Talasna dužina:650 nm</li> <li>• Izlazna snaga:5 mW</li> <li>• Širina opsega (FWHM):10 nm</li> <li>• Radna struja:100 mA</li> <li>• Radni napon:3.0 V</li> <li>• Radna struja:120 mA</li> <li>• Divergencija snopa u paraleli:15 stepena</li> <li>• Bočna divergencija snopa:40 stepeni</li> <li>• Centralna talasna dužina:630 do 670 nm</li> </ul>
 <p>Fotodioda</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monilitna silikonska IC kontejnerska fotodioda, operacioni pojačavač</li> <li>• Konvertuje svetlost u napon</li> <li>• Visok odziv na osvetljenost, tipično 137 mV/(W/cm<sup>2</sup>) na p = 635 nm (TSL250R),</li> <li>• Kompaktno transparento plastično kućište</li> <li>• Rad sa jednim naponom</li> <li>• Nizak tamni (Offset) napon....10 mV maksimalan</li> <li>• Niska napojna struja.....1.1 mA Tipičan</li> <li>• Širok opseg napona napajanja.... 2.7 V do 5.5 V</li> </ul>

Tabela br. 6 Testni komunikacijski moduli

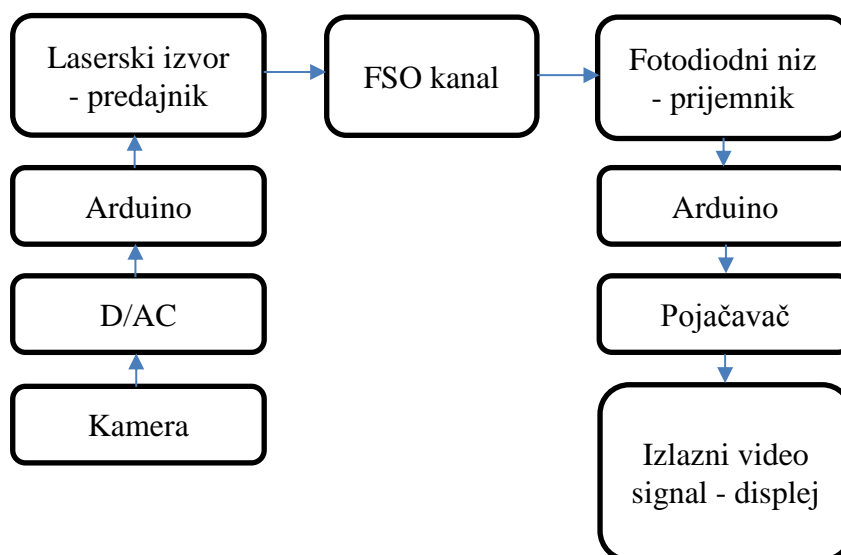
Razvojna ploča Arduino RF-NANO je standard za mikrokontroler senzorskog čvora. Razvojna ploča Arduino RF-NANO je mikrokontrolerska ploča sa integrisanim primopredajnikom (NRF24L01) u ISM opsegu za vezu sa senzorskim čvorištem, kao agregacionim sensorom. Izmerene vrednosti koje prikuplja senzorska ploča ELEMIO se prosleđuje razvojnoj ploči Arduino RF-NANO, koja onda te vrednosti prosleđuje senzorskom čvorištu koje predstavlja Arduino DUE. Radio komunikacijski modul razvojne ploče Arduino RF-NANO je za ISM talasno područje 2.4 GHz. Primopredajnici na senzorskom čvoru i čvorištu moraju da budu istorodni. Potrebna merenja se vrše u standardnim frekvencija za primopredajnike BNTSM (*tabela br. 7*) koji su dostupni na tržištu.

Uticaj fedinga na komunikaciju senzorskih čvorova u bežičnim nosivim telesnim senzorskim mrežama za vojnu primenu

	IEEE 802.11a/b/g/n	IEEE 802.15.1 (Bluetooth)	IEEE 802.15.1 (Bluetooth-LE)	IEEE 802.15.4 (ZigBee)	IEEE 802.15.4a (UWB)	IEEE 802.15.4j (MBAN)	IEEE 802.15.4 (BANs standard)
<b>Modeli rada</b>	Adhoc, Infrastruktumi	Adhoc	Adhoc	Adhoc	Adhoc	Adhoc	Adhoc
<b>Fizički (PHY) sloj</b>	NB	NB	NB	NB	UWB	NB	NB,UWB,HBC
<b>Radio frekvencija (MHz)</b>	2400,5000	2400	2400	868/915/2400	75-724 3000-5000 6000-10.000	2360-2490 2390-2400	402-405,420-450 863-870,902-928 950-956,2360-2400, 2400-2438,5
<b>Potrošnja struje</b>	Visoka (~800mW)	Srednja(~100mW)	Niska (~10mW)	Niska (~60mW)	Niska (~50mW)	Niska (~50mW)	Ultra niska (~1mW na 1m)
<b>Maksimalna brzina signala</b>	Do 150Mb/s	Do 3Mb/s	Do 1Mb/s	Do 250Kb/s	Do 27.24Mb/s	Do 250Kb/s	10Kb/s do 10Mb/s
<b>Komunikacioni domet</b>	Do 250m	100m	Do 100m	Do 75m	Do 30m	Do 75m	Do 10m (nominalno ~2m)
<b>Topologija mreže</b>	Infrastrukturna	Adhoc – veoma mala mreža	Adhoc – veoma mala mreža	Adhoc, Peer to Peer, Zvezda, Mesh	Adhoc, Peer to Peer, Zvezda, Mesh	Adhoc, Peer to Peer, Zvezda	Unutrašnja WBAN:1/2-skok Zvezda Među WBAN: nestandardizovano
<b>Veličina topologije</b>	2007 uređaja za strukturiranu WiFi BSS	Do 8 uređaja za Pikomrežu	Do 8 uređaja za Pikomrežu	Do 65536 uređaja po mreži	Do 65536 uređaja po mreži	Do 65536 uređaja po mreži	Do 256 uređaja po telu i do 10WBAN
<b>Cilj primene</b>	Mreža podataka	Glasovni linkovi	Zdravstvo, fitness, javljači, bezbednost itd	Senzorska mreža, kućna automatizacija itd	Kratke distance I velike brzine podataka, lokalizacija itd	Medicinska telesna mreža kratkog dometa	Telocentrična primena
<b>Ciljna BAN arhitektura</b>	Van tela	Na telu	Na telu	Telo ka telu, Van tela	Telo ka telu	Na telu	Na telu

Tabela br. 7 Pregled radio standarda za BNTSM

FSO komunikacijski moduli razvojne ploče Arduino RF-NANO su standardni moduli koji se koriste u razvojne i istraživačke svrhe, a po potrebi i za serijsku primenu se mogu koristiti adekvatni i kvalitetniji senzori. Izgled blok dijagrama multimedijalnog senzorskog čvora sa FSO komunikacijskim kanalom predstavljen je na slici br. 22.



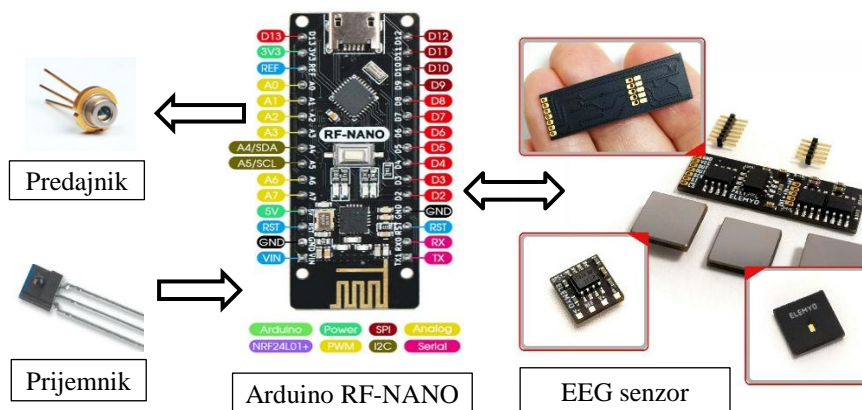
Slika br. 22 Multimedijalni senzorski čvor sa FSO komunikacijskim kanalom

FSO komunikacioni sistem se sastoji od tri osnovna podsistema: predajnika, kanala i prijemnika. Predajnik se sastoji od enkodera i modulatora koji pripremaju informacije koje se šalju na laserski/optički izvor svetlosti. Prenosni medijum između sabirnog sočiva predajnika i

prijemnika naziva se kanal. Kanal je deo atmosfere i predstavlja ograničavajući faktor u performansama FSO sistema. Cilj prijemnika je da prikupi preneseno optičko polje i obradi ga i rekonstruiše prenešene informacije. Tipičan optički prijemnik se sastoji od prednjeg prijemnog sočiva koje fokusira svetlost na optički detektor gde se optičko polje pretvara u elektronski signal.

**Senzorski čvor br. 1** (slika br. 23) se koristi za dobijanje EEG signala i model bi se sastojati od sledećih razvojnih hardverskih elemenata:

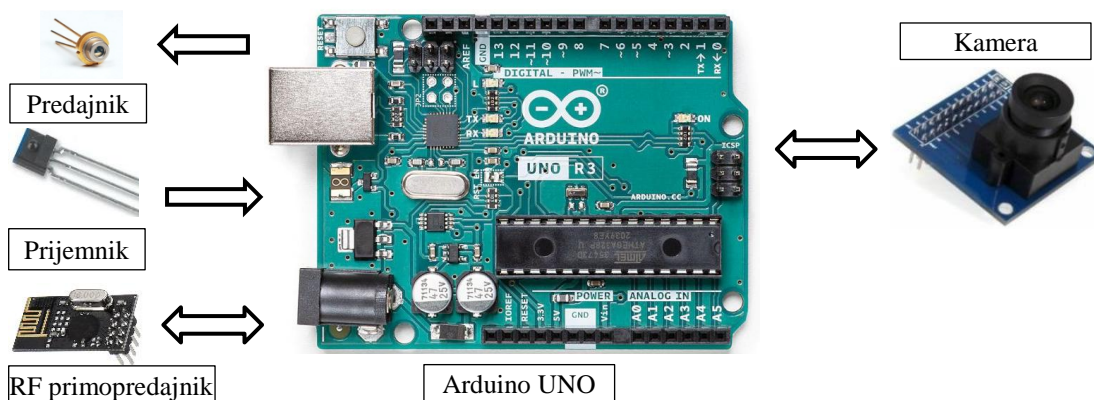
- Programabilna razvojna ploča Arduino NANO/RF-NANO (NRF24L01),
- EEG Brain Sensor ELEMIO BPM-kit v 1.1,
- Punjiva baterija.



Slika br. 23 Senzorski čvor br. 1 za merenje EEG signala

**Senzorski čvor br. 1-1** (slika br. 24), multimedijalni senzorski čvor koji se koristi za vizuelno nadgledanje okoline vojnika i model bi se sastojati od sledećih razvojnih hardverskih elemenata:

- Programabilna razvojna ploča Arduino UNO,
- Radio primopredajnik NRF24L01,
- SLED EXS210035-02,
- Fotodioda TSL250R
- Kamera OV7670,
- Punjiva baterija.

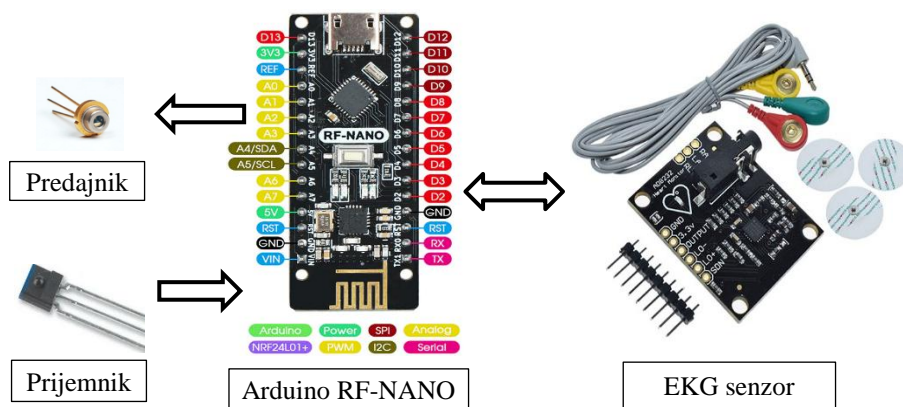


Slika br. 24 Multimedijalni senzorski čvor za monitoring okruženja

**Senzorski čvor br. 2 (slika br. 25)** se koristi za dobijanje EKG signala, i mogao bi se sastojati od sledećih razvojnih hardverskih elemenata:

- Programabilna razvojna ploča Arduino NANO/RF-NANO (NRF24L01),
- Srčani monitor AD8232,
- Punjiva baterija.

Hardver senzorskog čvora br. 2 je gotovo identičan, osim u delu gde se odnosi na srčani monitor. Monitor se sastoji od senzorske pločice koja se povezuje sa Arduino pločom, baterijom i tri elektrode koje se postavljaju na grudi.

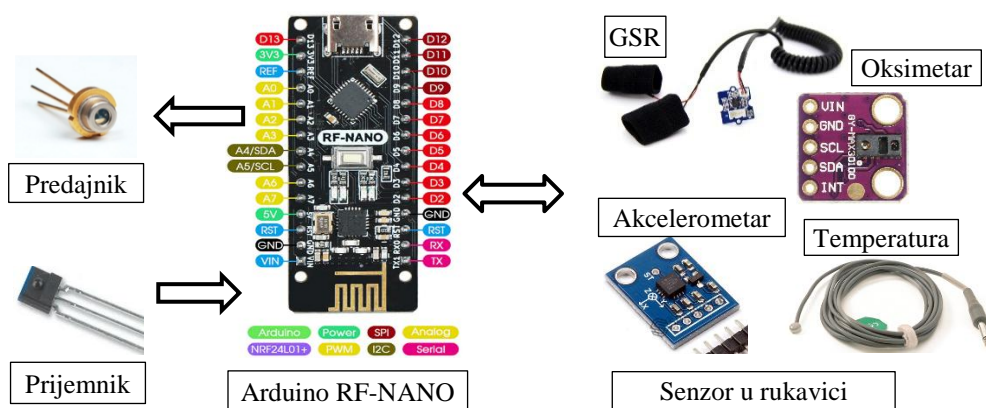


Slika br. 25 Senzorski čvor br. 2 za merenje EKG signala

**Senzorski čvor br. 3 (slika br. 26)** se koristi za dobijanje PPG, GSR, signala pokreta, meri zasićenost krvi kiseonikom ( $SpO_2$ ) i meri površinsku temperaturu tela i mogao bi se sastojati od sledećih razvojnih hardverskih elemenata:

- Programabilna razvojna ploča Arduino NANO/RF-NANO (NRF24L01),
- Pulsni oksimetar MAX30100 (PPG,  $SpO_2$ )
- Galvanska otpornost kože GSR modul,
- Temperaturni senzor,

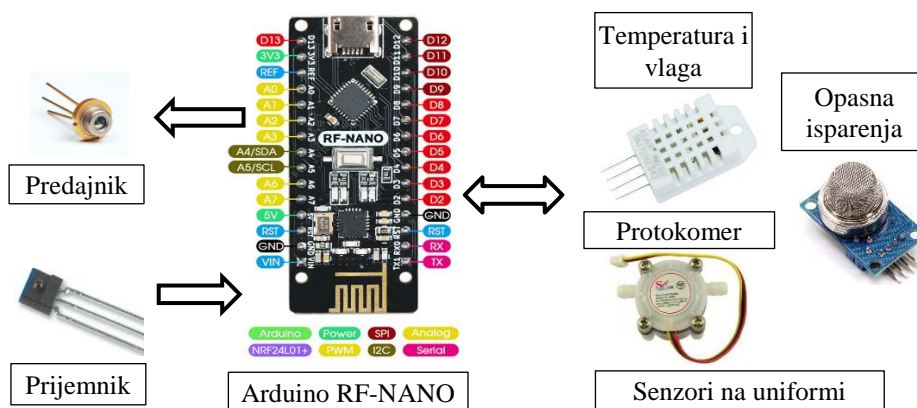
- Akcelerometar,
- Punjiva baterija.



Slika br. 26 Senzorski čvor br.3 u rukavici

**Senzorski čvor br. 4** se koristi da meri temperaturu i vlažnost spoljnog vazduha, zagađenost vazduha i količinu popijene vode iz čture/leđnog balona za vodu. Razmatrajući navedene zahteve predloženi čvor bi se mogao od sledećih razvojnih hardverskih elemenata (*slika br. 27*):

- Programabilna razvojna ploča Arduino NANO/RF-NANO (NRF24L01),
- Senzor temperature i vlage DHT22(AM2302)
- Senzor za merenje opasnih isparenja MQ-135 ,
- Protokomer YF-S401,
- Punjiva baterija.



Slika br. 27 Senzorski čvor br. 4 na uniformi

Ovakvim pregledom je predstavljen hardver modela BNTSM za monitoring fiziološkog stanja vojnika u uslovima obuke i operativnog angažmana u misijama.

#### 4.6 Propagacioni izazovi u telekomunikacionoj mreži BNTSM

Telekomunikaciona RF/FSO mreža BNTSM je transportni medijum koji treba da obezbedi da očitane vrednosti senzora stignu do prvog agregacionog čvora, a kasnije i do krajnjeg korisnika tih podataka. U radu ćemo se posebno osvrnuti na bežični optički prenos, njegov propagacioni model za različite medijume, kao i na smetnje izazvane atmosferskim prilikama koje bitno utiču na efikasan prenos signala. U literaturi se najviše razmatraju FSO komunikacioni sistemi koji se postavljaju na fiksnim i stabilnim platformama i zadnjim deonicama prenosnog puta. Eksperimentalni model u radu će obuhvatiti i deonice unutar samih čvorova uz ograničenje daljine između predajnika i prijemnika i njihove usmerenosti.

Postojeće bežične nosive senzorske tehnologije za praćenje fiziološkog stanja vojnika pate od veoma velikog broja smetnji tokom propagacije radio talasa uzrokovane mnogobrojnim faktorima bilo da su LOS ili NLOS putanje. Sa naučne tačke gledišta potrebno je pravilno izmeriti i garantovati verodostojnost vrednosti fizioloških procesa i pojava u organizmu do kojih se dođe sensorima na i u telu vojnika, u uslovima bez, sa delimičnom i potpunom opremom na telu. Posmatrajući standardne kriterijume za efikasnost komunikacionog linka BER (Bit Error Rate) i MSE (Mean Square Error) utvrdićemo da li se izmerene vrednosti fizioloških procesa na i u telu mogu uspešno preneti feding kanalom BNTSM. Kada govorimo o efikasnosti komunikacionih linkova uzimamo u obzir Bit rate i Quality of Service (QoS), pri čemu brzina prenosa zavisi od mnogih faktora, te načina primene, kao i tipa podataka koji se prenose. Pa tako možemo govoriti o brzinama manjim od 1 kbps (jednostavniji senzori) do 10 Mbps (prenos slike u realnom vremenu). Visok stepen kvaliteta usluge (QoS) naročito je bitan kada govorimo o primeni BNTSM u monitoringu lica u kritičnim situacijama (vojska, telemedicina), gde je apriori bitno garantovati odgovarajući nivo kvaliteta. U tom slučaju govorimo o metodama koje bitno treba da utiču na smanjenje greške i smetnje, kako bi se smanjio Bit Error Rate (BER). Kada govorimo o QoS tu je bitno smanjiti kašnjenje u prenosu, fluktuacije u prenosu i mogućnost brzog odgovora na hitna stanja. U tabeli br.8 dat je pregled određenih metričkih podataka za senzore koji se primenjuju u BNTSM.

Cilj istraživanja je utvrditi zavisnost prijemnog signala od efekata fedinga na telu vojnika i doći do efikasnog modela FSO mobilnog komunikacionog kanala između senzora i senzorskog čvorišta, u uslovima prisutnog fedinga u kanalu.

Primena	Brzina prenosa	Kašnjenje	BER
Primena leka	<16kbps	<250ms	<10 <sup>-10</sup>
Endoskopska kapsula	1 Mbps	<250ms	<10 <sup>-10</sup>
ECG	192kbps	<250ms	<10 <sup>-10</sup>
EEG	86.4kbps	<250ms	<10 <sup>-10</sup>
EMG	1.536Mbps	<250ms	<10 <sup>-10</sup>
Nivo glukoze	<1kbps	<250ms	<10 <sup>-10</sup>
Audio prenos	1Mbps	<20ms	<10 <sup>-5</sup>
Video prenos	<10Mbps	<100ms	<10 <sup>-3</sup>
Glas	50-100kbps	<100ms	<10 <sup>-3</sup>

Tabela br.8 Pregled brzine prenosa i QoS zahteva za nosive senzore [38]

#### 4.7 Snabdevanje energijom

Zbog energetske efikasnosti modela i ograničenog pristupa energiji, potrošnju unutar BNTSM na nivou pojedinca mora biti strogo ograničena i modelovana u skladu sa realnim uslovima, radi dobijanja validnih podataka. Način i veličina potrošnje zavisi od zahteva koliko često treba biti očitavano psihofizičko stanje vojnika u realnom vremenu ili pak u odloženim vremenskim periodima. Model mora obezbediti bezbednost i pouzdanost sistema i ne sme biti ugrožena neprilagođenom potrošnjom [8] [64] [69].



## 5. MODELOVANJE KANALA U TELESNOCENTRIČNOJ KOMUNIKACIJI BNTSM

Telesnocentrične komunikacije predstavljaju paradigmu u komunikaciji bežičnih nosivih telesnih senzorskih mreža. Mogućnost postavljanja velikog broja minijaturnih senzora na ili oko tela, čine ovaj sistem relativno kompleksnim, gde ljudsko telo predstavlja ključni faktor koji karakteriše komunikaciju u bežičnoj nosivoj telesnoj senzorskoj mreži.

Kada se govori o telesnocentričnoj komunikaciji onda se po definiciji ona odnosi na sve slučajeve gde se telekomunikacioni uređaj nalazi na ili oko ljudskog tela. Ovi uređaji su u stanju da prikupljaju fiziološke pojave tela ili njihove neposredne okoline, koje onda šalju do senzorskog čvorišta koje zatim koordinira dalji proces prosleđivanja podataka.

Razmatrajući bežičnu komunikaciju u BNTSM mora se uzeti u obzir više faktora, a koji su vezani za karakteristike ljudskog tela. Jedan od prvih faktora koji bitno utiču na prostiranje FSO signala i time na karakteristike prenosnog kanala tiču se oblika tela i mobilnosti nosioca BNTSM. Zbog takvog posmatranja situacije neophodno je govoriti i o mogućem dizajnu FSO modula za komunikaciju na telu i od tela [70]. Pored toga kada se govori o postavljanju BNTSM na tela vojnika, mora se uzeti u obzir način instalacije i upotrebe, jer će se to direktno odraziti na efikasnost, pouzdanost sistema. Da bi se ponudilo adekvatno rešenje potrebno je dobro poznavati sredinu prostiranja talasa i propagacionih fenomena na i oko ljudskog tela. S tim u vezi potrebno je izvršiti modeliranje FSO kanala zasnovanog na dinamičkim akvizicijama u realnom vremenu. Model koji bi se razmatrao mora da ponudi rešenje problema uzimajući u obzir više promenljivih koji utiču na njega: veličina ljudskog tela, konstrukcija primopredajnog FSO modula, uticaj okoline u kojoj se mreža nalazi, mobilnost pojedinca i raspored bežičnog senzorskog čvora na telu.

Velika brzina prenosa je stalni imperativ u razvoju bilo koje bežične mreža, jer se time postiže veća autonomnost, fleksibilnost i funkcionalnost. Neke od karakteristika FSO komunikacionih sistema je da im nije potrebna licenca za emitovanje u spektru koji se koristi za optičke komunikacione sisteme, velika količina prenešenih podataka velikom brzinom, znatno manja snaga i energija za prenos podataka, ne postoji curenje i preslušavanje kanala, veća bezbednost u slučaju presretanja, manja cena koštanja. Nedostaci FSO komunikacijskih sistema su: uticaj atmosferskih prilika na slabljenje signala, uticaj drugih izvora svetlosti na nivo signala, domet sistema ograničen na par kilometara.

Projektovanje velike mreže BNTSM, doneće veliku količinu podataka, koje konvencionalni sistemi radio komunikacija ne mogu podržati. Nužnost je dovela fokus istraživanja na širokopoljasne mreže, koje u odnosu na konvencionalne mreže mogu obezbediti velike brzine prenosa podataka. Posmatrajući hijerarhiski BNTSM i BSM u celini, polazeći od osnovnog člana mreže (senzorskog čvora) do krajnjeg člana (bazne stanice ili komandnog centra), vidimo da kada se hijerarhiski „penjemo“ raste i količina podataka koje je potrebno dostaviti na krajnju tačku. Upravo tu FSO komunikacioni sistem nalaze primenu, a naročito na višim hijerarhiskim nivoima. Atmosferski faktori su možda najozbiljniji nedostatak FSO, jer mogu ograničiti rad sistema ili uzrokovati izobličenja talasa nosioca koja su neuobičajena za RF sisteme. Glavni ograničavajući faktor performansi u FSO sistemima je feding izazvan atmosferskom turbulencijom (poznato i kao scintilacija), koja izaziva vremenske i prostorne fluktuacije laserskog zraka.

Uzimajući u obzir sve prednosti i nedostatke, a naročito nedostatke koji se tiču slabljenje izazvanih atmosferskim prilikama, pojave scintilacije koja utiče na povećanje BER, stabilnosti usmeravanja prijemnika i predajnika neophodno je izvršiti matematičko modelovanje signala u FSO komunikacijskom kanalu [71]. Gubici snage povezani sa zračenjem laserskog zraka u vidljivom i IC opsegu mogu biti uzrokovani apsorpcijom i rasejanjem sastavnih gasova i čestica atmosfere. Pored toga, optička turbulencija koja je rezultat malih temperaturnih varijacija u atmosferi dovodi do daljih gubitaka snage usled širenja radijusa tačke snopa iznad onih vrednosti koji nastaju zbog same difrakcije. Male greške usmeravanja mogu lako da dovedu do neprihvatljivih nivoa fedinga usled Gausovog opadanja u profilu srednjeg zračenja u kombinaciji sa velikom scintilacijom van ose.

Dosadašnja istraživanja po pitanju FSO komunikacijskih sistema su doveli do razvoja modela koji opisuju FSO komunikacijski kanal u prisustvu različitih atmosferskih smetnji. Neki od modela koje se proučavaju u FSO su Log-normal model turbulencije, K-model (Negative Exponential/Gamma model) [72], Gamma-Gamma model [73], Rajssov model, Gamma model, Malaga model distribucije [74], Double-Weibull model [75].

Cilj modelovanja FSO kanala je dati što realniji i detaljniji opis fenomena propagacije uz što veći izbor varijabilnosti koji se mogu pojaviti u kanalu, kako bi se mogla izvršiti kvalitetna statistička analiza što bi model učinilo opšte primenljivim. Kao što smo već rekli feding je jedna od smetnji koja se javlja u telekomunikacionom sistemu, pri čemu je ona i najdominantnija smetnja. Gausov šum je takav da se javlja kod svih sistema i na ulazu se sabira

sa primljenim signalom [76] [77] [78]. Sa njim se pojavljuju i ostale interferencije koje bežične digitalne komunikacione sisteme čine manje efikasnim. Ovakve smetnje direktno utiču na amplitudu prijemnog signala. Uzrok fedinga je okruženje u kojem se dešava propagacija talasa nailazeći na razne ambijentalne prepreke. Direktno promene na amplitudi korisnog signala na prijemu utiče i na BER, koji predstavlja jedan od ključnih parametara u digitalnim linkovima. Digitalni komunikacioni linkovi neizbežno rade sa određenim BER-om. Da bi prenos signala bio optimalan i osetljivost prijemnika adekvatna, potrebno je što preciznije odrediti prirodu i parametre fedinga u određenom propagacionom prostoru [79] [80]. Time se postiže da se na osnovu izbora položaja senzorskog čvora i konfiguracija njegovih primopredajnih modula dobija dobra predikcija uticaja smetnji čime se može izvršiti pravilno planiranje sistema. Geometrija propagacionog signala definiše nekoliko osnovnih fenomena prostiranja i to:

- Difrakcija (savijanje),
- transmisija,
- refleksija (odbijanje),
- refrakcija (prelamanje),
- rasejavanje (eng. scattering).

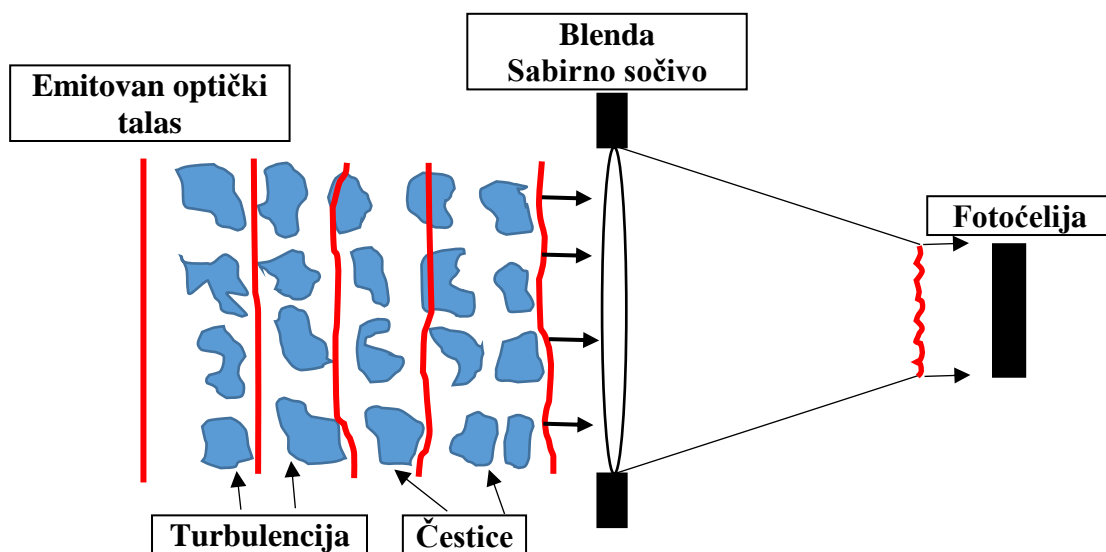
Upravo ovakav način prostiranja talasa po više puteva dovodi do pojave fedinga. **Difrakcija** predstavlja savijanje talasa oko prepreke čije su dimenzije značajno veće od od talasne dužine, kao posledica, iza prepreke, koja ima dimenzije veće od talasne dužine, dolazi do pojave sekundarnog zračenja zbog kojeg je moguća komunikacija između predajnika i prijemnika, čak i kada ne postoji linija optičke vidljivosti (LOS). **Transmisija** se javlja u slučajevima kada je prepreka na koju nailazi talas ili snop delimično transparentna za njegovu propagaciju. **Refleksija** se javlja kada radio talas ili snop naiđe na glatku površinu čije su dimenzije mnogo veće od njegove od njegove talasne dužine. **Refrakcija** talasa ili snopa nastupa prilikom prelaska iz jedne sredine u drugu usled čega dolazi do zakrivljenja u propagaciji talasa. **Apsorpcija** nastaje pri prolasku radio talasa ili snopa kroz neku materijalnu sredinu usled čega dolazi do slabljenja. **Rasejavanje** se javlja kada radio talas ili snop svetlosti prilikom prostiranja nailazi na veliki broj prepreka čije su dimenzije male ili uporedive sa talasnom dužinom talasa, zbog čega dolazi do rasipanja talasa u više pravaca. Zbog ovakve interakcije talasa i objekata u prostoru u kome se prostire talas, dolazi do stvaranja velikog broja kopija originalnog talasa na ulazu prijemnika različitih amplituda, faznog pomeraja i zakašnjenih u vremenu [76] [81]. Na ulazu u prijemnik se može pojaviti jedan ili više dominantnih signala i određen broj signala nastalih usled rasejanja. Prisustvo dominantne komponente signala koji ima veću amplitudu od

rasejanih komponenti signala je pojava kada postoji optička vidljivost između predajnika i prijemnika. Vremenski posmatrano ove kopije mogu stizati u različitim vremenskim periodima što dovodi do širenja prijemnog signala u vremenu. Ukoliko postoji mobilnost prijemnika ili predajnika tokom propagacije talasa snopa, signal na prijemu će imati amplitudu koja se menja u vremenu, zbog koje signal slabi ili se pojačava, a što zavisi od brzine kojom se kreće predajnik/prijemnik i frekvencije nosioca.

Kada je prepreka na koju naiđe svetlosni snop po svojim dimenzijama uporediva, onda dolazi do rasejanja snopa svetlosti i širenja prenosnog kanala. To su najčešće molekuli, vodena para, aerosol, prašina, kapljice kiše, magla, sneg i sl. Na takav način dolazi do pojave fedinga i ozbiljnog narušavanja kvaliteta signala, koji se manifestuje kroz povećanje verovatnoće greške BER. Pojava zbog kojeg dolazi do fluktuacija u primljenom optičkom kanalu, izazvane atmosferskim turbulencijama, naziva se scintilacija. Scintilacija je pojava bljeska svetlosti koja dolazi do sudara snopa zraka sa česticama na njegovom putu propagacije. Tom prilikom dolazi do vremenske i prostorne fluktuacije laserskog snopa koje se javljaju kao posledica varijacije u indeksu refrakcije, izazvane atmosferskim turbulencijama i koje se manifestuju kao fluktuacija iradijacije primljenog signala.. Ovu pojavu definišemo kao FSO feding ili scintilacija.

Zagrevanjem zemljine površine dolazi do akumulacije toplote koja se kasnije oslobađa u vazduh, sredinu kroz koju se kreće snop svetlosti, pri čemu dolazi do mešanja sa hladnijim vazduhom. Ovo mešanje toplog i hladnog vazduha izaziva da temperatura vazduha varira. To se dešava na različitim nadmorskim visinama i određenim vremenskim i godišnjim periodima. Kao što smo već napomenuli slabljenja u FSO su rezultat apsorpcije i rasejanja, prouzrokovane česticama u vazduhu (aerosol, molekularne čestice, padavine...) u zavisnosti od lokalnih vremenskih prilika. U zemaljskim FSO atmosferske turbulencije su izazvane atmosferskim pritiskom, vetrom, promenama u indeksu prelamanja usled temperaturne neujednačenosti vazduha na liniji prostiranja [82]. U takvim uslovima laserski snop se u turbulentnim sredinama sudara sa česticama i prelama usled nehomogenosti prenosnog puta što dovodi do slučajnih varijacija faze i amplitude signala, što dovodi do fedinga optičkog signala na prijemu i dalju degradaciju performansi optičkog komunikacionog sistema (slika br.28). Karakteristika optičkog kanala se opisuju i analiziraju njegovim impulsnim odzivom. Usled prostiranja optičkog snopa kroz turbulentnu sredinu, javljaju se gubici u snazi primljenog signala u odnosu na izračeni signal, a koji su direktna posledica optičkih gubitaka i disperzije. Zbog toga je za FSO komunikacione sisteme bitan faktor vidljivosti, koji je u direktnoj vezi sa količinom aerosola i raznih čestica u atmosferi, a koji za posledicu imaju slabljenje i rasejanje optičkog

snopa [83]. U slučajevima kada postoji refleksija glavnog snopa, onda dolazi do modulacije detektovanog signala [84]. Uticaoj na propagaciju optičkog snopa mogu da izazovu i slučajne fluktuacije svetlosti (sunca ili zvezda) izazivajući tako promene u fazi optičkog snopa [83].



Slika br. 28 Izgled turbulentnog FSO kanala sa sistemom za detekciju

U zemaljski FSO komunikacioni sistemima optička snaga na prijemniku  $P_r$  je povezana sa optičkom snagom na predajniku  $P_t$  izrazom:

$$P_r = P_t e^{-\tau_{od}} \quad 5.1$$

Gde je  $\tau$  – optička dubina. Udeo snage u optičkom linku je definisan kao provodljivost i dat je izrazom:

$$T = \frac{P_r}{P_t} = e^{-\tau_{od}} \quad 5.2$$

Optička dubina i optička atmosferska transmitansa se odnose na atmosferske koeficijente prigušenja i na dužinu prenosne putanje  $L$  po Ber-Lambert zakonu [85]:

$$T(\lambda, L) = \frac{P_r}{P_t} = e^{(-\gamma_t(\lambda)L)} \quad 5.3$$

gde  $\gamma_t(\lambda)$  – predstavlja koeficijent ukupnog slabljenja (prigušenja),  $T(\lambda, L)$  predstavlja provodljivost atmosfere na talasnoj dužini  $\lambda$ .

Uopšteni izraz za koeficijent atmosferskog slabljenja je:

$$\gamma_t(\lambda) = \alpha_{ml}(\lambda) + \alpha_{al}(\lambda) + \beta_{ml}(\lambda) + \beta_{al}(\lambda) \quad 5.4$$

gde je  $\alpha_{ml}$  – koeficijent molekularne apsorpcije,  $\alpha_{al}$  – koeficijent aerosolne apsorpcije,  $\beta_{ml}$  - koeficijent molekularnog rasejanja,  $\beta_{al}$  - koeficijent aerosolnog rasejanja.

Uobičajeno je da se izabere takva talasna dužina svetlosti koja će gasnu apsorpciju i molekularno rasejanje da učini zanemarljivim [86]. Za talasne dužine koje su između vidljivog dela spektra i 1.5  $\mu\text{m}$ , molekularna apsorpcija, aerosolna apsorpcija, i molekularno rasejanje, su vrlo mali u poređenju sa aerosol rasejanjem pa se atmosfersko slabljenje može odrediti preko sledećeg obrasca:

$$\gamma_t(\lambda) = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550\text{nm}} \right)^q \quad 5.5$$

gde su: V - vidljivost (km),  $\lambda$  - talasna dužina (nm), q - koeficijent koji zavisi od vidljivosti. Teorijsko poređenje atmosferskog slabljenja u zavisnosti od vidljivosti V, za talasne dužine od 850 nm i 1550 nm koje su izvedene preko formula 5.4 i 5.5. Može se zaključiti da za veće talasne dužine imamo manje slabljenje, tj. bolji kvalitet prenosa. Uzroci apsorpcije leže u interakciji fotona u laserskom snopu sa molekulima u atmosferi duž prenosnog puta [87]. Za atmosferu možemo da kažemo da je u jednom svom delu homogena ili nehomogena u zavisnosti od temperature ili koncentracije aerosola, što dovodi do toga da apsorpcija ili rasejanje bude selektivno na delu prenosnog puta. Delovi prenosnog puta koji imaju minimalni nivo apsorpcije ili rasejanja ponašaju se kao transparentne zone talasnih dužina i nazivamo ih prenosni prozori (eng. Transmission Windows) [83].

Kada govorimo o turbulencijama u FSO komunikacijskom kanalu posmatramo atmosferske pojave (temperaturu, pritisak i vetar) koje direktno utiču na pomeranje faze propagacije optičkog signala, što dovodi do poremećaja u samom optičkom signalu na blendi. Ovi poremećaji optičkog talasa se još nazivaju i optičke aberacije. Promene u atmosferi mogu dovesti i do promene refrakcionog indeksa, koji prouzrokuju varijacije u intenzitetu snopa svetlosti. Ovi efekti su poznati kao virovi i kao takvi mogu dovesti do zakrivljenja optičkog snopa. Izraz za refrakcioni indeks je:

$$n - 1 \approx 79 \times \frac{P}{T} \quad 5.6$$

Gde je:

P - atmosferski pritisak u (mbar),

T - temperatura u (K).

Jačinu turbulencije određuje parameter strukturnog indeksa prelamanja  $C_n^2$ , koji zavisi od nadmorske visine, geografske lokacije i doba dana. Model koji se opisuje refrakcioni indeks zove se Hufnagel-Valley model [88] [89]:

$$C_n^2 = 0.00594 \left(\frac{v}{27}\right)^2 (10^{-5}h)^{10} e^{-\frac{h}{1000}} + 2.7 \times 10^{-16} e^{-\frac{h}{1500}} + A_0 e^{-\frac{h}{100}} \left[m^{-\frac{2}{3}}\right] \quad 5.7$$

Gde je :

v- brzina vetra na najvišoj nadmorskoj visini u m/s,

h – nadmorska visina u m,

$A_0$  – jačina turbulencije u nivou zemlje ( $A_0=1.7 \times 10^{-14}$  m/s).

Turbulencija u FSO komunikacionim sistemima dovodi do sledećih posledica: scintilacije, odstupanja snopa i širenja snopa. Kada govorimo o FSO komunikacijama u „last mile“ konekciji, koja je duž horizontalne putanje refrakcioni indeks se može uzeti kao konstanta. U zemaljskim FSO refrakcioni indeks može biti reda veličine  $10^{-17}(m^{-\frac{2}{3}})$  (za slabu turbulenciju),  $10^{-15}(m^{-\frac{2}{3}})$  (za umerenu turbulenciju) i  $10^{-13}(m^{-\frac{2}{3}})$  (za jaku turbulenciju) [90].

Uticaoj koji atmosfenske turbulencije vrše na laserski snop ogledaju se u gubitku prostorne i vremenske koherentnosti koja je karakteristična za laser. To dovodi do fluktuacije signala u optičkom detektoru [91], [92], [93], [94], [95] (referenca), izazvane ovim scintilacijama. Utvrđeno je da one mogu trajati od 1 do 10ms i da izazovu gubitak u prenosu i do nekoliko Gbit/s [84], [95]. Ove scintilacije izazivaju povećanje BER, bez obzira na dužinu propagacionog puta. Intenzitet scintilacije se opisuje scintilacionim indeksom  $\sigma_i^2$ :

$$\sigma_i^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1 \quad 5.8$$

gde I predstavlja trenutno zračenje optičkog signala, a  $\langle I \rangle$  označava prosečnu iradijaciju optičkog signala, kada imamo slabe turbulencije scintilacioni indeks se izražava kao:

$$\sigma_i^2 = \exp \left[ \frac{0,49\sigma_R^2}{(1+0,65d^2+1,11\sigma_R^{12/5})} + \frac{0,51\sigma_R^2(1+0,69\sigma_R^{12/5})^{-5/6}}{1+0,90d^2+0,62d^2\sigma^{-12/5}} \right] - 1 \quad 5.9$$

gde se Rytov promenljiva prostiranja talasa izražava kao:

$$\sigma_R^2 = 1,23C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}} \quad 5.10$$

gde je:

- $C_n^2$  predstavlja indeks refrakcije,
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  - talasni broj izražen u m,

- $d = \sqrt{kD_{RX}^2/4l}$  – normalizovani objektiv prijemnika.

## 5.1 Matematički modeli atmosferskih turbulencija

Za FSO komunikacioni sistem najbitniji uslov je da postoji optička vidljivost između predajnika i prijemnika, međutim efikasna komunikacija je uslovljena atmosferskim prilikama i njenim pojavama, kao slučajnim procesom, koje degradaciono utiču na propagaciju snopa, usled čega dolazi do slučajnih promena u amplitudi i fazi primljenog signala na prijemniku, a koji nazivamo fedingom. U cilju opisivanja propagacije i propagacionog prenosnog puta koriste se matematički modeli. Feding koji se javlja u optičkom kanalu FSO komunikacionog sistema može se modelovati sa nekoliko raspodela. Neke od njih su pominjane, a među najzastupljenijim raspodelama koji se koriste za opisivanje i modelovanje FSO komunikacionih sistema u prisustvu fedinga su: Log-Normal, Rice, Nakagami-m, Gamma-Gamma, Negativna eksponencijalna raspodela i M (Malaga) raspodela. Za sve ove modele se pokazalo da adekvatno opisuju i odgovaraju rezultatima dobijenih merenjem u uslovima velikog broja i vrsta turbulencije, istovremenih i nezavisnih velikih i malih turbulentnih vrtložnih efekata. Model Log-Normal raspodele odlično odgovara simuliranim i eksperimentalno dobijenim podacima [96]. Međutim, PDF i CDF Lognormal-Rice modela su aproksimirani, pošto se njihovi oblici ne mogu analitički pratiti u zatvorenim oblicima. Rajsov (eng. Rice) model može efikasno modelirati turbulentne vrtložne efekte u širokom spektru uslova [97].

### 5.1.1 Log-Normalna raspodela

Log-Normalna raspodela se uglavnom koristi za modelovanje FSO komunikacionog kanala gde je feding povezan sa uslovima slabe atmosferske turbulencije. U opisu matematičkog modela karakteristična je Ritova varijansa  $\sigma_i^2$  gde se njene vrednosti definišu kao  $\sigma_i^2 < 1.2$  gde se na taj način definiše i granica važenja Log-normalnog modela [91]. Ritova varijansa se izračunava kao:

$$\sigma_i^2 = 1,23C_n^2 k^{\frac{7}{6}} L^{\frac{11}{6}} \quad 5.11$$

gde je L – distanca propagacije, a k – optički talasni broj.

Log-normal model raspodele pretpostavlja da će logaritam intenziteta  $I$  laserske svetlosti koja prolazi kroz atmosferu biti normalno raspodeljen kada je srednja vrednost  $-\frac{\sigma_i^2}{2}$ . Funkcija gustine raspodele verovatnoće PDF primljene iradijacije je data izrazom:



$$f(I) = \frac{1}{I\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left\{-\frac{\left(\ln(I) + \frac{\sigma_i^2}{2}\right)^2}{2\sigma_i^2}\right\}, \text{ za } I \geq 0, \quad 5.12$$

Gde je  $I$  – iradijacija na prijemniku, a  $\sigma_i^2$  – scintilacioni indeks.

### 5.1.2 Rajsova raspodela

Feding u FSO komunikacionom kanalu može se pojaviti u kratkotrajnom vremenskom intervalu ili pak biti konstatno prisutan, pri čemu dolazi do pojave više replika istog signala i interferencije usled takvog višestrukog prostiranja originalnog snopa. Modelovanje komunikacionog kanala ima dva slučaja u odnosu na to da li postoji prisustvo dominantne komponente optičkog signala ili ne. Pa tako govorimo o Rajlijevom (eng. Rayleigh) ili Rajsovom modelu raspodele. Kada govorimo o FSO komunikacionom sistemu, osnovna pretpostavka je da postoji optička vidljivost između predajnika i prijemnika, pri čemu je komponenta optičkog signala koja se prostire linijom LOS daleko dominantnija od komponente signal koja se usled scintilacija dolazi na prijemnik. Tada se primenjuje Rajsov model fedinga, pri čemu se uvodi faktor  $K$  kojim se definiše odnos dominantnog optičkog snopa u odnosu na snagu rasejanog snopa. Ovim modelom se najčešće opisuju zemaljski komunikacioni linkovi u slabo naseljenim mestima, gde je verovatnoća za postojanje LOS između komunikacionih uređaja veća, kao i za opisivanje satelistkih linkova.

Funkcija gustine verovatnoće Rajsovog fedinga izražena je izrazom:

$$f_{\alpha}(\alpha) = \frac{2\alpha(1+K)}{\alpha^2} e^{-K-(1+K)\alpha^2\sqrt{\alpha^2}} I_0\left(2\alpha\sqrt{\frac{K(1+K)}{\alpha^2}}\right) \quad 5.13$$

gde  $I_0$  predstavlja Bessel-ovu funkciju prvog reda [98], a parameter  $K$  predstavlja odnos snage koherentne i nekoherentne komponente [99] koji se izražava kao:

$$K = \left[ \frac{\overline{\alpha^2}}{\sqrt{\overline{\alpha_r^4} + 2\overline{\alpha_r^2}(\sigma_i^2 - \sigma_r^2) - (\sigma_i^2 - \sigma_r^2)^2}} - 1 \right] \quad 5.14$$

gde je:

$$\overline{\alpha^2} = \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \overline{\alpha_r^2} \quad 5.15$$

$$\overline{\alpha_r^2} = e^{\left(-\frac{\sigma_\chi^2 + \sigma_\phi^2}{2}\right)} \quad 5.16$$

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{2G} (1 + e^{-2\sigma_\phi^2} - 2e^{-2\sigma_\chi^2 - 2\sigma_\phi^2}) \quad 5.17$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{2G} (1 - e^{-2\sigma_\phi^2}) \quad 5.18$$

gde  $\sigma_\chi^2$  predstavlja Log-amplitudnu varijansu [100] koja je data izrazom:

$$\sigma_\chi^2 = 0,307k^{\frac{7}{6}}L^{\frac{11}{6}}C_n^2 \quad 5.19$$

### 5.1.3 Nakagami- $m$ raspodela

Nakagami- $m$  raspodela objedinjuje Rajlijev i Rajsov model raspodele i jedan je opšti model za opisivanje statističkih karakteristika signala na prijemu koje se dešavaju usled različitih putanja prostiranja signala. Nakagami- $m$  model je lak za manipulaciju i širokog je opsega primenljivosti i za razliku od predhodnih modela ovaj model je empirijski, veoma prijemčiv za primenu i u praksi se dokazao korisnim. Nakagami- $m$  model ima sledeću gustinu raspodele (PDF):

$$f(I) = \frac{1}{2\sigma_s^2} \exp\left(-\frac{I+A_0^2}{2\sigma_s^2}\right) I_0\left(\frac{A_0\sqrt{I}}{\sigma_s^2}\right) \quad 5.20$$

gde  $\sigma_s^2$  predstavlja varijansu, a  $A_0$  konstantu.

### 5.1.4 Gamma-Gamma raspodela

U slučajevima modelovanja FSO optičkog kanala Gamma-Gamma raspodela je jedan od najčešće korišćenih modela za opisivanje optičkih komunikacija. Gama-Gamma model se bazira na teoriji dvostruke stohastičke scintilacije i razmatra fluktuacije zračenja kao proizvod malih i velikih fluktuacija. Funkcija gustine verovatnoće Gamma-gamma modela turbulencije se zasniva na pretpostavci stohastičkih procesa rasejanja i prelamanja [74] čiji izraz ima sledeći oblik:

$$f(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{(\alpha-\beta)}(2\sqrt{\alpha\beta I}), \quad I \geq 0 \quad 5.21$$

gde je:  $I$ -intenzitet signala,  $\Gamma(\dots)$ -Gamma funkcija,  $K_{(\alpha-\beta)}$ -modifikovana Bessel-ova funkcija drugog reda. Parametri  $\alpha$  i  $\beta$  su PDF parametri koji opisuju scintilaciju optičkog talasa, tj. njegove fluktuacije, dok je PDF zavistan od atmosferskih uslova putem ovih parametarai to:

$$\alpha = \frac{1}{\frac{0,49\sigma_R^2}{e^{(1+1,1\sigma_R^{12/5})^{7/6}}-1}} \quad 5.22$$

$$\beta = \frac{1}{\frac{0,49\sigma_R^2}{e^{(1+0,69\sigma_R^{12/5})^{5/6}}-1}} \quad 5.23$$

$$\sigma_R^2 = 1,23C_n^2k^{7/6}L^{11/6} \quad 5.24$$

gde je:

- $C_n^2 = \text{const.}$  refrakcioni indeks za horizontalnu putanju optičkog talasa,
- $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – talasni broj izražen u m,
- $L$  – propagaciona distance u m.

Funkcija gustine verovatnoće Gamma-Gamma modela je primenljiva za veliki broj režima od slabe do jake turbulencije.

### 5.1.5 *Negativna eksponencijalna raspodela*

Atmosferska turbulencija rezultira scintilacijom, lutanjem snopa i širenjem snopa svetlosti. Scintilacija za male fluktuacije prati Log-normal-nu raspodelu, dok za veće fluktuacije raspodela ima tendenciju da bude negativna eksponencijalna. Lutanje snopa je rezultat turbulentnih vrtloga koji postaju veći od veličine snopa i zbog čega snop skreće sa pravca prostiranja. Atmosferske turbulencije izazvane fedingom modelovane su različitim distribucijama na osnovu nivoa turbulencije. Model Negativne eksponencijalne raspodele opisuje polje rasejanja koje je rezultat velikog broja nedominantnih rasejača, gde svaki rasejač doprinosi nasumičnoj optičkoj fazi na detektoru. Ovaj model je primenljiv u režimu zasićenja [88]. Kada je dužina linka velika broj rasejanja se uvećava, a time i fluktuacija amplitude, koja prati Rejljevnu raspodelu uz negativnu statistiku za zračenje, pri čemu je PDF modelovana kao:

$$f(I) = \frac{1}{I_0} e^{\left(-\frac{I}{I_0}\right)}, I \geq 0 \quad 5.25$$

### 5.1.6 *M (Malaga) raspodela*

Malaga model je opšti model atmosferskih turbulencija i može se svesti na druge modele turbulencija kao što su K model turbulencije, Gama i Gama-Gamma modeli turbulencije, H-K model turbulencije, Eksponencijalni-Weibull-ovi modeli turbulencije i dr. Ovaj model predstavlja opšti model distribucije kojim se može opisati veliki broj slučajeva FSO komunikacionih kanala. On predstavlja jedan generalizovan model, na osnovu kojih se izvode ostali modeli. Razvoj ove metode je dobijen na osnovu Ritove metode raspodele [101] [102] koja opisuje komunikacioni kanal u uslovima slabih fluktuacija i LL metoda raspodele koja je opšti model [103]. Karakteristično za oba ova modela je da opisuju fluktuacije optičke iradijacije u turbulentnoj atmosferi u svim uslovima iradijacije. Ritov metod daje izraz zatvorenog oblika za fluktuacije intenziteta ravnog talasa u uslovima slabe turbulencije za tačkasti prijemnik. Ritova metoda predviđa da se varijansa signala usled turbulencije može povećati bez ograničenja u uslovima jačih turbulencija [104] [105]. Predajnik modulira podatke o trenutnom intenzitetu optičkog zraka. Intenzitet dobijene fotostruje primljenog signala u

detektoru prijemnika direktno je povezan sa optičkom snagom snopa svetlosti pristiglog na blendu fotodetektora [106]. LL model predstavlja generički model koji u sebi uključuje dve raspodele, Log-normalnu raspodelu koja se može primeniti kod slabih turbulencija i Log-normalnu modulisanu eksponencijalnu raspodelu koja se koristi u jakim turbulencijama i koja se može svesti na negativnu eksponencijalnu raspodelu u ekstremno jakim atmosferskim turbulencijama [107]. Istraživači su kombinujući ove dve metode predložili metodu koja je univerzalnija, objedinjava više mogućih slučajeva, formalizujući kroz jednu raspodelu formalnijeg oblika. Upravo to je M-model raspodele čija PDF izražava kao:

$$f(I) = A \sum_{k=1}^{\beta} a_k I^{\frac{\alpha+k}{2}-1} K_{\alpha-k} \left( 2 \sqrt{\frac{\alpha\beta I}{\gamma\beta+\Omega}} \right) \quad 5.26$$

gde  $K_a$  predstavlja Besselo-ovu funkciju druge vrste "a" reda, a

$$A \triangleq \frac{2\alpha^{\frac{\alpha}{2}}}{\gamma^{1+\frac{\alpha}{2}}\Gamma(\alpha)} \left( \frac{\gamma\beta}{\gamma\beta+\Omega} \right)^{\beta+\frac{\alpha}{2}} \quad 5.27$$

$$a_k \triangleq \binom{\beta-1}{k-1} \frac{(\gamma\beta+\Omega)^{1-\frac{k}{2}}}{\Gamma(k)} \left( \frac{\Omega}{\gamma} \right)^{k-1} \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)^{\frac{k}{2}} \quad 5.28$$

Gde  $\binom{\beta}{k}$  predstavlja binominalni koeficijent,  $\Gamma(*)$  predstavlja Gamma funkciju, parametri  $\alpha$  i  $\beta$  predstavljaju efektivni broj ćelija malih i velikih razmera, respektivno, i mogu se povezati sa atmosferskim uslovima.

## 6. DIGITALNA SLIKA I TEHNIKE OZNAČAVANJA VODENIM ŽIGOM

Digitalna slika se može lako širiti putem komunikacionih kanala zbog brzog razvoja računarskih mreža, telekomunikacionih i multimedijalnih sistema. Digitalna slika je slika sastavljena od elemenata poznatih kao pikseli, od kojih svaki ima konačne, diskretne veličine numeričke reprezentacije za svoj intenzitet ili nivo sive boje, koje su predstava njenih dvodimenzionalnih funkcija čiji su izvor njene prostorne koordinate označenih sa  $x$ ,  $y$  na  $x$ -osi i  $z$ -osi. Dakle, digitalna slika je dvodimenzionalni niz vrijednosti piksela. Sa pikselizacijom slike povezan je pojam prostorne rezolucije slike. Prostorna rezolucija slike je broj piksela u digitalnoj slici i kada se govori o rezoluciji slike obično se misli na prostornu rezoluciju. Viša rezolucija uvijek znači bolji kvalitet slike. U zavisnosti od toga da li je rezolucija slike fiksna, može biti vektorskog ili rasterskog tipa. Sam po sebi, termin "digitalna slika" obično se odnosi na rasterske slike ili bitmapirane slike (za razliku od vektorskih slika). Digitalna slika može nastati renderovanjem vektorske grafike ili digitalizacijom analogne slike. Digitalizacija obuhvata: odmeravanje (merenje svetline na mestu piksela) i kvantizacija (dodeljivanje diskretnih vrednosti izmerenim nivoima svetline). U procesu pikselizacije meri se vrednost svetline na mestu svakog piksela određenim rasterom, a izmerene vrednosti se čuvaju. Kada se za reprezentaciju piksela koristi samo 1 bit, govorimo o binarnim monohromatskim slikama. Svaki piksel može da ima vrednost 0 ili 1 pa je na ovaj način moguće predstaviti samo dve boje ili dva nivoa svetline. Broj bita potrebnih za čuvanje binarne slike jednak je broju piksela slike, odnosno, proizvodu njene širine i visine u pikselima. Digitalna slika ima konačan broj piksela  $I$  predstavljena je matricom. Položaj određene tačke u slici određen je indeksima matrice, dok nivo sivog (ako se radi o monohromatskoj slici) predstavlja vrednost tog elementa matrice. Za kvantizaciju vrednosti svetline na poziciji određenog piksela najčešće se koristi 8 bita. Na ovaj način je moguće predstaviti  $2^8 = 256$  nivoa intenziteta piksela. Ukoliko je 16 bitna, onda govorimo o 65536 intenziteta piksela, tj. nijansi sivog. Slike u boji je moguće predstaviti na dva načina, kao bitmapirane i kao indeksirane slike. Bitmapirane slike za reprezentaciju svakog piksela koriste tri bajta, odnosno,  $3 \times 8 = 24$  bita. Na ovaj način je moguće predstaviti  $256^3 = 16.777.216$  boja. Ove slike su u literaturi kao truecolor slike. Sama slika se memoriše korištenjem tri matrice od kojih svaka sadrži vrijednosti intenziteta piksela za jednu komponentu. Alternativno, moguće je koristiti i trodimenzionalni niz, pri čemu dvije dimenzije odgovaraju prostornim koordinatama, a treća kolor-komponentama. Slika dimenzija  $640 \times 480$  piksela sada zauzima  $640 \times 480 \times 3$  bajtova = 900 kB.

Da bi se digitalne informacije zaštitile od nezakonitog posedovanja, umnožavanja, manipulacije, upotrebe i distribucije tokom prenosa komunikacionim sistemom potrebno je izvršiti njihovu zaštitu, kako bi se sačuvala bezbednost podatka. Vodeni žig digitalne slike je jednostavno digitalni vodeni žig slike, koji pruža alternativno rešenje za obezbeđivanje otpornosti na neovlašćeno korišćenje, i jačanje bezbednosti multimedijalnih dokumenata. Bilo koji digitalni sadržaj, kao što su slike, audio i video zapisi, može sakriti podatke. Označavanje digitalne slike vodenim žigom je tehnika u kojoj se podaci o vodenom žigu ugrađuju u multimedijalni sadržaj i kasnije se izdvajaju iz sadržaja sa vodenim žigom ili detektuju u njemu. Ove metode obezbeđuju otpornost na neovlašćeno korišćenje, autentifikaciju, sadržaj verifikacija i integracija slike [108]. Karakteristično je za tako izmenjene digitalne multimedijalne sadržaje da vodeni žig nije lako eliminisati prostim pretvaranjem u druge formate. Digitalna slika zadržava ubačeni vodeni žig čak i posle D/A konverzije, kompresije, promene formata fajla, šifrovanja ili dešifrovanja. Ugrađivanje digitalnog vodenog žiga u sliku se može vršiti u frekventnom i prostornom domenu. Tehnike ubacivanja digitalnog vodenog žiga u digitalnu sliku obezbeđuje autentičnost i zaštitu od neautorizovanog menjanja iste. Neke od osnovnih karakteristika digitalnih vodenih žigova su:

- a) **Neprimetnost** – se obezbeđuje nevidljivošću i vernošću. Slika sa vodenim žigom mora izgledati isto kao i originalna slika, uprkos manjoj degradaciji osvetljenosti ili kontrast slike. Dakle, kvalitet slike ne sme biti narušen.
- b) **Robustnost** - je karakteristika da se vodeni žig može detektovati nakon primene nekih uobičajenih operacija manipulacije obrade signala u komunikacionim sistemima. Ove operacije uključuju prostorno filtriranje, mapiranje boja, kompresiju sa gubicima, skaliranje, prevođenje i rotaciju. Oni takođe uključuju druge operacije, kao što su A/D i D/A konverzija, poboljšanje slike, sečenje i sl [109]. Važno je napomenuti da nemaju svi algoritmi za utiskivanje žiga u digitalnu sliku isti stepen robusnosti, pa tako i nivo zaštite [110].
- c) **Bezbednost** – podrazumeva upotrebu samo onih algoritama za utiskivanje digitalnog vodenog žiga u sliku koji može obezbediti zaštitu, autentičnost praćenje digitalnog sadržaja.
- d) **Kapacitet – ili nosivost** je karakteristika vodenog žiga na osnovu koje se procenjuje koliko informacija može da se ubaci u sliku domaćina, na osnovu veličine originalnih podataka. Kapacitet je definisan brojem bitova koje nosi svaka slika domaćin nakon umetanja slike vodenog žiga. Drugim rečima, kapacitet određuje ograničenja informacija o vodenom žigu dok zadovoljava robusnost i neprimetnost vodenog žiga [111]. S druge strane, ekstrakcija vodenog žiga je uspešna samo kada

je kapacitet kanala veći od broja bitova koji su ugrađeni u sliku domaćina [112]. Kada se više podataka o vodenom žigu ubaci u sliku domaćina, vidljivo je više izobličenja.

- e) **Cena izračunavanja** - za ugrađivanje vodenog žiga u sliku domaćina i izdvajanje vodenog žiga iz slike sa vodenim žigom treba da budu minimalni. Ova cena uključuje dva glavna pitanja — ukupno vreme potrebno za ugradnju i izdvajanje vodenog žiga i ukupan broj ugrađivača i detektora uključenih u tehniku vodenog žiga. Mora se održati dobar kompromis između robusnosti i složenosti računara.
- f) **Lažno pozitivna detekcija** - Stopa lažnih pozitivnih rezultata je karakteristika koja se koristi za identifikaciju vodenih žigova na slici na kojoj nema slike vodenog žiga. Ovaj problem se javlja kada se ugrađeni vodeni žig razlikuje od ekstrahovanog vodenog žiga [113].
- g) **Ključ vodenog žiga** - Ključ vodenog žiga je tajni ključ koji određuje određene parametre funkcije za ugrađivanje. Ovaj ključ uključuje podskup koeficijenata slike, pravac ugrađivanja i/ili domen ugrađivanja. Procena i mapiranje ključa vodenog žiga su važni, jer određuju stepen bezbednosti sistema vodenog žiga i zavise od određenih parametara, kao što su ugrađena poruka i slika sa vodenim žigom [114]. Zbog toga je za proces ugrađivanja i ekstrakcije potreban tajni ključ kako bi se osigurala sigurnost. Tajni ključ uključuje privatni ključ, ključ za otkrivanje i javni ključ.
- h) **Otpornost na neovlašćeno korišćenje** - detekcija neovlašćenog pristupa u sistemu vodenih žigova može se koristiti za proveru autentičnosti. Svaka promena podataka o vodenom žigu dovodi do neovlašćenog menjanja slike. Stoga, testiranjem integriteta, sistem utvrđuje da li su se podacima o vodenom žigu neovlašćeno pristupalo ili menjalo [115].
- i) **Reverzibilnost** - obezbeđuje ekstrakciju vodenog žiga i tačnu rekonstrukciju slike domaćina. U metodi reverzibilnog digitalnog vodenog žiga, sistem uzima originalnu sliku i dobija sliku sa vodenim žigom. Zatim, uz pomoć algoritma za ekstrakciju, sistem oporavlja originalnu sliku i sliku vodenog žiga koristeći tajni ključ.
- j) **Simultane tehnike koje ispunjavaju zahteve** – nemoguće je istovremeno zadovoljiti neprimetnost, robusnost i kapacitet zbog njihovih konfliktnih i ograničenih karakteristika. Za bilo koji sistem vodenog žiga, neprimetnost se može smanjiti povećanjem svojstva robusnosti i kapaciteta, i obrnuto [116]. S druge strane, robusnost se može smanjiti povećanjem nosivosti. Stoga se mora održati dobar kompromis između ovih vrsta zahteva.

## **6.1 Metode za insertovanje i ekstrakciju digitalnog žiga**

Vodeni žig digitalne slike privukao je pažnju istraživača zbog svoje dostupnosti. Tehnike digitalnog žiga štite digitalni sadržaj od neovlašćenog pristupa i manipulacije. Ove tehnike su potrebne za različite aplikacije, kao što su autentifikacija, potvrda operatera, materijalna sigurnost i zaštita žiga. Tehnike digitalne slike vodenog žiga se mogu klasifikovati na osnovu radnog domena, vrsta dokumenata, prirode algoritma, ljudske percepcije i tipa aplikacije. Sve tehnike insertovanja vodenog žiga u digitalnu sliku zavise od tipa radnog domena (tj. prostorni, frekvencijski ili hibridni domen), vrste dokumenata (tj. tekst, slika, audio ili video), prirode korišćenog algoritma (tj. sekvencijalni ili paralelno), ljudske percepcije (tj. vidljiva ili nevidljiva) i tip aplikacije (tj. zasnovana na izvoru ili destinaciji). Ovo poglavlje analizira različite metode digitalnog označavanja vodenim žigovima, zasnovane na radnom domenu, sumirajući neke nedavne rezultate istraživanja u ovoj oblasti.

## **6.2 Tehnike vodenog žiga u prostornom domenu**

Ove tehnike rade direktno na originalnim pikselima slike. Vodeni žig se može umetnuti manipulisanjem vrednostima piksela, na osnovu logoa ili informacija o potpisu [110]. U najčešće korišćenim dizajnima, intenzitet piksela u poznatim tačkama u prostoru predstavlja sliku, gde je najniži bit određenih piksela u slici u boji ili sivim tonovima preokrenut. U zavisnosti od intenziteta piksela, rezultujući vodeni žig može biti vidljiv ili nevidljiv. Mi razmatramo različite pristupe u vezi sa tehnikama prostornog domena koji su privukli pažnju istraživača zbog njihove optimalne ravnoteže između neprimetnosti, robusnosti i kapaciteta, koji su najvažniji zahtevi svake tehnike pisanja vodenog žiga. Ove tehnike imaju nisku složenost, poboljšanu efikasnost i brže izvršenje. Štaviše, kvalitet slike sa vodenim žigom se može kontrolisati [117]. Međutim, ova tehnika radi dobro samo ako slika nije izložena bilo kakvom šumu ili ljudskim modifikacijama. Opsecanje slike se može koristiti da se isključi vodeni žig, što je glavna slabost u prostornom vodenom žigu. Ova tehnika generiše veliku količinu podataka, u smislu kapaciteta, ali se i umetnuti podaci mogu se lako otkriti raznim napadima [118], [119] [120]. Tehnike vodenog žiga u prostornom domenu su previše krhke, jer se njima može lako manipulirati. Ove tehnike su mnogo manje otporne na različite tipove napada, u poređenju sa algoritmima u frekvencijskom domenu.

## **6.3 Tehnike vodenog žiga u frekvencijskom domenu**

Nedostaci prethodne tehnike su skrenuli istraživanja na tehniku vodenog žiga u domenu transformacije koje skrivaju podatke u prostoru transformacije signala, a ne u vremenu, na



efikasniji način. Ova tehnika konvertuje sliku koristeći unapred definisanu transformaciju kako bi se slika predstavila u frekvencijskom domenu. Zatim, on ugrađuje vodeni žig promenom koeficijenata domena transformacije originalne slike koristeći različite transformacije, uključujući diskretnu kosinusnu transformaciju (DCT), diskretnu Furijeovu transformaciju (DFT), diskretnu talasnu transformaciju (DWT), dekompoziciju singularne vrednosti (SVD) Hadamard, CAT, FFT, PHT i Fresnel transformacija. Konačno, izvlači vodeni žig, uz pomoć ispravnog ključa, koristeći inverznu transformaciju. Algoritmi za insertovanje vodenog žiga u frekventnom domenu koriste dva pristupa u radu. Jedan od pristupa podrazumeva da se vrši transformacija cele slike u nekom od transformacionih domena i insertovanje digitalnog vodenog žiga, tj. modifikacijom koeficijenata slike. Drugi pristup podrazumeva da se vrši deljenje slike na blokove, a zatim se vrši transformacija svakog od blokova slike i modifikacija piksela koeficijentima vodenog žiga. U tom slučaju se za potrebe žiga može koristiti bilo koja slika ili pak pseudoslučajni niz. Da bi se povratio originalni signal u frekvencijskom domenu, frekvencijske komponente moraju biti rekombinovane primenom informacija o pomeranju faze na svaku sinusoidu slike [108]. Sprovedena su mnoga istraživanja o transformisanju vodenog žiga slike domena, dokazujući bolju robusnost, sigurnost i neprimetnost protiv različitih napada, kao što su kompresija, šum, filtriranje, sečenje i rotacija. Ovaj odeljak daje pregled nekih od tih studija, koje su uglavnom koristile transformacije u frekvencijskom domenu, kao što su DCT, DFT, DWT i SVD, i dotiče se metoda hibridnog domena

### ***6.3.1 Insertovanje digitalnog vodenog žiga primenom DCT transformacije***

Diskretna kosinusna transformacija (DCT) razdvaja sliku na njene ekvivalentne frekvencijske koeficijente modifikovanjem frekvencijskih komponenti, koje se mogu izraziti kao zbir kosinusnih funkcija. DCT je Furijeova transformacija i sadrži konačan niz tačaka podataka. Ovde se mogu koristiti samo realni brojevi. Njegova varijansa određuje korisnost DCT koeficijenata. DCT je važan za kompresiju slike; na primer, u JPEG formatu slike. Mnoga istraživanja su već sprovedena o metodama digitalnog označavanja vodenim žigovima u DCT domenu. Među njima, vodeni žig DCT slike zasnovan na blokovima funkcioniše tako što se slika domaćin deli na različite blokove slike, nakon čega metoda primenjuje DCT transformaciju na ovu sliku. Zatim, metoda ubacuje vodeni žig u blok i sliku domaćina zasnovanu na DCT-u uz pomoć algoritma. Zatim se primenjuje inverzna diskretna kosinusna transformacija (IDCT) da bi se dobila slika sa vodenim žigom.

### ***6.3.2 Insertovanje digitalnog vodenog žiga primenom DFT transformacije***

Diskretna Furijeova transformacija (DFT) koristi uzorke koji su ravnomerno raspoređeni. U ovom slučaju, niz brojeva fiksne dužine, ravnomerno raspoređenih uzoraka funkcije se konvertuje u niz iste dužine ravnomerno raspoređenih uzoraka u Furijeovoj transformaciji diskretnog vremena (DTFT). DTFT koristi skup harmonijski povezanih kompleksnih (veličina i faza) eksponencijalnih funkcija. DFT predstavlja originalnu ulaznu sekvencu u frekvencijskom domenu i proizvodi signal koji je diskretan i periodičan. Mnoge praktične primene, uključujući obradu signala, obradu slike, filtere, operacije konvolucije, spektralnu analizu sinusoida i Furijeovu analizu, obavlja DFT.

### ***6.3.3 Insertovanje digitalnog vodenog žiga primenom DWT transformacije***

Diskretna talasna transformacija (DWT) je svaka talasna transformacija koja razlaže signal na talase, a ne na frekvencije. U DWT-u, talasi se diskretno uzorkuju. Vremenska rezolucija je jedna od prednosti DWT u odnosu na Furijeove transformacije (tj. DCT i DFT). Ovo čini DWT privlačno istraživačima, tako što obuhvata više aspekata informacija, kao što su lokacija u vremenu i frekvenciji. Skup talasa, koji su matematičke funkcije, koristi se za dekomponovanje signala.

Talasna transformacija je korisna u digitalnoj obradi signala, kompresiji slike i uklanjanju šuma iz signala. Ključna ideja u talasnoj transformaciji je upotreba skupa osnovnih funkcija (zvanih talasi) koje nude lokalizaciju u frekvencijskom domenu. Visokofrekventna rezolucija se može dobiti na niskim frekvencijama, a visoka vremenska rezolucija se može dobiti na visokim frekvencijama kada se koristi talasna transformacija. Osnovna tehnika DWT slike vodenim žigom razlaže originalnu sliku na tri različita nivoa. Podopsezi LH3, HH3 i HL3, na tri različita nivoa, koriste se za ugradnju vodenog žiga. Podopsezi se sastoje od širokog opsega frekvencijskog spektra slike. Zbog toga je povećana robusnost sistema vodenih žigova [121].

Jedna od najčešćih primenjivanih metoda DWT je dvodimenzionalna diskretna talasna transformacija, 2-D DWT koja sliku deli na 4 podopsega, od kojih jedan predstavlja aproksimaciju, tj. niskofrekventnu komponentu slike, a ostala tri predstavljaju detalje slike, odnosno visokofrekvencijske komponente slike u horizontalnom, vertikalnom i dijagonalnom pravcu [122, 123]. Podopsezi se obeležavaju na sledeći način HL – horizontalni detalji slike, LH – vertikalni detalji slike i HH – dijagonalni detalji slike, LL –visokofrekventna komponenta slike. Nakon primene DWT-a, sistem ugrađuje vodeni žig u glavnu sliku pomoću algoritma i zatim primenjuje inverzni DWT(IDWT) da bi dobio sliku sa vodenim žigom. Proces ekstrakcije

vodenog žiga uzima sliku sa vodenim žigom kao ulaz i primenjuje DWT na istom nivou. Konačno, proces primenjuje IDWT da dobije sliku vodenog žiga.

#### **6.3.4 Insertovanje digitalnog vodenog žiga primenom SVD transformacije**

Dekompozicija singularne vrednosti (SVD) je proizvod realne ili kompleksne matrice. Ovaj metod je generalizacija sopstvene dekompozicije simetrične matrice sa nenegativnim sopstvenim vrednostima na bilo koju  $m \times n$  matricu kroz proširenje polarne dekompozicije. SVD transformacija se široko koristi u statistici i digitalnoj obradi signala, za kompresiju, eliminaciju šuma ili pak insertovanje digitalnog vodenog žiga u sliku [124] [125] [126]. Jednosmerne i nesimetrične osobine se ne mogu dobiti pomoću DCT, DFT i DWT transformacija o kojima je bilo reči. Stoga je za vodeni žig predložena druga transformacija, koristeći SVD [104]. Ovaj metod ugrađuje vodeni žig otkrivanjem karakteristika D i odnosa koeficijenata komponente U. Ova tehnika može efikasno da izvuče vodeni žig, čak i nakon neovlašćenog pristupanja.

Karakteristika ove transformacije je da se uspešno može primeniti i na kvadratnim i pravougaonim matricama, dobijene singularne vrednosti imaju odličnu stabilnost bez imalo deformacija slike, originalna slika i slika nad kojom je primenjena transformacija imaju iste singularne vrednosti. Digitalne slike u koje je insertovan digitalni žig primenom ove metode pokazuje veoma dobre osobine na napad, posebno na rotaciju, superponiranje impulsnog šuma, skaliranje i sl. U odnosu na to kako koriste SVD transformaciju u postupku insertovanja digitalnog vodenog žiga u sliku algoritme delimo u nekoliko grupa: algoritme koje koriste singularne vrednosti, algoritme koji koriste singularne vektore, algoritme koji koriste singularne vrednosti i singularne vektore i hibridne algoritme n

#### **6.4 Osnovni parametri za ocenu kvaliteta i performansi sistema**

Kada govorimo efikasnosti nekog modela i kvaliteta servisa koji obezbeđuje sistem to činimo kroz ocenu parametre kvaliteta. Kada se vrši ocena jednog telekomunikacionog sistema i njegovog kvaliteta u prenosu signala onda se uzimaju u obzir sledeće mere:

- Funkcija gustineverovatnoće (eng. Probability Density Function - PDF),
- Kapacitet kanala (eng. Chaneel Capacity - CC),
- Greška verovatnoće u bitu (eng. Bit Error Rate - BER),
- Odnos signal šum (eng. Signal to Noise Ratio - SNR),
- Normalizovana korelacija (eng. Normalized Correlation - NC),
- Srednja kvadratna greška (eng. Mean Square Error - MSE),

- Maksimalan odnos signal šum (eng. Peak Signal to Noise Ratio - PSNR).

Kada govorimo o parametrima BER i SNR, njih prevashodno koristimo za ocenu performansi komunikacionog sistema. Pozadinski šum može biti iz nekoliko izvora, kao što su ambijentalno svetlo, šum izazvan nasumičnim fluktuacijama u kretanju nosilaca naelektrisanja u provodniku, i toplotni šum (šum koji se generiše termičkim mešanjem elektrona u provodniku). Šum će takođe biti povećan tokom procesa pojačanja (multiplikativni šum). Zato je važno poznavati snage različitih izvora šuma kako bi se izračunala očekivana osetljivost i na kraju uporedila sa deklarisanim karakteristikama opreme, kako bi u cilju projektovanja sistema proizvođač opreme mogao da obezbedi zahtevanu osetljivost prijemnika.

Vrednosti BER zavise od prosečne primljene snage, snage scintilacije i primljenog šuma, predstavljaju procentualno broj bitova sa greškom podeljen sa ukupnim brojem bitova koji su prenešeni kroz kanal. Konstruktivnim rešenjem prijemne aparature, povećavanjem blende nivo primljene optičke snage je veći, pri čemu se sam efekat scintilacije smanjuje. Procenjujući nivo BER, uočavamo deo bitova sa greškom, kako bi se prijemne margine podesile za odgovarajući nivo. Navedena osetljivost prijemnika će se primeniti na određenu brzinu greške u bitovima. Efekat šuma uzrokuje povećanje stope greške u bitovima sve dok ne pređe neki specifični i unapred definisani prag. Prag koji se odabere zavisiće od specifične aplikacije, a za prenos podataka velikom brzinom često se koristi BER prag bolji od  $1 \times 10^{-10}$ .

U prisustvu atmosferske turbulencije, primljeni signal pokazuje dodatne gubitke snage i nasumične fluktuacije zračenja. Mera kvaliteta transmisionog kanala se ogleda i kroz odnos signal šum – SNR. U slučajevima turbulentnog kanala SNR se izražava kroz izraz [127]:

$$SNR = \frac{P_T}{\sigma_N} = \frac{\text{snaga signala}}{\text{snaga šuma}} \quad 6.1$$

Kada se razmatraju FSO linkovi BER i SNR su u direktnoj vezi, izraz za BER piše kao [128] [129] [130]:

$$BER = \frac{\text{broj prenesenih simbola}}{\text{ukupan broj simbola}} \quad 6.2$$

Kada govorimo o prenosu podataka komunikacionim kanalom, performansa komunikacionog sistema koji odlikava brzinu jednog takvog kanala je **kapacitet kanala** (eng. Capacity of the Chanell – CC). Ona nam definiše maksimalnu brzinu komunikacije kojom se

informacije mogu prenositi sa zadatom pouzdanošću i zahtevanim nivoom greške [128]. Izraz kojim se opisuje kapacitet kanala je:

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad 6.3$$

gde je B – propusni opseg kanala u Hz, S – snaga signala, N – snaga šuma.

Ovo je jedan od osnovnih zakona u telekomunikacijama koji nam daje informaciju o maksimalnoj brzini signalizacije preko komunikacionog kanala u smislu tri parametra koja su poznata ili merljiva. Razrađene šeme kodiranja ili tehnike modulacije nikada neće moći da povećaju kapacitet osim ako se ne poveća ili raspoloživi propusni opseg ili odnos signal-šum. Iz ove jednačine se vidi da simultano sa padom SNR, opada i kapacitet kanala, a kada on raste onda i kapacitet kanala raste logaritamski u odnosu na primljenu snagu signala. Još jedan uslov za rast kapaciteta kanala je veličina protoka. U slučajevima malog protoka kapacitet kanala je veoma malo ili gotovo neosetljiv na SNR, a sa povećanjem protoka se povećava i kapacitet kanala.

**Normalizovana korelacija – NC**, je parameter koji nam pokazuje koliko je odstupanje primljene slike u odnosu na originalnu sliku u celini ili pak pojedinih njenih delova. Izražava se u procentima i pokazuje koliki broj piksela je na pogrešnom mestu u odnosu na originalni raspored piksela. Što je korelisanost velika, to je kvalitet prenešene slike kroz telekomunikacioni kanal veća.

**Srednji kvadrat greške – MSE**, je parameter koji se najviše koristi u proceni i merenju kvaliteta slike. Da bi se ustanovila mera kvaliteta slike na prijemu mora se izvršiti poređenje nivo rekonstrusane slike prenešene komunikacionim kanalom i poslate slike. To je potpuna referentna metrika i vrednosti bliže nuli su bolje. MSE je mera kvaliteta koja nam pokazuje kolika je razlika u broju poslatih i primljenih piksela originalne i primljene slike.

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{n=1}^M \sum_{m=1}^N [\hat{g}(n, m) - g(n, m)]^2 \quad 6.4$$

MSE predstavlja apsolutnu grešku. Srednja kvadratna greška snažno zavisi od skaliranja intenziteta slike. Srednja kvadratna greška za vrednost 100 za 8-bitnu sliku (sa vrednostima

piksela u opsegu 0-255) izgleda užasno; ali MSE od 100 za 10-bitnu sliku (vrednosti piksela u [0,1023]) je jedva primetan.

**Maksimalni odnos signal šum – PSNR**, se koristi za izračunavanje odnosa između maksimalno moguće snage signala i snage distorzionog šuma koji utiče na kvalitet njegove predstave. Ovaj odnos između dve slike se izračunava u obliku decibela. PSNR se obično izračunava na logaritamskoj skali decibela zbog signala koji imaju veoma širok dinamički opseg. Ovaj dinamički opseg varira između najvećih i najmanjih mogućih vrednosti koje su promenljive po svom kvalitetu. Maksimalni odnos signala i šuma je najčešće korišćena tehnika procene kvaliteta za merenje kvaliteta rekonstrukcije kompresije slike sa gubicima. Signal se smatra originalnim podatkom, a šum je greška koju stvara kompresija ili izobličenje.

$$PSNR = -10 \log_{10} \frac{MSE}{S^2} \quad 6.5$$

gde je S maksimalna vrednost piksela. PSNR se meri u decibelima (dB). Mera PSNR takođe nije idealna, ali je u uobičajenoj upotrebi. Njegov glavni nedostatak je što se jačina signala procenjuje kao  $S^2$ , a ne kao stvarna jačina signala za sliku. PSNR je dobra mera za poređenje rezultata restauracije za istu sliku, ali poređenja PSNR-a između slika su besmislena.

## **7. MODEL ATMOSFERSKOG TURBULENTNOG KANALA ZA PRENOS SLIKE**

Da bi se došlo do prihvatljivog modela FSO komunikacionog kanala za prenos slike sprovedeno je istraživanje i testiranje modela turbulentnog komunikacionog kanala za prenos podataka. Analiza i testiranje je sprovedeno uzimajući u razmatranje Rajsov model kanala, za koji je predložen algoritam koji se realizuje u programskom paketu MATLAB. Testiranje sprovedeno u MATLAB-u je urađeno korišćenjem slike, kako bi se dobijeni rezultati mogli predstaviti u što verodostojnijem obliku, a simulacija modelovanog FSO kanala približila što realnijim uslovima i situaciji. Za potrebe testiranja koristi se monohromatska slika sa insertovanim digitalnim vodenim žigom, koja se u prijemniku rekonstruiše, proverava koliki je i kakav uticaj FSO kanal izvršio na karakteristike slike i ekstraktovani digitalni vodeni žig.

### **7.1 Digitalni vodeni žig kao mehanizam zaštite prenosa slike u Rajsovom FSO kanalu**

U poslednjim godinama je potreba za razmenom multimedijalnih podataka u svim sferama društva značajno poraslo, pa tako i vojnim primenama, gde se potpuna slika jednog bojišta može sagledati kroz slike, video, audio i sl. U uslovima intenzivnog ometanja, presretanja i izmene originalnih podataka u cilju obmanjivanja ili prikrivanja stvarne situacije na bojištu, nametnula se potreba zaštita podataka od takve vrste napada. S tim u vezi se otpočelo sa upotrebom umetanja dodatnih vidljivih ili nevidljivih informacija u sadržaj koji se prenosi, kako bi se dokazalo da nije došlo do izmene originalnih podataka. Prvobitna upotreba digitalnog vodenog žiga je služila za prenos tajnih informacija i prikriveni prenos do krajnjeg korisnika, i ta tehnika se zove steganografija. Komercijalna primena ove tehnologije je poslužila za zaštitu autorskih prava od nezakonitog i nelegalnog korišćenja intelektualne svojine [131]. Osnovne karakteristike digitalnog vodenog žiga su ga kvalifikovale kao rešenje koje bi bez sumnje moglo da dokaže da nije došlo do izmene poslatih podataka. Njegova neosetljivost i robusnost su pokazali da je postojan pri prenosu kroz komunikacioni FSO turbulentni kanak. Pa ipak istraživanja su pokazala i da slika, pa i digitalni žig može doživeti određen stepen oštećenja [132], [133] [134]. U radu [135] je predložena šema za uklanjanje vidljivog vodenog žiga i reverzibilni oporavak slike. Ovaj, predloženi metod umetanja vidljivog vodenog žiga je jedan od najefikasnijih metoda, tako da se originalna slika može tačno vratiti. Kao što je navedeno ranije tehnike koje se mogu koristiti za insertovanje digitalnog vodenog žiga su DCT, DFT, DWT, SVD ili kombinacijom ovih transformacija.

Tokom obrade slike određeni nivo degradacije je neizbežan. Upotreba optičkih prenosnih sistema velike brzine prenosa podataka ima mnoge prednosti. Međutim, postoje neki manji nedostaci smetnji do kojih može doći. Za modelovanje i predviđanje performansi FSO veze u ovom radu je korišćen Rajsov model [136]. Karakteristike koje daju prednost FSO komunikacionim sistemima nad drugim bežičnim komunikacionim sistemima su koncentrisana snaga signala u uzanom koherentnom snopu svetlosti, odsustvo talasne smetnje, nepostojanje Frenelovih zona, full-dupleks prenos podataka, mala složenost sistema i njegova realizacija, za rad nije potrebna dozvola u licenciranom opsegu. Ipak, FSO prenos ima neke nedostatke, kao što su: akvizicija i usmeravanje su komplikovaniji, slabljenje može biti uzrokovano raznim atmosferskim faktorima (tj. turbulencija, sunce, magla, kiša...). Zbog toga dolazi do fluktuacije u nivou primljenog signala, koji su direktna posledica fluktuacije laserskog snopa koji na svom prenosnom putu refraktuje i rasejava. Ove fluktuacije predstavljaju FSO feding – scintilacije. U slučajevima velikih protoka, čak i mali i vremenski kratkotrajni feding dovodi do velikih grešaka [137]. S tim u vezi je za potrebe simulacije, stvarnih uslova i uticaja na sistem prenosa uzet slučaj digitalne slike sa insertovanim digitalnim vodenim žigom.

## 7.2 Prenos slike sa vodenim žigom kroz Rajsov kanal

U dosadašnjim istraživanjima prenosa slike FSO kanalom i analize performansi ekstrahovanog vodenog žiga vršen je prenos slike sa insertovanim vodenim žigom [138] primenom DCT i SVD transformacije, pri čemu se analizirala robusnost ovakve metode sagledana kroz performanse BER, MSE i PSNR prilikom prenosa slike sa dvostruko insertovanim vodenim žigom.

Primljeni FSO signal je modelovan kao:

$$E_r(t, r) = u_s(t)e^{j2\pi f_c t + \theta(t)} e^{\chi(r) + j\phi(r)} \quad 7.1$$

Gde je  $r$  vektor pozicije na prijemnoj strani,  $f_c$  frekvencija lasera,  $u_s(t)e^{j\theta(t)}$  kompleksna envelopa modulisanog signala,  $\chi(r)$  indukovana turbulentna amplitudna fluktuacija i  $\phi(r)$  fazna varijacija kanala. Fotoelektrični signal na izlazu je modelovan kao:

$$y_T(t) = x_T(t) + n_T(t) \quad 7.2$$

gde je  $n_T(t)$  dodati beli Gausov šum AWGN sa nultom srednjom vrednošću i varijansom:



$$\sigma_n^2 = \frac{B_s e^2 \eta \pi}{2 h f_c} A^2 D^2 \quad 7.3$$

gde je  $e$  naelektrisanje elektrona,  $h$  Plankova konstanta,  $\eta$  kvantna efikasnost fotodetektora,  $B_s$  protok signala,  $D$  prečnik otvora blende prijemnika i  $A$  amplitude polja lokalnog oscilatora LO na demodulatoru.

Deo koji nosi informaciju u signalu može se modelovati kao:

$$x_T(t) = \frac{e \eta \pi}{2 h f_c} A D^2 u_S(t) \text{Re}\{\alpha e^{j 2 \pi f_{IF} t + \theta_{IF}(t)}\} \quad 7.4$$

gde je  $f_{IF} = f_c - f_{LO}$  ekvivalentna frekvencija signala,  $f_{LO}$  je frekvencija lokalnog oscilatora,  $\theta_{IF}$  ekvivalentna faza signala i  $\alpha$  efektivna fluktacija fedinga kanala. Za modelovanje istovremenih efekata indukovane turbulencije amplitudnim oscilacijama i faznom aberacijom, funkcija gustine verovatnoće (PDF) slabljenja amplitude FSO sistema modelovana je Rajsovom distribucijom [99], [106] kao:

$$f_\alpha(\alpha) = \frac{2\alpha(1+K)}{\alpha^2} e^{-K-(1+K)\frac{\alpha}{\alpha^2}} I_0\left(2\alpha\sqrt{\frac{K(1+K)}{\alpha^2}}\right) \quad 7.5$$

gde  $I_0(x)$  predstavlja Bessel - ovu funkciju prvog reda, dok parameter  $K$  predstavlja odnos snage koherentne i nekoherentne komponente [99] i izražava se kao:

$$K = \left[ \frac{\overline{\alpha^2}}{\sqrt{\overline{\alpha^4} + 2\overline{\alpha_r^2}(\sigma_i^2 - \sigma_r^2) - (\sigma_i^2 - \sigma_r^2)^2}} - 1 \right] \quad 7.6$$

gde je:

$$\overline{\alpha^2} = \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \overline{\alpha_r^2} \quad 7.7$$

$$\overline{\alpha_r^2} = e^{-\frac{\sigma_\chi^2 + \sigma_\phi^2}{2}} \quad 7.8$$

$$\sigma_r^2 = \frac{1}{2G} (1 + e^{-2\sigma_\phi^2} - 2e^{-2\sigma_\chi^2 - 2\sigma_\phi^2}) \quad 7.9$$

$$\sigma_i^2 = \frac{1}{2G} (1 - e^{-2\sigma_\phi^2}) \quad 7.10$$

gde  $\sigma_\chi^2$  predstavlja Log-amplitudnu varijansu koja je data izrazom [139] kao:

$$\sigma_{\chi}^2 = 0.307k^{\frac{7}{6}}L^{\frac{11}{6}}C_n^2 \quad 7.11$$

gde  $\sigma_{\varphi}^2$  predstavlja preostala fazna odstupanja izražena preko prečnika blende prijemnika  $D_k$  i predstavljena je izrazom:

$$\sigma_{\varphi}^2 = \Delta J \frac{D_k}{r_0} \quad 7.12$$

Parametar  $k$  izraženi u zavisnosti od talasnog broja kao  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $C_n^2$  predstavlja refrakcioni strukturni indeks prelamanja, a  $L$  – označava dužinu propagacionog puta [99].

Parametar  $G$  dat je izrazom:

$$G = \left\{ 1.09 \left( \frac{\rho_0}{D_k} \right)^2 \Gamma[1.2, 1.08] \left( \frac{\rho_0}{D_k} \right)^{\frac{5}{3}} \right\}^{-1} \quad 7.13$$

gde  $\Gamma(\dots)$  predstavlja nekompletnu Gamma funkciju, a parameter  $\rho_0$  predstavlja generalizovani Fried parameter. Generalizovani Fried parameter dat je izrazom:

$$r_0 = 1.68(C_n^2 L k^2)^{-\frac{3}{5}} \quad 7.14$$

U tom slučaju odnos signal šum SNR Sistema, nakon demodulacije dat je izrazom:

$$\gamma = \frac{P_x}{\sigma_n^2} = \frac{\eta I_S}{h f_c B_S} \frac{\pi D^2}{4} \alpha^2 \quad 7.15$$

Gde je  $I_S = |u_S(t)|^2$  srednji intenzitet optičkog polja, a  $P_x$  predstavlja izlaznu snagu signala.

### 7.3 Algoritam za insertovanje i ekstrakciju vodenog žiga

Algoritmi koji su korišćeni u ranijim istraživanjima za analizu prenosa slike kroz Rajsov FSO kanal sa fedingom realizovani su u sledećim koracima:

### Algoritam 1 za insertovanje žiga:

Korak 1: Primenjena je DCT transformacija na originalnu sliku A dimenziju  $M \times N$ .

Korak 2: Korišćenjem Cik-Cak transformacije izvršeno je mapiranje DCT koeficijenata u četiri kvadranta  $B_1, B_2, B_3$  i  $B_4$ .

Korak 3: Nad svakim kvadrantom je primenjena SVD transformacija  $A^k = U_A^k \Sigma_A^k V_A^{kT}$ ,  $k = \{1,2,3,4\}$ , gde  $k$  predstavlja kvadrante  $B_1, B_2, B_3$  i  $B_4$ .

Korak 4: Nad slikom vodenog žiga primenjena je DCT transformacija.

Korak 5: Slika vodenog žiga W koja je transformisana u koraku 4 transformisana je SVD transformacijom  $W = U_w \Sigma_w V_w^T$ .

Korak 6: Singularne vrednosti svakog kvadranta  $B_k$ ,  $k=\{1,2,3,4\}$  transformisane su sa singularnim vrednostima DCT transformisanog vodenog žiga  $\lambda^{*k} = \lambda^k + \alpha_k \lambda_{wi}$ ,  $i=1,\dots,n$ , gde  $\lambda_k^i$  predstavljaju singularne vrednosti  $\Sigma_A^k$  slike i  $\lambda_{wi}$  predstavljaju singularne vrednosti  $\Sigma_w$  vodenog žiga.

Korak 7: Na taj način su dobijena četiri seta modifikovanih DCT koeficijenata

$$A^{*k} = U_A^k \Sigma_A^{*k} V_A^{kT}, k = \{1,2,3,4\}.$$

Korak 8: U ovom koraku izvršeno je mapiranje modifikovanih koeficijenata nazad na njihove originalne pozicije u cilju kreiranja slike sa insertovanim vodenim žigom.

Korak 9: Primenjujući inverznu DCT transformaciju dobija se originalna slika sa insertovanim vodenim žigom  $A^*$ .

### Algoritam 2, za ekstrakciju žiga:

Korak 1: U ovom koraku je primenjena DCT transformacija na sliku sa insertovanim vodenim žigom koja je prenešena kroz FSO kanal i koja je degradirana.

Korak 2: Vršiti se mapiranje koeficijenata u četiri kvadranta B1, B2, B3 i B4 korišćenjem Cik-Cak modifikacije.

Korak 3: Primenom SVD transformacije nad tako dobijenim kvadrantima

$A^{*k} = U_A^k \Sigma_A^{*k} V_A^{kT}$ , gde su  $k = \{1,2,3,4\}$  nakon ekstrakcije predstavljeni kao kvadranti tako prenešene slike.

Korak 4: Iz svakog kvadranta Bk ekstrahovane su singularne vrednosti  $\lambda_{wi}^k = \frac{(\lambda_i^{*k} - \lambda_i^k)}{\alpha_k}$ ,  $i=1, \dots, n$ .

Korak 5: Korišćenjem singularnih vektora  $W_k = U_W^k \Sigma_W^k V_W^{kT}$ ,  $k = \{1,2,3,4\}$ , formiraju se DCT koeficijenti za sva četiri kvadranta.

Korak 6: U cilju dobijanja vidljivog ekstrahovanog žiga primenjuje se inverzna DCT transformacija nad svakim setom koeficijenata dobijenih u koraku 5.

Za potrebe simulacije prenosa slike sa vodenim žigom putem FSO komunikacionog kanala sačinjen je algoritam koji se izvršava u sledećim koracima:

Korak 1: Iz slike sa insertovanim digitalnim vodenim žigom A\*(8-bitni) kreiran je vektor.

Korak 2: Ovako dobijeni vector, sa decimalnim elementima, je transformisan u vector D, sa binarnim elementima dimenzije  $24 \times M \times N$ .

Korak 3: Nad vektorom D primenjena je BPSK modulacija X=2-D-1. BPSK modulacija prevodi podatke menjajući fazu talasa korišćenjem dve faze koje su međusobno podeljene za 180°.

Korak 4: Signal modulisan BPSK modulacijom se zatim prenosi kroz Rajsov turbulentni kanal  $Y=h*X+n$ , gde h – predstavlja vektor koji obuhvata uticaj Rajsovog fedinga, koji je generisan u skladu sa jednačinom  $f_a(\alpha)$  i parametrom K. Vektor n predstavlja uticaj AWGN kanala definisanog nivoa SNR.

Korak 5: Gray dekodovanje sa čvrstim pragom odlučivanja je primenjena na  $Y$  kako bi se na kraju dobio vector  $\bar{D}$ .

Korak 6: Na kraju se rezultujuća prenesena slika sa insertovanim digitalnim vodenim žigom  $\bar{A}^*$  dobija iz vektora  $\bar{D}$ .

#### 7.4 Rezultati i analiza simulacije

U radu se kao primer navodi eksperiment koji je izveden u cilju simulacije prenosa slike sa digitalnim vodenim žigom kroz FSO turbulentni kanal. Na osnovu ovog eksperimenta će u radu kasnije biti dat sasvim novi pristup u rešavanju problema prenosa slike sa digitalnim vodenim žigom kroz turbulentni FSO kanal.

Raniji eksperimenti su se izvodili u sledećim koracima:

Korak 1: U originalnu sliku je insertovan digitalni vodeni žig sa koeficijentom insertovanja  $\alpha=0.25$ .

Korak 2: BPSK modulaciona šema je primenjena nad slikom sa insertovanim digitalnim vodenim žigom  $A^*$ .

Korak 3: Kroz Rajsov turbulentni feding kanal sa dodatim AWGN prenesen je BPSK modulisani signal.

Korak 4: Na prijemnoj strani je izvršena rekonstrukcija slike, nakon primene Gray dekodovanja sa fiksnim pragom odlučivanja.

Korak 5: Slika rekonstruisana u koraku 4 se podvrgava ekstrakciji vodenog žiga.

Da bi se ocenilo u kojoj meri je izvršen kvalitetan prenos slike i ekstrakovanog digitalnog vodenog žiga koriste se sledeće mere za ocenu performansi: PSNR, MSE i BER.

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{2^n - 1}{MSE} \quad 7.16$$

$$MSE = \frac{\sum_{ij} (x_{ij} - y_{ij})^2}{M \times N}, i = 1 \dots M, j = 1 \dots N \quad 7.17$$

$$BER = \frac{\sum_{ijl} [(x_{ij})_l \oplus (y_{ij})_l]_2}{M \times N}, i = 1 \dots M, j = 1 \dots N, l = 1 \dots n \quad 7.18$$

gde su  $x_{ij}$  – pikseli originalne slike,  $y_{ij}$  – pikseli rekonstrisane slike,  $M \times N$  – dimenzije slike i  $\oplus$  - označava EXOR operator nad svakim od  $n$  parova  $x_{ij}$  i  $y_{ij}$  bitova.

Za potrebe eksperimenta korišćeno je nekoliko slika dimenzija  $512 \times 512$  piksela, kao podloga u koju je insertovan digitalni vodeni žig, nazvane Lena, Devojka, Majmun i Paprika respektivno (slika br. 29).



Slika br. 29 Slike korišćene u eksperimentu Lena, Devojka, Majmun i Paprika

Za potrebe vodenog žiga korišćena je slika veličine  $256 \times 256$  piksela (slika br. 30)



Slika br. 30 Slika korišćena kao vodeni žig

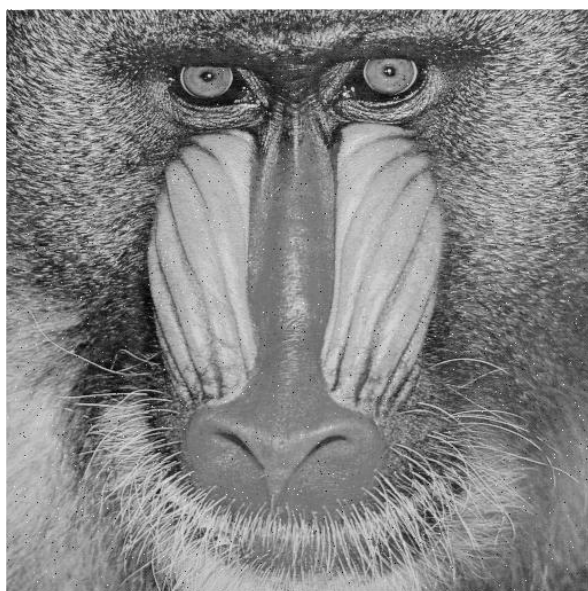
Slika je nakon insertovanja digitalnog vodenog žiga prenešena kroz Rajsov FSO turbulentni kanal. Na prijemnoj strani je izvršena rekonstrukcija slike uzimajući u obzir vrednosti koeficijenata  $K=1$  i  $K=2$ . Izgledi slika nakon rekonstrukcija prikazane su na slici br. 31.



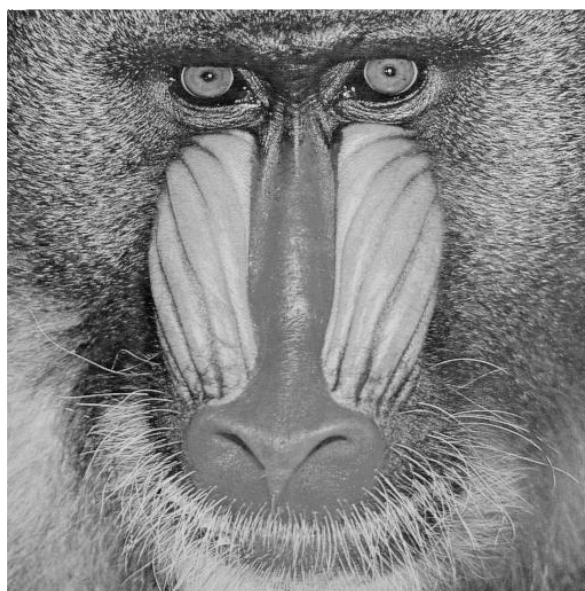
(a)



(b)



(c)



(d)

Slika br. 31 Slike nakon prenosa kroz Rajsov FSO turbulentni kanal sa parametrom  $K=1$  (a,c) i  $K=10$  (b,d)

Izgled slike ekstrakovanog žiga nakon prenosa kroz Rajsov FSO turbulentni kanal sa vrednostima parametra  $K=1$  (a,c) i  $K=10$  (b,d) dat je na slici br. 32.



(a)



(b)



(c)



(d)

Slika br. 32 Slike ekstrahovanog digitalnog vodenog žiga nakon prenosa kroz Rajsov FSO turbulentni kanal sa parametrom  $K=1$  (a – iz slike Lena, c – iz slike Majmun) i  $K=10$  (b – iz slike Lena, d – iz slike Majmun)



Iskazane performance prenosa kroz Rajsov FSO turbulentni kanal kroz vrednosti MSE i PSNR za ekstrakovani digitalni vodeni žig i slike date su u tabelama br. 9 i br. 10 [138].

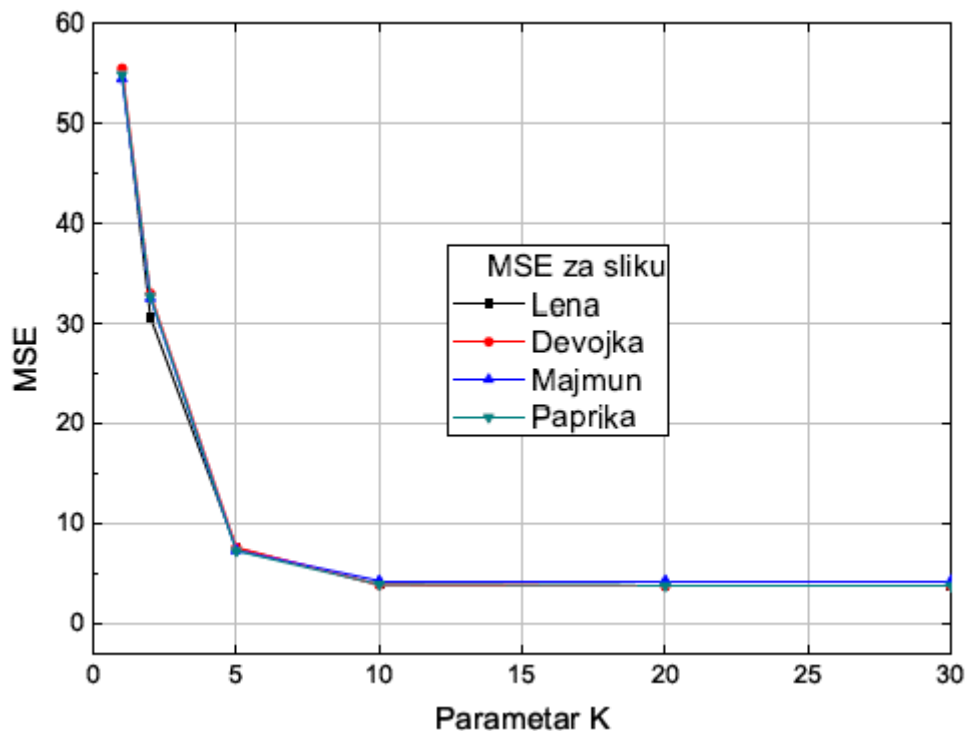
K	LENA		DEVOJKA	
	PSNR <sub>x</sub> [dB]	PSNR <sub>w</sub> [dB]	PSNR <sub>x</sub> [dB]	PSNR <sub>w</sub> [dB]
1	30.71	15.29	30.89	19.85
2	33.27	17.43	32.95	15.73
5	39.33	29.36	39.27	25.55
10	42.18	42.94	42.19	35.03
20	42.26	50.06	42.28	36.57
30	42.26	50.06	42.28	36.57
K	MAJMUN		PAPRIKA	
	PSNR <sub>x</sub> [dB]	PSNR <sub>w</sub> [dB]	PSNR <sub>x</sub> [dB]	PSNR <sub>w</sub> [dB]
1	30.77	18.81	30.73	14.75
2	33.00	21.68	32.98	16.68
5	39.44	31.26	39.48	28.21
10	41.73	37.28	42.10	42.70
20	41.75	37.81	42.26	48.67
30	41.75	37.81	42.26	48.67

Tabela br.9 MSE prenesenih slika i ekstrakovanog žiga

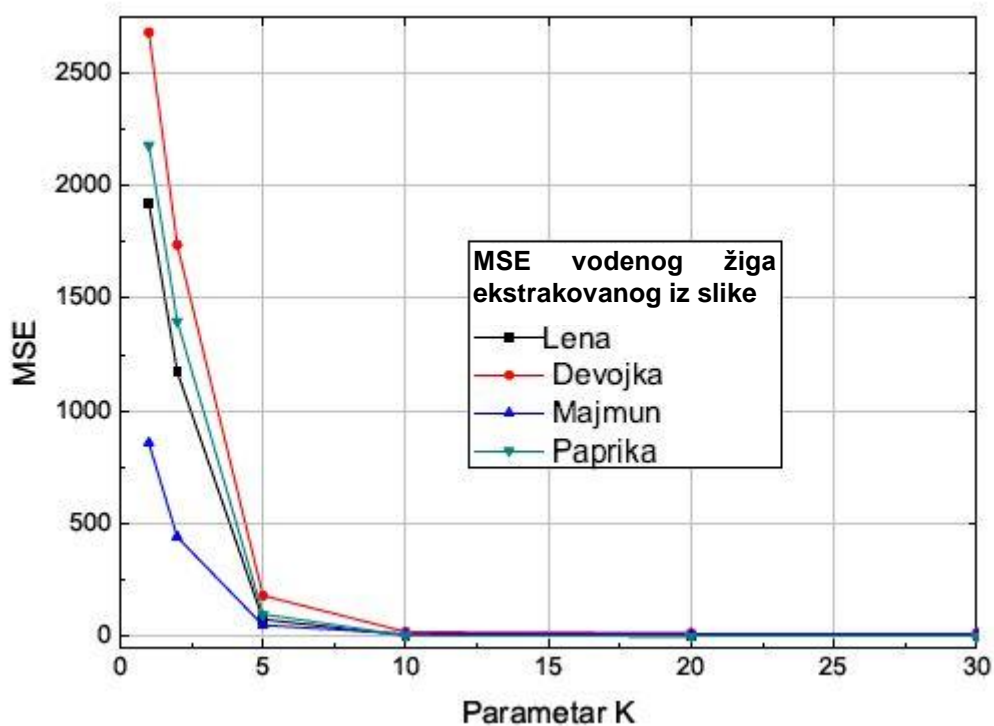
K	LENA		DEVOJKA	
	MSE <sub>x</sub>	MSE <sub>w</sub>	MSE <sub>x</sub>	MSE <sub>w</sub>
1	55.19	1922.5	55.50	2680
2	30.63	1174	33.00	1738
5	7.59	75.41	7.69	181
10	3.94	3.31	3.93	20.43
20	3.86	0.64	3.85	14.31
30	3.86	0.64	3.85	14.31
K	MAJMUN		PAPRIKA	
	MSE <sub>x</sub>	MSE <sub>w</sub>	MSE <sub>x</sub>	MSE <sub>w</sub>
1	54.47	856.27	54.92	2179
2	32.57	441.31	32.77	1398
5	7.40	48.64	7.34	98.17
10	4.36	12.18	4.00	3.50
20	4.34	10.77	3.86	0.88
30	4.34	10.77	3.86	0.88

Tabela br. 10 PSNR prenesenih slika i ekstrakovanog žiga

Za potrebe uporedne analize na slikama br. 33 i br. 34 prikazani su uporedni dijagrami koji daju meru kvaliteta za parameter MSE za slike prenesene kroz Rajsov FSO turbulentni kanal i to slike Lena, Devojka, Majmun i Paprika, kao i za žig ekstrakovan iz analiziranih slika.

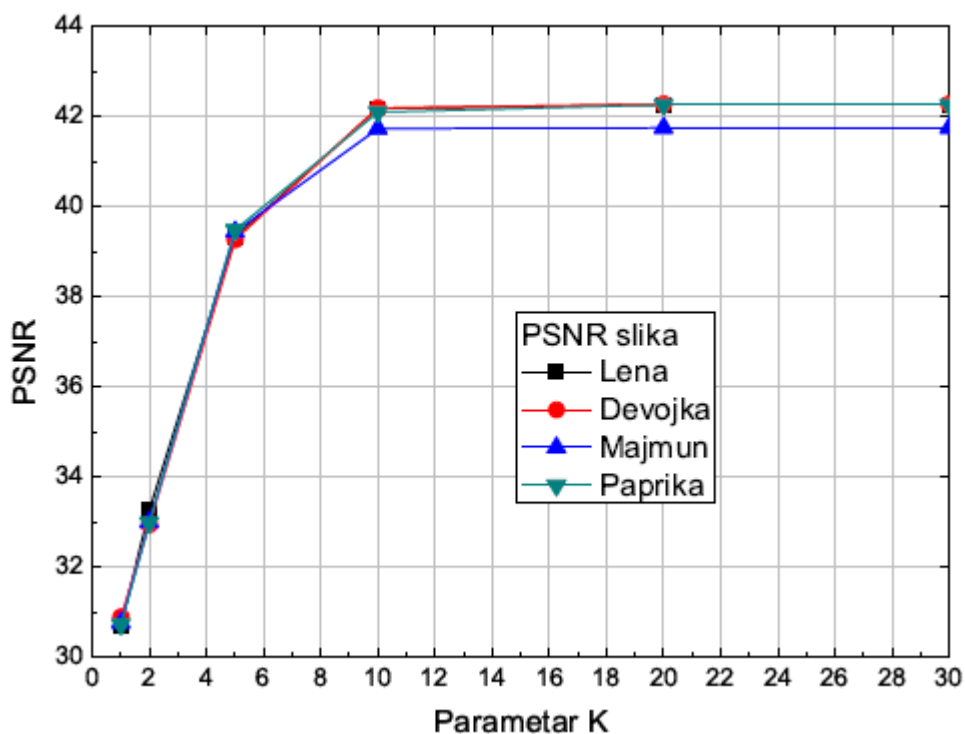


Slika br. 33 MSE prenesenih slika Lena, Devojka, Majmun i Paprika kroz Rajsov FSO turbulentni kanal

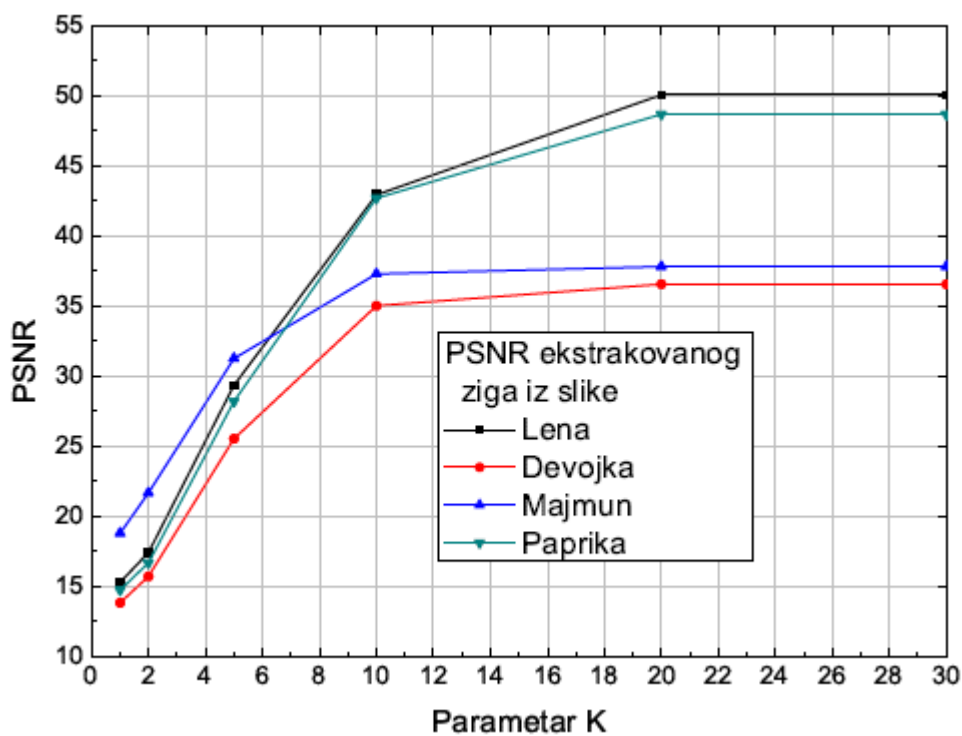


Slika br. 34 MSE ekstrakovanog žiga iz prenesenih slika Lena, Devojka, Majmun i Paprika iz prenesih slika kroz Rajsov FSO turbulentni kanal

Za potrebe uporedne analize na slikama br. 35 i br. 36 prikazani su uporedni dijagrami koji daju meru kvaliteta za parameter PSNR za slike prenesene kroz Rajsov FSO turbulentni kanal i to slike Lena, Devojka, Majmun i Paprika, kao i za žig ekstrakovan iz analiziranih slika.

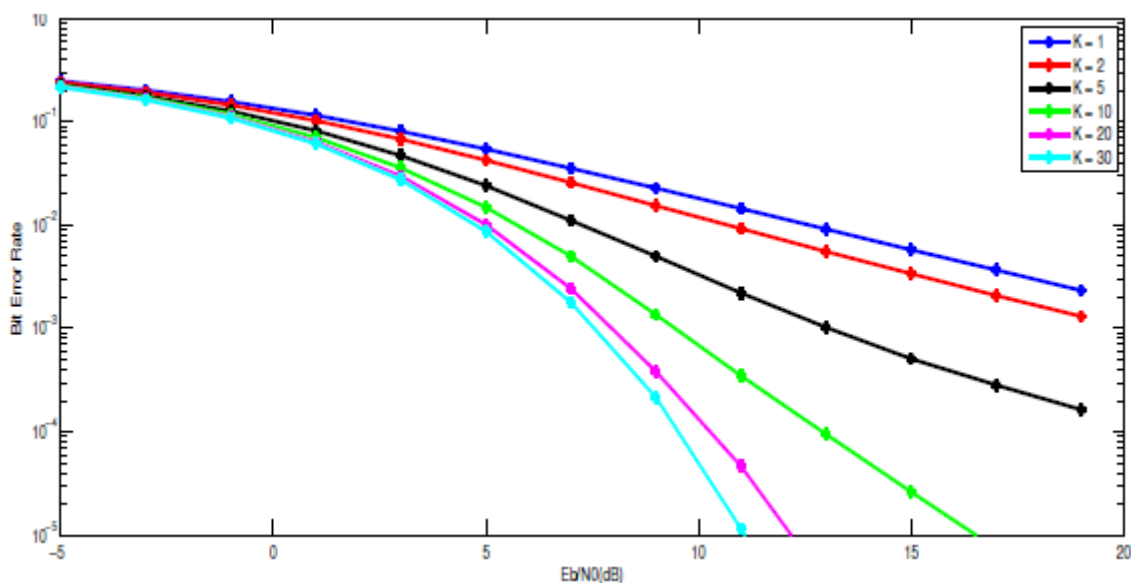


Slika br. 35 PSNR iz prenesenih slika Lena, Devojka, Majmun i Paprika kroz Rajsov FSO turbulentni kanal



Slika br. 36 PSNR ekstrakovanog žiga iz prenesenih slika Lena, Devojka, Majmun i Paprika iz preneših slika kroz Rajsov FSO turbulentni kanal

Takođe se za potrebe uporedne analize vrši uporedna grafička analiza dijagrama koji daju meru kvaliteta za parameter BER za prenesenu sliku Lena na slici br. 37



Slika br. 37 Uporedni dijagram za parameter BER za prenesenu sliku Lena

Na osnovu analize performansi prenesenih slika koji su korišćeni u simulaciji i upoređivanjem vrednosti dobijenih za mere performansi dobijenih kroz parameter MSE, PSNR i BER za digitalni vodeni žig ekstrahovan iz slike koja je prenešena kroz Rajsov turbulentni kanal izvedeni su sledeći zaključci:

- Za vrednosti parametra  $K=10$  vrednost MSE je oko 5 puta veća nego pri ekstrakciji žiga iz slike odmah nakon insertovanja ( $MSE=0.608$ ),
- Pri vrednostima parametra  $K=10$  vrednost parametra PSNR je za oko 15% manja nego pri ekstrakciji žiga iz slike odmah nakon insertovanja ( $MSE=50.29$ ),
- Pri vrednostima parametra  $K=10$  vrednost za parametar BER je blizu vrednosti  $10^{-6}$ , što na prijemnoj strani obezbeđuje da se dobije slika dobrog kvaliteta.
- Pri vrednostima parametra  $K=5$  kvalitet slike i ekstrahovanog žiga vizuelno su zadovoljavajućeg kvaliteta.

Na osnovu svih iznetih analiza i zaključaka stav je istraživanja da ovakav model sistema za prenos slike Rajsovim FSO turbulentnim kanalom daje zadovoljavajuće karakteristike povećanjem vrednosti parametra  $K$ . Parametar  $K$  može svoju vrednost povećati uvećanjem prijemne snage na prijemniku, izmenom propusnog opsega, promenom talasne dužine nosioca

signala, povećanjem dijametra aperature prijemnika i predajnika. Sistem postaje izuzetno efikasan pri dostizanju vrednosti parametra  $K$  od 15 dB.

### 7.5 Vidljivi digitalni vodeni žig u zaštiti prenosa slike u Rajsovom FSO kanalu

Digitalni vodeni žig se može umetnuti u multimedijalni sadržaj kao vidljiv i nevidljiv vodeni žig. Nevidljivi vodeni žig se može izdvojiti kasnije radi dokazivanja da li je nad slikom vršena izmena i potvrda izvora slike. S druge strane, u cilju identifikacije izvora slike, koristi se i tehnika umetanja vidljivog vodenog žiga, a sve u cilju trenutnog upoznavanja korisnika o poreklu i autentičnosti slike [140], [141]. Mnoga istraživanja su rađena istraživanjem tehnika za umetanje vidljivog vodenog žiga u sliku, ali je bilo mnogo poteškoća. Posle oporavka primarna slika je bila sa vidljivim oštećenjima [142] [133] [134]. U radu [135] je predložena šema za uklanjanje vidljivog vodenog žiga i reverzibilni oporavak slike. Ovaj, predloženi metod umetanja vidljivog vodenog žiga je jedan od najefikasnijih metoda, tako da se originalna slika može tačno vratiti.

U cilju smanjenja smetnji koje utiču na kvalitet prenete slike došlo se na ideju da se izvrši FSO prenos VWM (Visible Watermarking Algorithm) slike preko Rajsovog kanala turbulencije [138]. S tim u vezi autori su sproveli eksperiment u kome se VWM slika prenosi preko Rajsovog kanala turbulencije, pri čemu su korišćene standardne testne slike Lena i Devojka i slika vodenog žiga. Eksperiment je izveden umetanjem inverznog binarnog vodenog žiga. Vodeni žig se ubacuje u blokove dimenzija  $k = \{2, 3, 4\}$  sa koeficijentom umetanja  $v = 40$ . Vrednosti Rajsovog parametra su  $K = \{1, 2, 4, 5, 6, 8, 10\}$ . Kvalitet poboljšanja obnovljene slike analiziran je nakon prenosa VWM slike preko Rajsovog turbulentnog kanala. Kao mera kvaliteta prenete slike koja je rekonstruisana na prijemu korišćena je srednja kvadratna greška (MSE).

### 7.6 Algoritam FSO prenosa

Algoritam za simulaciju FSO prenosa [138] VWM vodenog žiga slike se ostvaruje u sledećim koracima:

Korak 1: Od digitalne slike sa vodenim žigom  $A^*$  (8-bitni) kreira se vektor.

Korak 2: Dobijeni vektor se prevodi u vektor sa binarnim elementima  $B$  dimenzija  $8 \times M \times N$ .

Korak 3: Na vektor  $B$  se primenjuje modulacija binarnog faznog pomeranja (BPSK)  $x = 2 \cdot B - 1$ . BPSK je modulaciona šema koja prenosi podatke promenom faze

nosećeg talasa korišćenjem dve faze koje su razdvojene za  $180^\circ$ . Ova modulacija je najrobusnija od svih PSK-ova, jer je najveći nivo šuma ili izobličenja neophodan da bi demodulator doneo pogrešnu odluku.

Korak 4: BPSK modulirani signal se prenosi kroz Rajsov kanal turbulencije:  $y = h \times x + n$ , pri čemu je  $h$  vektor koji obuhvata uticaj Rajsove turbulencije. Vektor  $n$  obuhvata kanal AVGN definisanog nivoa SNR.

Korak 5: Grey dekodiranje sa čvrstim pragom odlučivanja je primenjena na vektoru  $Y$  kako bi se na kraju dobio vektor  $\bar{B}$ .

Korak 6: Dobijena digitalna slika sa vodenim žigom  $\overline{A^*}$  se dobija iz vektora  $\bar{B}$ .

### 7.7 VWM algoritam

Algoritam za ugradnju VWM-a se realizuje kroz sledeće korake:

Korak 1: Originalna slika  $A_0$  veličine  $M_0 \times N_0$  je podeljena na blokove koji se ne preklapaju  $k \times k$ , gde je  $2 \leq k \leq km$ ,  $km \in \{[M_0 / M_v], [N_0 / N_v]\}$ , gde je  $M_v \times N_v$  veličina ugrađene binarne slike vodenog žiga. Parametar  $k$  može biti 2, 3 ili 4.

Korak 2: Jedan bit vodenog žiga može biti ugrađen u svaki blok  $B$  slike domaćina  $A_0$ . U tabeli br.11 je prikazan način na koji se blokovi mogu podeliti u zavisnosti od vrednosti parametra  $k$ .

<b>k</b>	<b>k×k blok B</b>	<b>S<sub>1</sub></b>	<b>S<sub>2</sub></b>	<b>x</b>	<b>y</b>																
<b>2</b>	<table border="1"> <tr> <td><math>b_{1,1}</math></td> <td><math>b_{1,2}</math></td> </tr> <tr> <td><math>b_{2,1}</math></td> <td><math>b_{2,2}</math></td> </tr> </table>	$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	$b_{2,1}$	$b_{2,2}$	$b_{1,1}$	0	$b_{2,2}$	$b_{1,2}$												
$b_{1,1}$	$b_{1,2}$																				
$b_{2,1}$	$b_{2,2}$																				
<b>3</b>	<table border="1"> <tr> <td><math>b_{1,1}</math></td> <td><math>b_{1,1}</math></td> <td><math>b_{1,1}</math></td> </tr> <tr> <td><math>b_{1,1}</math></td> <td><math>b_{1,1}</math></td> <td><math>b_{1,1}</math></td> </tr> <tr> <td><math>b_{1,1}</math></td> <td><math>b_{1,1}</math></td> <td><math>b_{1,1}</math></td> </tr> </table>	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$ $b_{2,1}$ $b_{3,2}$ $b_{2,3}$	$b_{1,3}$ $b_{2,2}$ $b_{3,1}$	$b_{1,1}$	$b_{3,3}$							
$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$																			
$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$																			
$b_{1,1}$	$b_{1,1}$	$b_{1,1}$																			
<b>4</b>	<table border="1"> <tr> <td><math>b_{1,1}</math></td> <td><math>b_{1,2}</math></td> <td><math>b_{1,3}</math></td> <td><math>b_{1,4}</math></td> </tr> <tr> <td><math>b_{2,1}</math></td> <td><math>b_{2,2}</math></td> <td><math>b_{2,3}</math></td> <td><math>b_{2,4}</math></td> </tr> <tr> <td><math>b_{3,1}</math></td> <td><math>b_{3,2}</math></td> <td><math>b_{3,3}</math></td> <td><math>b_{3,4}</math></td> </tr> <tr> <td><math>b_{4,1}</math></td> <td><math>b_{4,2}</math></td> <td><math>b_{4,3}</math></td> <td><math>b_{4,4}</math></td> </tr> </table>	$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{1,4}$	$b_{2,1}$	$b_{2,2}$	$b_{2,3}$	$b_{2,4}$	$b_{3,1}$	$b_{3,2}$	$b_{3,3}$	$b_{3,4}$	$b_{4,1}$	$b_{4,2}$	$b_{4,3}$	$b_{4,4}$	$b_{1,1}, b_{2,1},$ $b_{1,4}, b_{1,1},$ $b_{4,1}, b_{3,4},$ $b_{4,3}$	$b_{1,1}, b_{1,3},$ $b_{2,2}, b_{2,4},$ $b_{4,2}, b_{4,4}$	$b_{3,3}$	$b_{3,2}$
$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{1,4}$																		
$b_{2,1}$	$b_{2,2}$	$b_{2,3}$	$b_{2,4}$																		
$b_{3,1}$	$b_{3,2}$	$b_{3,3}$	$b_{3,4}$																		
$b_{4,1}$	$b_{4,2}$	$b_{4,3}$	$b_{4,4}$																		

Tabela br.11 Način dobijanja koeficijenta za svaki blok

Korak 3: Srednja vrednost dodeljenog vidljivog regiona vodenog žiga na originalnoj slici  $I_0$  se izračunava prema formuli:

$$avg_w = \frac{\sum_{m=0}^{k \times M_w - 1} \sum_{n=0}^{k \times N_w - 1} I_0(m + \mu_1, n + \mu_2)}{(k \times M_w) \times (k \times N_w)} \quad 7.19$$

gde  $(\mu_1, \mu_2)$  predstavlja koordinate slike vodenog žiga  $W$  ugrađenu u sliku domaćina  $A_0, (k \times M_w, k \times N_w)$  predstavlja region gde je vodeni žig ugrađen.

Korak 4: Prag  $T_w$  se izračunava:

$$T_w = \begin{cases} avg_w + 30, & \text{ako je } avg_w \leq 128, \\ avg_w - 30, & \text{ako je } avg_w > 128. \end{cases} \quad 7.20$$

Korak 5: Srednja vrednost svakog bloka se izračunava:

$$avg_B = \frac{1}{k^2} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k B(i, j) \quad 7.21$$

Korak 6: Proces ugrađivanja svakog bita vodenog žiga u odgovarajući blok je završen kada:

$$B'(i, j) = \begin{cases} B(i, j) + \omega \times v, & \text{ako je } avg_w < T_w, \\ B(i, j) - \omega \times v, & \text{ako je } avg_w \geq T_w, \end{cases} \quad 7.22$$

gde  $\omega$  predstavlja bit vodenog žiga, a  $v$  koeficijent umetanja bita (najveća vrednost  $v$  znači vidljiviji vodeni žig).

Korak 7: Za svaki blok se izračunavaju različite vrednosti parametara  $d_1$  i  $d_2$ :

$$d_1 = \sum_{B'(i, j) \in S_1} B'(i, j) - \sum_{B'(i, j) \in S_2} B'(i, j) - x, \quad 7.23$$

$$d_2 = \sum_{B'(i, j) \in S_1} B'(i, j) - \sum_{B'(i, j) \in S_2} B'(i, j) - y, \quad 7.24$$

gde su  $S_1, S_2, x$  i  $y$  parametri iz tabele br.11 [136].

Korak 8: Izvršena je modifikacija piksela  $x$  u piksel  $x'$  i u piksel  $y'$

$$x' = 2 \times d_1 + \omega + \left\lfloor \frac{\sum_{B'(i,j) \in \{S_1 \cup S_2\}} B'(i,j)}{2 \times \left\lfloor \frac{k^2 - 1}{2} \right\rfloor - 1} \right\rfloor \quad 7.25,$$

$$y' = \begin{cases} 2 \times d_2 + 0 + \left\lfloor \frac{\sum_{B'(i,j) \in \{S_1 \cup S_2\}} B'(i,j)}{2 \times \left\lfloor \frac{k^2 - 1}{2} \right\rfloor - 1} \right\rfloor, & \text{ako je } avg_B < T_w, \\ 2 \times d_2 + 1 + \left\lfloor \frac{\sum_{B'(i,j) \in \{S_1 \cup S_2\}} B'(i,j)}{2 \times \left\lfloor \frac{k^2 - 1}{2} \right\rfloor - 1} \right\rfloor, & \text{ako je } avg_B \geq T_w \end{cases} \quad 7.26$$

Nakon implementacije gore navedenih koraka, dobija se vidljiva slika sa vodenim žigom  $A_w$ .

Procedura VWM algoritma za oporavak slike se realizuje kroz sledeće korake:

Korak 1: Slika sa vodenim žigom  $A_w$  se deli na nepreklapane  $k \times k$  blokove na isti način sa procedurom ugrađivanja, a parametri  $S'1$ ,  $S'2$ ,  $x'$  i  $y'$  se takođe mogu dobiti kao u proceduri ugrađivanja.

Korak 2: Koristeći dobijene vrednosti za parametre  $S'1$ ,  $S'2$ ,  $x'$  i  $y'$ , mogu se izračunati razlike  $d_1'$  i  $d_2'$  za svaki  $k \times k$  blok  $B'$  sa vodenim žigom:

$$d_1' = x' - \left\lfloor \frac{\sum_{B'(i,j) \in \{S_1 \cup S_2\}} B'(i,j)}{2 \times \left\lfloor \frac{k^2 - 1}{2} \right\rfloor - 1} \right\rfloor \quad 7.27$$

$$d_2' = y' - \left\lfloor \frac{\sum_{B'(i,j) \in \{S_1 \cup S_2\}} B'(i,j)}{2 \times \left\lfloor \frac{k^2 - 1}{2} \right\rfloor - 1} \right\rfloor \quad 7.28$$

Korak 3: Izvučeni binarni vodeni žig  $\omega'$  iz svakog bloka može se dobiti pomoću:

$$\omega' = \text{mod}(d_1, 2) \quad 7.29$$

Korak 4: Razlike  $d_1$  i  $d_2$  se mogu dobiti pomoću:

$$d_1 = \left\lfloor \frac{d_1'}{2} \right\rfloor \quad 7.30$$



$$d_2 = \left\lfloor \frac{d_2'}{2} \right\rfloor \quad 7.31$$

Korak 5: Pikseli  $x''$  i  $y''$  se mogu ponovo izračunati u skladu sa sledećim jednačinama

$$x'' = \sum_{B'(i,j) \in S_1} B'(i,j) - \sum_{B'(i,j) \in S_2} B'(i,j) - d_1 \quad 7.32$$

$$y'' = \sum_{B'(i,j) \in S_1} B'(i,j) - \sum_{B'(i,j) \in S_2} B'(i,j) - d_2 \quad 7.33$$

ako je  $\omega' = 1$ .

Korak 6: Obnovljeni blokovi  $B''$  mogu se dobiti prema parametru  $v$ , pikseli  $x''$  i  $y''$  prema sledećoj jednačini:

$$B''(i,j) = \begin{cases} B'(i,j) - \omega' \times v, & \text{ako je } \omega_1 = 0 \\ B'(i,j) + \omega' \times v, & \text{ako je } \omega_1 = 1 \end{cases} \quad 7.34$$

gde je  $\omega_1 = \text{mod}(d_2', 2)$ .

Korak 7: Dobija se obnovljena slika  $A_r$ .

## 7.8 Rezultati eksperimenta i analiza

Da bi se simulirao FSO prenos slika sa vodenim žigom preko Rajsovog turbulentnog feding kanala, sproveden je sledeći eksperiment:

Korak 1: Originalna slika je obeležena vodenim žigom sa koeficijentom vodenog žiga  $v = 40$ .

Korak 2: Na sliku sa vodenim žigom  $A_w$  se primenjuje BPSK modulacija.

Korak 3: BPSK modulisani signal je prenet kroz Rajsov turbulentni feding kanal sa AWGN.

Korak 4: Slika je rekonstruisana na prijemniku nakon izvršenog Gray dekodiranja uz teško odlučivanje.

Korak 5: Iz rekonstruisane slike nakon primene VWM algoritma dobija se oporavljena slika.

Kao mera kvaliteta za prenos slike koriste se parametri BER i MSE, definisani kao:

$$BER = \frac{\sum_{ijl} [(x_{ij})_l]_2 \oplus [(y_{ij})_l]_2}{M \times N} \quad 7.35$$

za  $i=1 \dots M, j=1 \dots N, l=1 \dots n$ .

$$MSE = \frac{\sum_{ij} (x_{ij} - y_{ij})^2}{M \times N} \quad 7.36$$

za  $i=1 \dots M, j=1 \dots N$ ,

gde su:  $x_{ij}, y_{ij}$  - piksel originalne slike i prenete i oporavljene slike,  $n$ -broj bitova,  $M \times N$  - veličina slike, a  $\oplus$  označava EXOR operator nad svakim od  $n$  para bitova iz  $x_{ij}$  i  $y_{ij}$  i  $\|A\|$  označava broj bita slike.

Za potrebe eksperimenta korišćena je osnovna standardna slika a) Lena i b) binarni vodeni žig (slika br.38).



(a)



(b)

Slika br. 38 Originalna slika a) Lena i b) vodeni žig



(a)

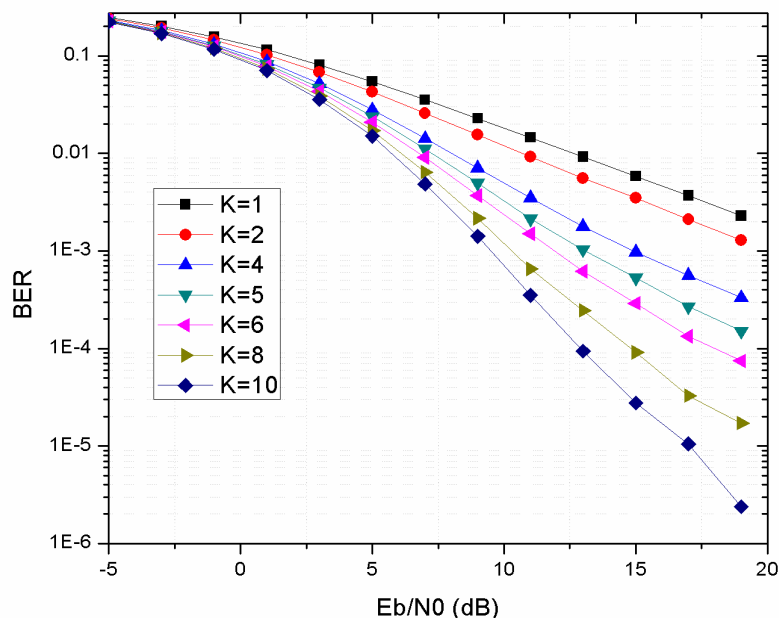


(b)

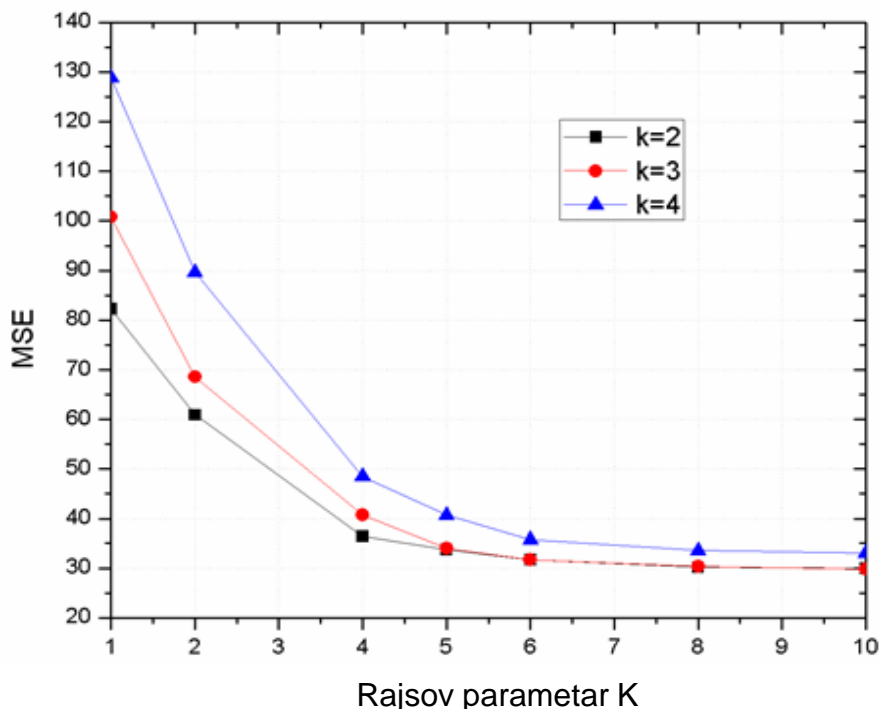
Slika br. 39 Slika Lena sa digitalnim vodenim žigom za  $k=2$  rekonstruisana nakon prenosa za : a)  $K=1$  i b)  $K=10$

Na slici br. 39 prikazan je izgled slike Lena nakon umetanja vodenog žiga sa  $k = 2$  oporavljenog: a) nakon prenosa sa  $K = 1$ , b) nakon prenosa sa  $K = 10$ .

Na slici br. 40 prikazani su grafikoni BER-a za emitovanu sliku Lena, za različite vrednosti Rajsovog parametra  $K = \{1, 2, 4, 5, 6, 8, 10\}$ .



Slika br. 40 Mera kvaliteta za parameter BER prenešene slike Lena ( $k=4$ )



Slika br. 41 Mera kvaliteta za parameter MSE prenešene slike Lena za različite vrednosti veličine bloka Rajsovog parametra k

Na slici br. 41 prikazani su grafikoni MSE za obnovljene slike, za različite vrednosti parametra veličine bloka  $k = \{2,3,4\}$ , nakon prenosa sa različitim vrednostima Rajsovog parametra  $K = \{1, 2, 4, 5, 6, 8, 10\}$ .

Na osnovu rezultata prikazanih na slici br. 39b može se zaključiti da su slike sa vodenim žigom sa veličinom umetanja bloka  $k = 2$  i prenete sa Rajsovim parametrom  $K = 10$  vizuelno bez oštećenja. Područje slike sa vodenim žigom nakon oporavka je sa manjim oštećenjima. Slika sa vodenim žigom sa veličinom umetanja bloka  $k = 2$  i preneti sa Rajsovim parametrom  $K = 1$  su vizuelno sa vidljivim šumom, a vodeni žig nakon oporavka takođe ima oštećenja (lika br. 39a).

Na osnovu slike br. 40 može se zaključiti da su vrednosti  $BER < 10^{-3}$  za  $SNR > 10$  i za  $K > 8$ , a sa povećanjem SNR i Rajsovog parametra  $K$  opadaju.

Na osnovu grafikona prikazanog na slici br. 41 može se zaključiti da slika vodenog žiga sa umetnutim vodenim žigom u bloku veličine  $k = 2$  i  $k = 2$ , i sa Rajsovim parametrom  $K=5$  daje oporavljenu sliku sa  $MSE < 35$ .

Nakon poređenja vizuelnog izgleda oporavljene slike, pre prenosa i oporavljene slike nakon prenosa preko Rajsovog turbulentnog kanala sa različitim vrednostima veličine bloka i Rajsovog parametra, zaključuje se da je oporavljena slika nakon prenosa preko Rajsovog turbulentnog kanala, dobrog kvaliteta za veličinu umetanja bloka  $k = 2$  i Rajsov parametar  $K > 5$ . Takođe, MSE pokazuje da je oporavljena slika, nakon prenosa, dobrog kvaliteta za veličinu umetanja bloka  $k = 2$  i Rajsov parametar  $K > 5$ . Na kraju se može zaključiti da se vidljivi vodeni žig u bloku veličine  $k = 2$  može uspešno preneti sa Rajsovim parametrom  $K > 5$ .

## **8. PRENOS SLIKE SA UTISNUTIM VIDLJIVIM VODENIM ŽIGOM KROZ NULTI USMERENI DVOSTRUKI RAJSOV TURBULENTNI KANAL**

Tokom poslednjih decenija, predloženo je više statističkih modela za različite stepene turbulencija. Međutim, pored efekta scintilacije, neusklađenost između tačke prenosa i tačke prijema zbog kolebanja u tački oslonca koja dovodi do oscilaciju FSO zraka i, samim tim, greške u usmeravanju koje ograničavaju performanse atmosferskih FSO veza, tako da uticaj greške u usmeravanju (boresight) se široko istražuje u literaturi.

Tokom obrade slike određeni nivo degradacije je neizbežan. Upotreba optičkih prenosnih sistema velike brzine prenosa podataka (FSO) ima mnoge prednosti. Međutim, postoje neki manji nedostaci smetnji do kojih može doći. Da bismo modelirali i predvideli performanse FSO sistema u ovom radu, predstavljen je novi model nulte usmerenosti/dvostrukog Rajsovog modela, koji generalizuje dobro poznate modele iradijanse, uzimajući u obzir efekte degradacije performansi izazvane neusmerenošću – indukovanog fedinga, kroz uvođenje modela greške boresight usmeravanja na novodobijenu dvostruku Rajsovu distribuciju, slično kao što su ovi efekti uzeti u obzir u radovima [143] [144].

Dvostruka Rajsova raspodela je generalizovan statistički model kojim se modeluju fluktuacije zračenja optičkog snopa koji se prostire kroz homogeni izotropni kanal. Prednost ove raspodele je u tome što objedinjava većinu predloženih statističkih modela, pri čemu obezbeđuje dobru podudarnost sa izmerenim karakteristikama prostiranja ravnih i sferičnih talasa pri različitim uslovima turbulencije (slaba, umerena, jaka). U radu je postojeći model unapređen uzimajući u obzir gubitke usled greške usmeravanja, koje se dešavaju zbog nepodudarnosti predajnika i prijemnika. Za ovu priliku je uzet u obzir uticaj i efekti veličine otvora blende, širine snopa i promenljivog jitter-a. Na taj način dolazimo do jednog novog opšteg modela turbulencije kojim će se opisivati jedan širi spektar FSO fedinga, čija je funkcija raspodele u direktnoj vezi sa atmosferskim parametrima.

U radu se krenulo od toga da se male i velike turbulencije u FSO kanalu mogu sintetizovati u jednu turbulenciju, gde su obe turbulencije modelovane Rajsovim modelom distribucije, gde je nakon toga izveden izraz zatvorenog oblika za funkciju PDF i CDF. Model je proširen štetnim uticajem zbog greške usmeravanja. Takođe se uzima u obzir i veličina otvora blende, širina snop i varijanse jitter-a. Shodno tome, nakon uvođenja izraza zatvorene forme za

sintetizovanu kompozitnu distribuciju grešaka scintilacije i usmeravanja, dobijamo izraze zatvorene forme za BER performanse IM/DD (intensity modulation/direct detection) za dvostruku Rajsovu distribuciju na koju utiče neusklađenost, otkrivajući umanjeње performansi atmosferskih FSO linkova usled grešaka u usmeravanju. Dobijeni numerički rezultati pokazuju da postoji uticaj neusklađenosti na performanse FSO veza.

U radu se došlo na ideju da se izvede FSO prenos slike VWM (visible watermarking modelom) kroz nulti boresight usmereni dvostruki Rajsov turbulentni kanal. Istraživanje je bilo usmereno na analizu efekta smetnji na kvalitet prenete i rekonstruisane slike kroz FSO kanal nakon uklanjanja vodenog žiga iz slike. S tim u vezi je sproveden eksperiment u kome se VWM slike prenosi kroz nulti boresight usmereni dvostruki Rajsov turbulentni kanal [138].

### 8.1 Model sistema

Deo koji nosi informaciju u signalu može se modelovati kao:

$$x_T(t) = \frac{e\eta\pi}{2hf_c} AD^2 u_s(t) \text{Re}\{\alpha e^{j2\pi f_{IF}t + \theta_{IF}(t)}\} \quad 8.1$$

gde je  $u_s(t)$  predstavlja anvelopu željenog signala,  $f_c$  definiše frekvenciju optičkog nosioca  $f_{IF} = f_c - f_{LO}$  ekvivalentna frekvencija signala,  $f_{LO}$  je frekvencija lokalnog oscilatora,  $\theta_{IF}$  ekvivalentna faza signala,  $\alpha$  efektivna fluktacija fedinga kanala,  $e$  označava naelektrisanje elektrona,  $h$  označava Plankovu konstantu,  $\eta$  je kvantna efikasnost fotodetektora,  $D$  je prečnik otvora aperature prijemnika i  $A$  je amplituda polja lokalnog oscilatora na demodulatoru.

Ukupna izlazna struja na fotodetektoru na prijemnoj strani se može izraziti kao:

$$y_T(t) = hx_T(t) + n_T(t) \quad 8.2$$

Gde aditivni beli Gausov šum (AWGN) definisan kao  $n_T(t)$  ima nultu srednju vrednost i varijansu od:

$$\sigma_n^2 = \frac{B_s e^2 \eta \pi}{2hf_c} A^2 D^2 \quad 8.3$$

gde  $B_s$  označava propusni opseg signala.

Kao što je prikazano u [136] da bi se modelovali istovremeni efekti fluktuacija amplitude izazvanih turbulencijom i faznih aberacija, funkcija gustine verovatnoće (PDF) amplitude FSO fejdinga će se modelovati sa Rajsovom distribucijom, kao:

$$f_{\alpha}(\alpha) = \frac{(1+K)}{\bar{\alpha}} e^{-K-(1+K)\frac{\alpha}{\bar{\alpha}}} I_0 \left( 2 \sqrt{\frac{K(1+K)}{\bar{\alpha}}} \alpha \right) \quad 8.4$$

gde je  $I_0(x)$  modifikovana Beselova funkcija nultog reda prve vrste [145], dok parametar  $K$  predstavlja odnos jačine koherentne komponente prema nekoherentnoj u detektovanom polju i dat je kao [136]:

$$K = \left[ \frac{\bar{\alpha}^2}{\sqrt{\bar{\alpha}_4^4 + 2\bar{\alpha}_r^2(\sigma_i^2 - \sigma_r^2) - (\sigma_i^2 - \sigma_r^2)^2}} - 1 \right] \quad 8.5$$

i

$$\bar{\alpha}^2 = \sigma_i^2 + \sigma_r^2 + \bar{\alpha}_r^2 \quad 8.6$$

Gde se parametrima iz jednačine (prethodne) označavaju srednje vrednosti i vrednosti varijanse koeficijenta turbulentnog kanala, izražene u smislu talasnog broja,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , indeksa prelamanja strukturne konstante i propagacione udaljenosti (m) kao u [136].

Konačno, primljeni trenutni SNR sistema nakon demodulacije je dat kao:

$$\gamma = \frac{P_x}{\sigma_n^2} = \frac{\eta I_S}{hf_c B_S} \frac{\pi D^2}{4} \alpha^2 \quad 8.7$$

Gde je  $I_S = |u_S(t)|^2$  srednji intenzitet optičkog polja, a  $P_x$  predstavlja izlaznu snagu signala.

## 8.2 Nov turbulentni model – atmosferski dvostruki Rajsov model

U ovom poglavlju uvodimo novi dvostruki Rajsov model kao proizvod dve vrste fluktuacija. Kanal optičke turbulencije može se modelovati kao modifikovana Rajsova distribucija, gde i amplituda i faza optičkog signala fluktuiraju. Slabljenje intenziteta  $h_j$ ,  $j = 1, 2$ , izazvano optičkom atmosferskom turbulencijom, može se statistički opisati na sledeći način:

$$f_{h_1}(h_1) = \frac{1+K_1}{\bar{h}_1} e^{-K_1 - \frac{(1+K_1)h_1}{\bar{h}_1}} I_0 \left( 2 \sqrt{\frac{h_1(1+K_1)K_1}{\bar{h}_1}} \right) \quad 8.8$$

$$f_{h_2}(h_2) = \frac{1 + K_2}{\bar{h}_2} e^{-K_2 - \frac{(1+K_2)h_2}{\bar{h}_2}} I_0 \left( 2 \sqrt{\frac{h_2(1 + K_2)K_2}{\bar{h}_2}} \right) \quad 8.9$$

Gde je  $\bar{h}_j, j = 1,2$ , srednja vrednost inteziteta turbulencije,  $K_j$  je recipročan parametar kontrasta i  $I_0(x)$  je modifikovana Beselova funkcija prve vrste nultog reda. Izrazi  $\bar{h}_j$  i  $K_j$  imaju formu [99] [146]:

$$K_j = \left( \frac{\bar{\alpha}_{rj}^2 + \sigma_{rj}^2 + \sigma_{ij}^2}{\sqrt{\bar{\alpha}_{rj}^4 + 2\bar{\alpha}_{rj}^2(\sigma_{ij}^2 - \sigma_{rj}^2) - (\sigma_{ij}^2 - \sigma_{rj}^2)^2}} - 1 \right)^{-1} \quad 8.10$$

$$\bar{h}_j = \bar{\alpha}_{rj}^2 + \sigma_{rj}^2 + \sigma_{ij}^2, j = 1,2; \quad 8.11$$

gde  $\bar{\alpha}_{rj}$ , označavaju srednje vrednosti realnog dela efektivnih koeficijenata turbulencije, dok  $\sigma_{ij}^2$  i  $\sigma_{rj}^2$  označavaju varijanse realnog i imaginarnog dela efektivnih koeficijenata turbulencije:

$$\sigma_{rj}^2 = \frac{1 + e^{-2\sigma_{\varphi j}^2} - 2e^{-\sigma_{xj}^2 - \sigma_{\varphi j}^2}}{2N} \quad 8.12$$

$$\bar{\alpha}_{rj} = e^{-\frac{\sigma_{xj}^2 + \sigma_{\varphi j}^2}{2}} \quad 8.13$$

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{1 - e^{-2\sigma_{\varphi j}^2}}{2N}, j = 1,2; \quad 8.14$$

gde  $\sigma_{\varphi j}^2$  i  $\sigma_{xj}^2$  označavaju varijanse amplitudnih fluktuacija i varijacija faze respektivno, dok N predstavlja broj statistički nezavisnih ćelija u prijemnoj aperaturi, definisan kao:

$$N = \left( 1.09 \left( \frac{r_0}{D} \right)^2 \gamma \left( \frac{6}{5}, 1.08 \left( \frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \right) \right)^{-1} \quad 8.15$$

gde D označava dijametar aperature,  $r_0$  označava dijameter koherentnog talasa i  $\gamma(a,x)$  označava donju nekompletnu Gamma funkciju. Varijansa Log-normale amplitude je povezana sa scintilacionim indeksom (SI):

$$\sigma_{\beta j}^2 = e^{4\sigma_{\varphi j}^2} - 1 \quad 8.16$$



dok je varijansa Gaussian phase definisana kao:

$$\sigma_{x_j}^2 = C_j \left( \frac{D}{r_0} \right)^{\frac{5}{3}} \quad 8.17$$

gde je  $C_j$  definisan brojem ( $J$ ) Zernike uslova ispravljenim aktivnom modalnom kompenzacijom. Kao rezultat, intenzitet fejinga optičkog signala kroz modifikovani Rajssov kanal je određen amplitudnom scintilacijom i faznom aberacijom.

Prema teoriji scintilacije [73], zračenje primljenog optičkog talasa može se modelovati kao proizvod dve vrste fluktuacija, tj.  $h_a = h_1 h_2$ , od kojih svaka proizilazi iz turbulentnih vrtloga velikih i malih razmera. Ako pretpostavimo da su  $h_1, h_2$  međusobno dva nezavisna slučajna procesa i da, stoga se drugi momenat zračenja izražava kao:

$$E\langle h_a^2 \rangle = \langle h_1^2 \rangle \langle h_2^2 \rangle = (1 + \sigma_{h_1}^2)(1 + \sigma_{h_2}^2) \quad 8.18$$

gde su  $\sigma_{h_1}^2$  i  $\sigma_{h_2}^2$  normalizovane varijanse  $h_1$  i  $h_2$ . Bez gubitka opštosti, pretpostavimo da je  $E\langle h_a \rangle = 1$  ili analogno tome  $E\langle h_1 \rangle = 1$  i  $E\langle h_2 \rangle = 1$ . Onda scintilacioni indeks može biti izražen kao:

$$\sigma_{h_a}^2 = \frac{E\langle h_a^2 \rangle}{E\langle h_a \rangle^2} - 1 = (1 + \sigma_{h_1}^2)(1 + \sigma_{h_2}^2) - 1 \quad 8.19$$

Ako pretpostavimo da je svaki nivo fluktuacije ozračenosti definisan Rajsovom distribucijom, tj.  $h_1, h_2$  imaju PDF kao (8.8) i (8.9) sa parametrima  $K_1, h_1$  i  $K_2, h_2$ , respektivno. Zatim, koristeći generalizovani statistički model predložen u [136] i nakon što su napravljena neka osnovna uprošćavanja na njegovim parametrima, PDF izraza  $h_a$  mogu biti izražena kao:

$$f_{h_a}(h_a) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{2(1+K_1)^{\frac{p+q+2}{2}} (1+K_2)^{\frac{p+q+2}{2}} K_1^p K_2^q e^{-K_1} e^{-K_2}}{h_1^{\frac{p+q+2}{2}} h_2^{\frac{p+q+2}{2}} \Gamma(p+1) \Gamma(q+1) p! q!} h_a^{\frac{p+q}{2}} K_{p-q} \left( 2 \sqrt{\frac{(1+K_1)(1+K_2)}{h_1 \cdot h_2}} h_a \right) \quad 8.20$$

gde  $K_V(x)$  označava modifikovanu Beselovu funkciju druge vrste.

### 8.3 Neusklađeni model fejinga

Greške u usmeravanju nastaju kao rezultat neusklađenosti između tačke prenosa i tačke prijema. Slabi zemljotresi, toplotna ekspanzija i snažan vetar izazivaju oscilacije nosećih tačaka što rezultira vibracijama optičkog zraka. Da bismo opisali efekte grešaka pri pokazivanju,

polazimo od modela predloženog u [144]. Ovaj model pretpostavlja Gausov profil prostornog intenziteta obima snopa  $w_z$  na ravni prijemnika i kružni otvor aperature poluprečnika  $a$ . I vertikalne i horizontalne oscilacije su modelovane međusobno nezavisnim identičnim Gausovim raspodelama, tako da se radijalni pomeraj  $r$  na detektoru prijemnika može izraziti Rajlijevom distribucijom sa varijansom podrhtavanja  $\sigma_S^2$ . PDF od  $h_p$  može se izraziti kao [144], [147]:

$$f_{h_p}(h_p) = \frac{g^2}{A_0 g^2} h_p^{g^2-1}, 0 \leq h_p \leq A_0 \quad 8.21$$

gde je  $g = \frac{\omega_{zeq}}{2\sigma_S}$  odnos između ekvivalentnog radijusa snopa na prijemniku i greške usmeravanja, standardna devijacija pomeranja (jitter) kod prijemnika i :

$$\omega_{zeq}^2 = \frac{\omega_z^2 \sqrt{\pi} \operatorname{erf}(v)}{2v e^{-v^2}}, \quad v = \frac{\sqrt{\pi} a}{2\sqrt{\omega_z}}, A_0 = [\operatorname{erf}(v)]^2 \quad 8.22$$

gde je  $\operatorname{erf}(\ )$  funkcija greške [145]:

$$\Phi(x) = \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad 8.23$$

#### 8.4 Statistika kompozitnog modela kanala

Ovde je izveden kompletan statistički model optičkog kanala stohastičkog slobodnog prostora uzimajući u obzir i scintilaciju izazvanu turbulencijom i fading izazvanu neusklađenošću. Prema tome, безусловni PDF,  $f_h(h)$ , za stanje kanala,  $h$ , dobija se izračunavanjem kombinacije dve distribucije predstavljene iznad u jednačinama (8.20) i (8.21):

$$f_h(h) = \int f_h(h | h_a) f_{h_a}(h_a) dh_a \quad 8.24$$

gde je  $f_h(h | h_a)$  uslovna verovatnoća dato u turbulentnom stanju,  $h_a$  i izražava se kao:

$$f_h(h | h_a) = \frac{1}{h_p} f_{h_p}\left(\frac{h}{h_p}\right), 0 \leq h \leq A_0 h_a \quad 8.25$$

Zamenom izraza (8.21) u (8.22) dobija se izraz za PDF u sledećoj formi:

$$f_h(h) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{(1+K_1)(1+K_2) K_1^p K_2^q e^{-K_1} e^{-K_2}}{\bar{h}_1 \bar{h}_2 A_0 \Gamma(p+1) \Gamma(q+1) p! q!} g^2 G_{1,3}^{3,0} \left( \frac{(1+K_1)(1+K_2)}{\bar{h}_1 \bar{h}_2 A_0} h \mid \frac{g^2}{g^2-1, p, q} \right) \quad (8.26)$$

gde  $G_{p,q}^{m,n} \left( \begin{matrix} a_p \\ b_q \end{matrix} \middle| x \right)$ , označava Majerovu G funkciju, datu izrazima (07.34.02.0001.01)], (07.34.21.0085.01) i (07.34.17.0011.01) u [148].

## 8.5 Algoritmi

U radu su korištena dva algoritma [135]:

- Algoritam za prenos FSO kanalom,
- VWM algoritam za označavanje vodenim žigom.

### 8.5.1 Algoritam za prenos FSO kanalom

Algoritam za simulaciju FSO prenosa [136] VWM vodenog žiga slike se ostvaruje u sledećim koracima:

Korak 1: Od digitalne slike sa vodenim žigom  $A^*$  (8-bitni) kreira se vektor.

Korak 2: Dobijeni vektor se prevodi u vektor sa binarnim elementima B dimenzija  $16 \times M \times N$ .

Korak 3: Na vektor B se primenjuje modulacija binarnog faznog pomeranja (BPSK)  $x = 2 \cdot B - 1$ . BPSK je modulaciona šema koja prenosi podatke promenom faze nosećeg talasa korišćenjem dve faze koje su razdvojene za  $180^\circ$ . Ova modulacija je najrobusnija od svih PSK-ova, jer je najveći nivo šuma ili izobličenja potreban da bi demodulator doneo pogrešnu odluku.

Korak 4: BPSK modulisani signal se prenosi kroz multi-boresight/dvostruki Rajsov turbulentni kanal:  $y = h \times x + n$ , pri čemu je h vektor koji obuhvata uticaj Rajsove turbulencije. Vektor n obuhvata kanal AVGN definisanog nivoa SNR.

Korak 5: Grey dekodiranje sa čvrstim pragom odlučivanja je primenjena na vektoru Y kako bi se na kraju dobio vector  $\bar{B}$ .

Korak 6: Dobijena digitalna slika sa vodenim žigom  $\bar{A}^*$  se dobija iz vektora  $\bar{B}$ .

### 8.5.2 VWM algoritam

**Algoritam za ugradnju VWM-a se realizuje kroz sledeće korake:**

Korak 1: Originalna slika  $A_0$  veličine  $M_0 \times N_0$  je podeljena na blokove koji se ne preklapaju  $k \times k$ , gde je  $2 \leq k \leq km$ ,  $km \in \{[M_0 / M_v], [N_0 / N_v]\}$ , gde je  $M_v \times N_v$  veličina ugrađene binarne slike vodenog žiga. Parametar  $k$  može biti 2, 3 ili 4.

Korak 2: Jedan bit vodenog žiga može biti ugrađen u svaki blok  $B$  slike domaćina  $A_0$ . U tabeli br.11 je prikazan način na koji se blokovi mogu podeliti u zavisnosti od vrednosti parametra  $k$ .

Korak 3: Srednja vrednost dodeljenog vidljivog regiona vodenog žiga na originalnoj slici  $I_0$  se izračunava prema formuli:

$$avg_w = \frac{\sum_{m=0}^{kM_w-1} \sum_{n=0}^{kN_w-1} I_0(m + \mu_1, n + \mu_2)}{(kM_w) \times (kN_w)} \quad 8.27$$

gde  $(\mu_1, \mu_2)$  predstavlja koordinate slike vodenog žiga  $W$  ugrađenu u sliku domaćina  $A_0$ ,  $(kM_w, kN_w)$  predstavlja region gde je vodeni žig ugrađen.

Korak 4: Prag  $T_w$  se izračunava:

$$T_w = \begin{cases} avg_w + 30, & \text{ako je } avg_w \leq 128, \\ avg_w - 30, & \text{ako je } avg_w > 128. \end{cases} \quad 8.28$$

Korak 5: Srednja vrednost svakog bloka se izračunava:

$$avg_B = \frac{1}{k^2} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^k B(i, j) \quad 8.29$$

Korak 6: Proces ugrađivanja svakog bita vodenog žiga u odgovarajući blok je završen kada:

$$B'(i, j) = \begin{cases} B(i, j) + \omega \times v, & \text{ako je } avg_w < T_w, \\ B(i, j) - \omega \times v, & \text{ako je } avg_w \geq T_w, \end{cases} \quad 8.30$$

gde  $\omega$  predstavlja bit vodenog žiga, a  $v$  koeficijent umetanja bita (najveća vrednost  $v$  znači vidljiviji vodeni žig).

Korak 7: Za svaki blok se izračunavaju različite vrednosti parametara  $d_1$  i  $d_2$ :

$$d_1 = \sum_{B'(i,j) \in S_1} B'(i,j) - \sum_{B'(i,j) \in S_2} B'(i,j) - x, \quad 8.31$$

$$d_2 = \sum_{B'(i,j) \in S_1} B'(i,j) - \sum_{B'(i,j) \in S_2} B'(i,j) - y, \quad 8.32$$

gde su  $S_1, S_2$ ,  $x$  i  $y$  parametri iz tabele br.11 [136].

Korak 8: Izvršena je modifikacija piksela  $x$  u piksel  $x'$  i u piksel  $y'$

$$x' = 2 \times d_1 + \omega + \left\lfloor \frac{\sum_{B'(i,j) \in \{S_1 \cup S_2\}} B'(i,j)}{2 \times \left\lfloor \frac{k^2 - 1}{2} \right\rfloor - 1} \right\rfloor \quad 8.33$$

$$y' = \begin{cases} 2 \times d_2 + 0 + \left\lfloor \frac{\sum_{B'(i,j) \in \{S_1 \cup S_2\}} B'(i,j)}{2 \times \left\lfloor \frac{k^2 - 1}{2} \right\rfloor - 1} \right\rfloor, & \text{ako je } avg_B < T_w, \\ 2 \times d_2 + 1 + \left\lfloor \frac{\sum_{B'(i,j) \in \{S_1 \cup S_2\}} B'(i,j)}{2 \times \left\lfloor \frac{k^2 - 1}{2} \right\rfloor - 1} \right\rfloor, & \text{ako je } avg_B \geq T_w \end{cases} \quad 8.34$$

Nakon implementacije gore navedenih koraka, dobija se vidljiva slika sa vodenim žigom  $A_w$ .

**Procedura VWM algoritma za oporavak slike se realizuje kroz sledeće korake:**

Korak 1: Slika sa vodenim žigom  $A_w$  se deli na nepreklapane  $k \times k$  blokove na isti način kao u proceduri ugrađivanja, a parametri  $S'1$ ,  $S'2$ ,  $x'$  i  $y'$  se takođe mogu dobiti kao u proceduri ugrađivanja.

Korak 2: Koristeći dobijene vrednosti za parametre  $S'1$ ,  $S'2$ ,  $x'$  i  $y'$ , mogu se izračunati razlike  $d1'$  i  $d2'$  za svaki  $k \times k$  blok  $B'$  sa vodenim žigom:

$$d_1' = x' - \left\lfloor \frac{\sum_{B'(i,j) \in \{S_1 \cup S_2\}} B'(i,j)}{2 \times \left\lfloor \frac{k^2 - 1}{2} \right\rfloor - 1} \right\rfloor \quad 8.35$$

$$d'_2 = y' - \left\lfloor \frac{\sum_{B'(i,j) \in \{S_1 \cup S_2\}} B'(i,j)}{2 \times \left\lfloor \frac{k^2 - 1}{2} \right\rfloor - 1} \right\rfloor \quad 8.36$$

Korak 3: Izvučeni binarni vodeni žig  $\omega'$  iz svakog bloka može se dobiti pomoću:

$$\omega' = \text{mod}(d_1, 2) \quad 8.37$$

Korak 4: Razlike  $d_1$  i  $d_2$  se mogu dobiti pomoću:

$$d_1 = \left\lfloor \frac{d'_1}{2} \right\rfloor \quad 8.38$$

$$d_2 = \left\lfloor \frac{d'_2}{2} \right\rfloor \quad 8.39$$

Korak 5: Pikseli  $x''$  i  $y''$  se mogu ponovo izračunati u skladu sa sledećim jednačinama

$$x'' = \sum_{B'(i,j) \in S_1} B'(i,j) - \sum_{B'(i,j) \in S_2} B'(i,j) - d_1, \quad 8.40$$

$$y'' = \sum_{B'(i,j) \in S_1} B'(i,j) - \sum_{B'(i,j) \in S_2} B'(i,j) - d_2, \quad 8.41$$

ako je  $\omega' = 1$ .

Korak 6: Obnovljeni blokovi  $B''$  mogu se dobiti prema parametru  $v$ , pikseli  $x''$  i  $y''$  prema sledećoj jednačini:

$$B''(i,j) = \begin{cases} B'(i,j) - \omega' \times v, & \text{ako je } \omega_1 = 0 \\ B'(i,j) + \omega' \times v, & \text{ako je } \omega_1 = 1 \end{cases} \quad 8.42$$

gde je  $\omega_1 = \text{mod}(d_2', 2)$ .

Korak 7: Dobija se obnovljena slika  $A_r$ .

## 8.6 Eksperimentalni rezultati i analiza

### 8.6.1 Eksperiment

Da bi se simulirao FSO prenos slika sa vodenim žigom preko nultog-boresight/dvostrukog Rajsovog turbulentnog feding kanala, sproveden je sledeći eksperiment:

Korak 1: Originalna slika je obeležena vodenim žigom sa koeficijentom vodenog žiga  $v = 40$ .

Korak 2: Na sliku sa vodenim žigom  $A_w$  se primenjuje BPSK modulacija.

Korak 3: BPSK modulisani signal je prenet preko nultog-boresight/dvostrukog kroz Rajsov turbulentni feding kanal sa AWGN.

Korak 4: Slika je rekonstruisana na prijemniku nakon izvršenog Gray dekodiranja uz teško odlučivanje.

Korak 5: Iz rekonstruisane slike nakon primene VWM algoritma dobija se oporavljena slika.

Kao mera kvaliteta za prenos slike koriste se parametri BER i MSE, definisani kao:

$$BER = \frac{\sum_{ijl} [(x_{ij})_l]_2 \oplus [(y_{ij})_l]_2}{M \times N}, i = 1 \dots M, j = 1 \dots N, l = 1 \dots n \quad 8.43$$

$$MSE = \frac{\sum_{ij} (x_{ij} - y_{ij})^2}{M \times N}, \quad i = 1 \dots M, j = 1 \dots N \quad 8.44$$

gde su:  $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$  - piksel originalne slike i prenete i oporavljene slike,  $n$ -broj bitova,  $M \times N$  - veličina slike, a  $\oplus$  označava EXOR operator nad svakim od  $n$  para bitova iz  $x_{ij}$  i  $y_{ij}$  i  $\|A\|$  označava broj bita slike.

Za potrebe analize koristimo izraz zatvorene forme za BER za nulti-boresight/dvostruku Rajsovu PDF u prisustvu grešaka usmeravanja. U praksi, odnos signal-šum (SNR)

na prijemu je ograničen šumom, koji nastaje usled pozadinskog svetla i može biti mnogo jači od snage željenog signala. Na kvalitet signala može uticati i termički šum koji nastaje od elektronskih komponenti koje prate fotodetektor. Zbog toga se šum obično modeluje sa visokom preciznošću kao aditivni beli Gausov šum (AVGN) koji je statistički nezavisan od željenog signala. Prisustvo AVGN-a, može dovesti do pojave grešaka prijema kada se vrši određivanje vrednosti stvarno prenetih simbola. Uzimajući to u obzir verovatnoća greške,  $P_b(e)$  može se odrediti izračunavanjem sledeće ponderisane sume:

$$P_b(e) = p_0 p(e|0) + p_1 p(e|1) \quad 8.45$$

gde  $p_0$  označava verovatnoću transmisije binarnog simbola „0“ i  $p_1$  označava verovatnoću transmisije binarnog simbola „1“, kao što je navedeno u [149]. S druge strane,  $p(e|0)$  i  $p(e|1)$  označavaju uslovnu verovatnoću greške bita kada je prenešeni bit „0“ ili kada je prenešeni bit „1“. Pretpostavka je da je bilo koji simbol, binarnu „0“ ili binarnu „1“, podjednako moguće preneti, tj.  $p_0 = p_1 = \frac{1}{2}$ . Pod pretpostavkom da je  $p(e|0) = p(e|1)$ , onda se uslovni BER može dati kroz izraz:

$$P_b(e)p(e|0, h) = p(e|1) = Q\left(\frac{PR_h}{\sigma_N}\right) \quad 8.46$$

$$P_b(e) = \int_0^{\infty} P_b(e|h) f_h(h) dh \quad 8.47$$

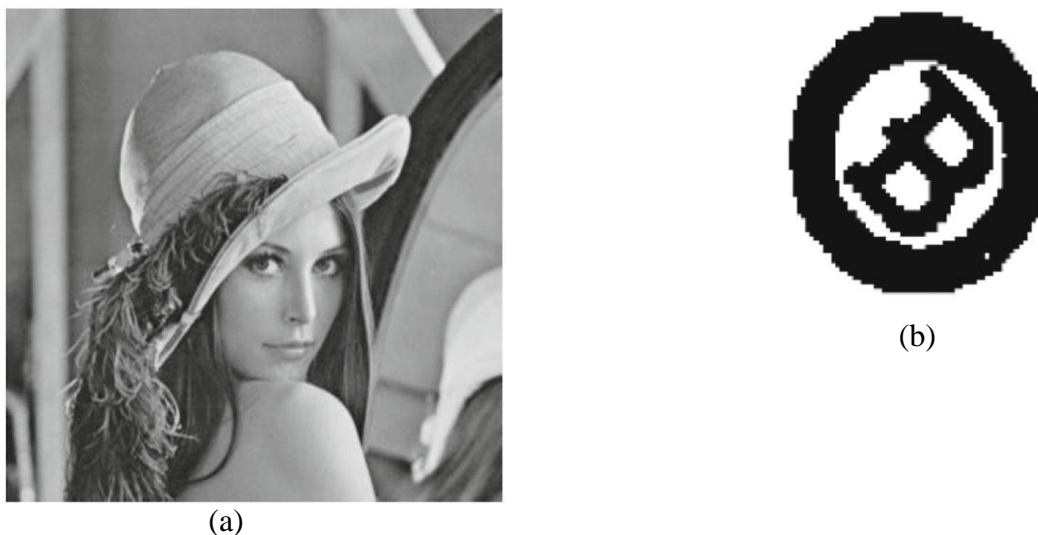
Nakon zamene (8.26) u (8.47) i uz pomoć funkcije (07.34.21.0013.01) iz [148], ABER je izveden u izraz zatvorene forme kao:

$$P_b(e) = \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} \frac{2^{p+q-2} K_1^p K_2^q e^{-K_1} e^{-K_2} A_0^2}{\pi \sqrt{\pi} \Gamma(p+1) \Gamma(q+1) p! q!} \times G_{2,6}^{7,4} \left( \frac{8PRh_1^{-2} h_2^{-2} A_0^2}{(1+K_1)^2 (1+K_2)^2 \sigma_N} \left| \begin{matrix} \frac{1-g^2}{2}, \frac{-g^2}{2}, \frac{-p}{2}, \frac{1-p}{2}, \frac{-q}{2}, \frac{1-q}{2}, 1 \\ 0, \frac{1}{2}, \frac{-g^2}{2}, \frac{1-g^2}{2} \end{matrix} \right. \right) \quad 8.47$$

## 8.7 Osnova eksperimenta i rezultati

Za potrebe eksperimenta korištene su kao osnova standardne slike (slika br. 42) : a) Lena i b) binarni vodeni žig.





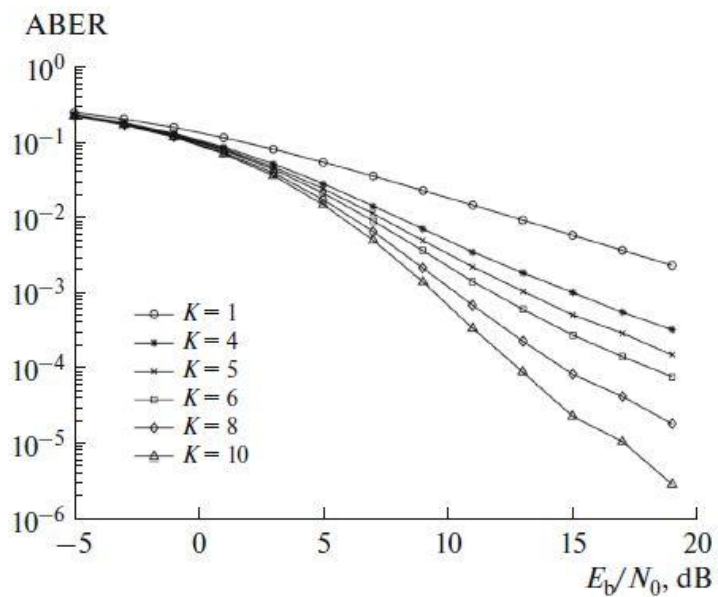
Slika br. 42 Slike: a) Lena i b) vodeni žig

Slika br. 43 prikazuje izgled slike Lena nakon insertovanja vodenog žiga sa  $k=2$  i rekonstrukcije nakon slanja FSO kanalom sa: a)  $K=5$  i  $K=10$ . Da bi se ukazalo na efekte neusklađenosti i zajedničkog uticaja turbulentnih vrtloga malih i velikih razmera, upoređeni su dobijeni rezultati sa karakteristikama prenosnih performansi Rajsovog turbulentnog kanala iz [106].

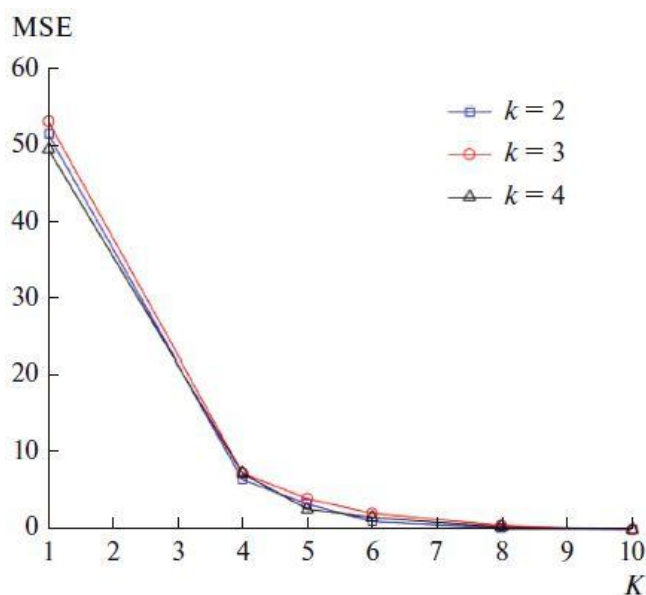


Slika br.43 Rekonstrisane slike Lena obeležene vodenim žigom sa  $k=2$ , za vrednost a)  $K=5$  i b)  $K=10$

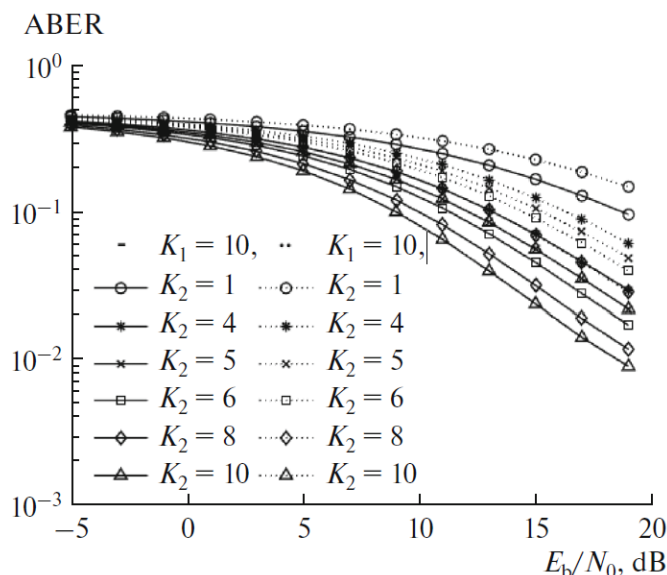
Na slikama br. 44 i 45 su predstavljeni standardni kriterijumi performansi FSO prenosa preko Rajsovog turbulentnog kanala. Na slici br. 44 prikazani su grafovi ABER za prenetu sliku Lena, za različite vrednosti Rajsovog parametra  $K = \{1, 4, 5, 6, 8, 10\}$ ), dok su na slici br. 45 prikazani grafovi MSE za rekonstruisane slike, za različite vrednosti veličine bloka parametra  $k=\{2, 3, 4\}$ , a nakon prenosa sa različitim vrednostima parametra  $K=\{1, 4, 5, 6, 8, 10\}$



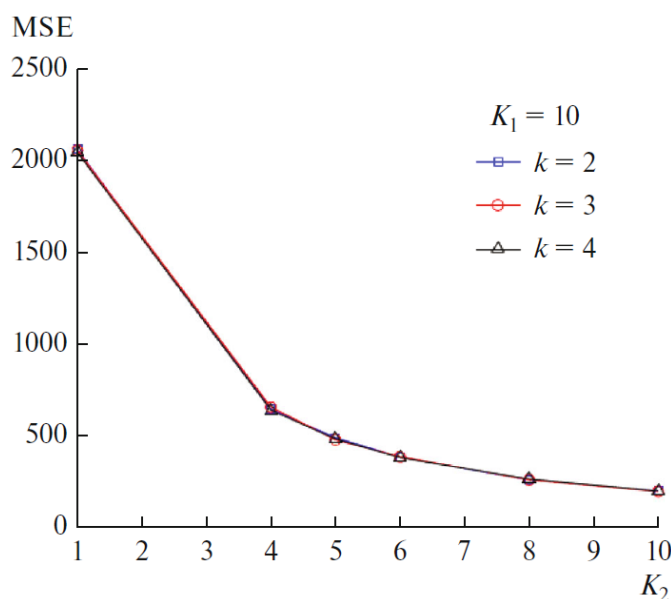
Slika br. 44 Kvalitativno merenje ABER prenetu slike Lena



Slika br. 45 Kvalitativno merenje MSE za prenetu sliku Lena preko Rajsovih uslova turbulencije za različite vrednosti parametra veličine bloka  $k$



Slika br. 46 Kvalitativno merenje ABER prenete slike Lena (dimenzija bloka  $k = 2$ ) za različite vrednosti  $K_1$  i  $K_2$



Slika br. 47 Kvalitativno merenje MSE za prenetu sliku Lena preko boresighta/dvostruke Rajsbove turbulencije za različite vrednosti parametra veličine bloka  $k$ .

Da bi se ukazalo na efekte neusklađenosti i zajedničkog uticaja turbulentnih vrtloga malih i velikih razmera, upoređeni su rezultati sa svojstvima prenosnih performansi Rajsovog turbulentnog kanala iz [144].

Posmatrajmo FSO prenos preko boresight/dvostrukog Rajsovog turbulentnog kanala, za boresight model neusklađenosti i sledeće vrednosti parametara:  $g = 1,25$ ,  $A_0 = 0,0197921$ , koje odgovaraju praktičnom slučaju. Na slici br. 46 prikazane su vrednosti ABER za rekonstruisanu sliku, za različite vrednosti parametra veličine bloka  $k=2$ , nakon prenosa kroz

boresight/dvostruki Rajsov turbulentni kanal za različite vrednosti parametra  $K_1$  i  $K_2$  u opsegu od  $\{1, 4, 5, 6, 8, 10\}$ . Na slici br. 47 je prikazan MSE karakteristika za rekonstruisanu sliku, za različite vrednosti parametra veličine bloka  $k = \{2, 3, 4\}$ , a nakon prenosa kroz boresight/dvostruki Rajsov turbulentni kanal sa različitim vrednostima parametra  $K_1$  i  $K_2$  u opsegu od  $\{1, 4, 5, 6, 8, 10\}$ .

Na slici br.48 prikazana je slika Lena nakon ubacivanja vodenog žiga sa  $k = 2$ , rekonstruisanu nakon prenosa kroz boresight/dvostruki Rajsov turbulentni kanal sa različitim vrednostima parametra  $K_1$  i  $K_2$ : (a)  $K_1 = 5$  i  $K_2 = 5$ , (b)  $K_1 = 5$  i  $K_2 = 10$ , (c)  $K_1=10$  i  $K_2=5$ , (d)  $K_1=10$  i  $K_2=10$ .



(a)



(b)



(c)



(d)

Slika br. 48 Slika Lena obeležena vodenim žigom sa  $k=2$ , rekonstruisana nakon prenosa sa  $K_1=5, K_2=5$  (a),  $K_1=5, K_2=10$  (b),  $K_1=10, K_2=5$  (c),  $K_1=10, K_2=10$  (d)

## 8.8 Analiza rezultata

Na osnovu rezultata prikazanih na slici br. 44 može se zaključiti da slika sa utisnutim vodenim žigom i blokom umetanja veličine  $k = 2$  i prenesen sa Rajsovim parametrom  $K = 10$  nema vizulanih oštećenja. Oblast slike sa vodenim žigom nakon rekonstrukcije je sa minimalnim oštećenjem. U slici sa vodenim žigom i blokom umetanja veličine  $k = 2$  i prenesena sa Rajsovim parametrom  $K = 1$  vizualno je primetan šum i nakon rekonstrukcije slike koja je obeležena takođe ima oštećenja. Međutim, performanse prenosa se pogoršavaju kada se pojave karakteristike prenosa usled neusklađenosti i zajedničkog uticaja turbulentnih vrtloga malih i velikih razmera.

Na osnovu slike br.46 može se zaključiti da se vrednosti  $BER < 10^{-2}$  za  $SNR > 20$  i za  $K_1$  i  $K_2 > 8$  i sa rastom  $SNR$  i  $K_1$  i  $K_2$ , BER performance smanjuju.

Na osnovu grafika prikazanog na slici br. 47 može se zaključiti da se slika sa vodenim žigom, sa definisanim blokom veličine  $k = 2$  za vodeni žig i sa parametrima turbulencije  $K_1$  i  $K_2 > 10$  daje rekonstruisanu sliku sa  $100 < MSE < 50$ .

Za potrebe eksperimentalne analize prenesene VWM slike za uklanjanje vodenog žiga, korišćena je slika inverznog binarnog vodenog žiga. Vodeni žig se ubacuje sa koeficijentom umetanja  $u = 40$ , u blokovima veličine  $k = \{2, 3, 4\}$ . Parametri turbulencije  $K_1$  i  $K_2$  variraju u opsegu  $\{1, 4, 5, 6, 8, 10\}$ . Nakon poređenja vizuelnog izgleda oporavljene slike, pre prenosa i oporavljene slike nakon prenosa preko nultog-boresight/dvostrukog-Rajsovog turbulentnog kanala sa različitim vrednostima veličine bloka i Rajsovog parametra, zaključuje se da je oporavljena slika nakon prenosa preko nultog-boresight/dvostrukog-Rajsovog turbulentnog kanala, dobrog kvaliteta za veličinu umetanja bloka  $k = 2$  i nultog-boresight/dvostrukog-Rajsovog parametre  $K_1$  i  $K_2 > 8$ . Takođe, MSE pokazuje da je oporavljena slika, nakon prenosa, dobrog kvaliteta za veličinu umetanja bloka  $k = 2$  i nultog-boresight/dvostrukog-Rajsovog parametre  $K_1$  i  $K_2 > 8$ . Na kraju se može zaključiti da se vidljivi vodeni žig u bloku veličine  $k = 2$  može se uspešno preneti sa nultim-boresight/dvostrukim Rajsovim parametrima  $K_1$  i  $K_2 > 8$ .

## 9. ZAKLJUČAK

Karakteristika bežičnih komunikacionih sistema je „pate“ od pojave fedinga, što dovodi do degradacije u kvalitetu prenosa podataka. Kao posledicu fedinga imamo prostiranje osnovnog signala po višestrukim putanjama što dovodi do promene i slabljenja rezultujućeg signala na prijemu, a kada uz to imamo i kretanje senzorskog čvora ili pak prepreke na pravcu propagacije onda rezultujući signal na prijemu poprima amplitudne i fazne promene u rezultujućem signalu.

Predmet disertacije jeste uticaj fedinga ili scintilacije (kod optičkih prenosnih sistema) na prenos slike ili drugih oblika podataka kroz komunikacioni kanal bežične senzorske mreže u bežičnim nosivim telesnim senzorskim mrežama za vojnu primenu. U radu je razmatrano više modela fedinga i izvedene su odgovarajući statističke karakteristike za ove modele, kao posledica slučajnih pojava koje utiču na pojavu fedinga kao slučajnog procesa. Cilj razvoja novih modela je doći do adekvatnog modela mobilnog kanala čija će statistika dati najbolju procenu datog bežičnog sistema. Optička komunikacija slobodnog prostora (FSO) je tehnologija koja može da se upotrebi za povezivanje u optičkim mrežama za vojnu primenu i otkloni efekte „uskog grla“ koji se mogu javiti na poslednjim rastojanjima do kontrolnog centra. FSO komunikacija koristi modulisanu optičku zraku za uspostavljanje bežične komunikacije. Upotreba bežičnih senzorskih mreža na bojištu može biti ograničena u uslovima intenzivnog radio ometanja, zbog čega je upotreba FSO veze poželjna i neophodna, jer ih je teško presresti i imune su na smetnje ili ometanje iz spoljnih izvora. Mogućnost upotrebe na teško pristupačnim lokacijama, bez potrebnih licenci, jeftine implementacije i realizacije u odnosu na radio frekventne komunikacione sisteme i znatno veće brzine prenosa, FSO komunikacionim sistemima daju značajnu prednost i perspektivu. Glavni nedostatak FSO komunikacija je uticaj atmosferskih prilika na optički signal. Atmosferski efekti kao što su slabljenje i turbulencija mogu degradirati optičke veze.

Upotreba FSO komunikacionog sistema u bežičnim senzorskim mrežama daje mogućnost kombinovanja sa RF komunikacionim sistemima u obliku hibridne mreže, koja obezbeđuje dodatnu pouzdanost, gde se na ovaj način prevazilaze nedostaci i jednog i drugog sistema. Jedna od prednosti FSO sistema je mogućnost postizanja velikih brzina i na relativno velikim udaljenostima. Takođe jedna od prednosti FSO sistema je nemogućnost presretanja komunikacija i prisluškivanja, zbog čega predstavlja dobro rešenje za vojnu primenu.

Na osnovu dobijenih rezultata u radu, može se zaključiti da je optimalna šema komunikacije bežičnih senzorskih uređaja u bežičnim nosivim telesnim senzorskim mrežama za vojnu primenu kombinacija FSO i RF komunikacije koja omogućava bolju pouzdanost na fizičkom nivou mreže u odnosu na konvencionalnu RF čemu komunikacije, jer u uslovima intenzivnog ometanja verovatnoće prisluškivanja je znatno manja.

U radu su analizirane i dokazane performanse prenesene VWM slike preko kanala nultog boresight/dvostrukog Rajsovog turbulentnog kanala. Predložen je novi model turbulencije, odnosno nulti-boresight/dvostruki-Rajsov model. U radu je analiziran uticaj fedinga na prenos slike, kao jednog od najkompleksnijeg tipa podatka, sa insertovanim vidljivim digitalnim vodenim žigom kroz FSO kanal. Najznačajniji naučno stručni doprinos izložen u ovoj disertaciji je:

- Razvoj novog rešenja hibridnog RF/FSO sistema bežične nosive telesne senzorske mreže, koja svoju osnovnu namenu može naći kako u vojsci, tako i u drugim bezbednosnim strukturama za brzo reagovanje u kriznim situacijama.
- Razvijen je novi model za simulaciju prenosa slike kroz nulti-boresight/dvostruki-Rajsov turbulentni FSO kanal, koji se može efikasno koristiti u daljem razvoju hibridnih RF/FSO bežičnih sistema prenosa.

Mogući pravci budućih istraživanja u ovoj oblasti:

- Razvoj efikasnijeg modela za simulaciju prenosa poverljivih podataka kroz turbulentni FSO komunikacioni kanala.
- Razvoj praktičnog, modularnog, mobilnog i lako nosivog modela hibridne RF/FSO sistema bežične nosive telesne senzorske mreže, sa ciljem efikasnog praćenja životnih funkcija lica u ekstremnim uslovima naprezanja.
- Razvoj efikasnog modela prenosa podataka sa bojišta (ili mesta akcidenta) do monitoring centra u cilju pravovremenog i efikasnog upravljanja ljudskim i materijalnim resursima angažovanim na rešavanju date situacije u realnom vremenu bez gubitka vitalnih podataka u prenosu.

## LITERATURA

- [1] M. Sole, C. Musu, F. Boi, D. Giusto and V. Popescu, "Control system for workplace safety in a cargo terminal," in *9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Sardinia, Italy, 2013.
- [2] R. Loeppke, T. Hohn, C. Baase, W. Bunn, W. Burton, B. Eisenberg, T. Ennis, R. Fabius, J. Hawkins, W. Hudson, P. Hymel, D. Konicki, P. Larson, R. McLellan, M. Roberts, C. Usrey and Wallac, "Integrating Health and Safety in the Workplace," *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 57, no. 5, pp. 585-597, 2015.
- [3] A. Grilo, K. Piotrowski, P. Langendoerfer and A. Casaca, "A Wireless Sensor Network Architecture for Homeland Security Application," in *8th International Conference, ADHOC-NOW 2009*, Murcia, Spain, 2009.
- [4] A. Kott, A. Swami and B. J. West, "The Internet of Battle Things," *Computer*, vol. 49, no. 12, pp. 70 - 75, 2016.
- [5] M. Chammem, S. Berrahal and N. Boudriga, "Smart navigation for firefighters in hazardous environments: A ban-based approach," in *7th International Conference on Pervasive Computing and Application (ICPCA) and the 4th International Symposium of Web Society (SAS)*, Istanbul, Turkey, 2012.
- [6] P. Bonato, "Advances in wearable technology and applications in physical medicine and," *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, vol. 2, no. 2, 2005.
- [7] C. E. Perkins, E. M. Royer, S. R. Das and M. K. Marina, "Performance Comparison of Two On-Demand Routing Protocols for Ad Hoc Networks," *IEEE Personal Communications* , vol. 8, no. 1, pp. 16-28, 2001.
- [8] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam and E. Cayirci, "Wireless sensor networks: A survey," *Computer Networks Vol. 38*, pp. 393-422, 2002.
- [9] H. Aznaoui, S. Raghay, L. Aziz and A. Ait-Mlouk, "A comparative study of routing protocols in WSN," in *5th International Conference on Information & Communication Technology and Accessibility (ICTA)*, Marrakech, 2015.
- [10] M. P. Đurišić, Z. Tafa, G. Dimić and V. Milutinović, "A survey of military applications of wireless sensor networks," in *Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO)*, Bar, Crna Gora, 2012.
- [11] V. Stanford, "Using pervasive computing to deliver elder care," *IEEE Pervasive Computing* , vol. 1, no. 1, pp. 10-13, 2002.



- [12] T. McFadden and J. Indulska, "Context-aware environments for independent living," in *3rd National Conference of Emerging Researchers*, Brisbane, 2004.
- [13] "https://www.debiotech.com/," Debiotech S.A., 12 12 2019. [Online]. Available: <https://www.debiotech.com/>. [Accessed 20 2 2020].
- [14] C. Krulak, "The Strategic Corporal: Leadership in the Three Block War," *Marine Corps Gazette*, vol. 83, no. 1, pp. 18-22, 1999.
- [15] M. Milanović, M. Stojilović, M. Oklobdžija and G. Dimić, "Adaptacija bežične senzorske mreže u cilju detekcije i dojava kritičnih situacija," in *INFOTEH*, Jahorina, 2012.
- [16] A. Chatterjee and M. Pandey, "Practical Applications Of Wireless Sensor Network Based On Military, Environmental, Health And Home Applications: A Survey," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 5, no. 1, pp. 1043-1050, 2014.
- [17] P. S. Cannon and C. R. Harding, "Future Military Wireless Solutions, Ch.8," in *Wireless Communications: The Future*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007, pp. 91-116.
- [18] D. J. Cooky, J. C. Augustoz and V. R. Jakkulay, "Review: Ambient intelligence: Technologies, applications, and opportunities," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 5, no. 4, pp. 277-298, 2009.
- [19] C. Intanagonwiwat, R. Govindan and D. Estrin, "Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks.," in *MobiCom '00: Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, Boston, USA, 2000.
- [20] P. Mohseni and K. Najaf, "1.48-mw low-phase-noise analog frequency modulator for wireless biotelemetry," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 52, no. 5, pp. 938 - 943, 2005.
- [21] J. Khakurel, H. Melkas and J. Porras, "Tapping into the wearable device revolution in the work environment: a systematic review," *Information Technology & People*, vol. 31, no. 3, pp. 791-818, 2018.
- [22] R. Cavallari, F. Martelli, R. Rosini, C. Buratti and R. Verdone, "A survey on wireless body area networks: technologies and design challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1635-1657, 2014.

- [23] M. Salayma, A. Y. Al-Dubai, I. Romdhani and Y. Nasser, "Wireless Body Area Network (WBAN): A Survey on Reliability, Fault Tolerance, and Technologies Coexistence," *ACM Computing Surveys*, vol. 50, no. 1, p. 38, 2017.
- [24] A. Darwish and A. E. Hassanien, "Wearable and Implantable Wireless Sensor Network Solutions for Healthcare Monitoring," *Sensors*, vol. 11, no. 6, p. 5561–5595, 2011.
- [25] M. R. Yuce, "Implementation of wireless body area networks for healthcare systems," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 162, no. 1, pp. 116-129, 2010.
- [26] A.-A. Hamid Ali Abed, "Energy Efficient Hierarchical Clustering Mechanism for Wireless Sensor Network Fields," *International Journal of Computer Applications*, vol. 153, no. 8, pp. 42-46., 2016.
- [27] J. Bilal, F. Haleem, H. Javed, M. Bartolomeo, K. Murad and S. Ali, "Energy Efficient Hierarchical Clustering Approaches in Wireless Sensor Networks: A Survey," *Wireless Communications and Mobile Computing* , vol. 2017, p. 14, 2017.
- [28] T. A. Sheikh, D. Muchahary and K. C. Baruah, "A Survey of Reduction the Interference on Cellular Communication System," *International Journal of Computer Applications*, vol. 95, no. 10, pp. 40-43, 2014.
- [29] Z. Jin, Y. Han, J. Cho and B. Lee, "Prediction Algorithm for Coexistence Problem in Multiple-WBAN Environment," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, p. 8, 2015.
- [30] A. T. Barth, B. H. Calhoun, P. J. Harry C., J. H. Aylor, J. Lach, K. Ringgenberg and M. A. Hanson, "Body Area Sensor Networks: Challenges and Opportunities," *Computer*, vol. 42, no. 1, pp. 58-65, 2009.
- [31] Z. Jin, Y. Han, J. Cho and B. Lee, "A Prediction Algorithm for Coexistence Problem in Multiple-WBAN Environment," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, p. 8, 2015.
- [32] T. R. Leffingwell, N. J. Cooney, J. G. Murphy, S. Luczak, G. Rosen, D. M. Dougherty and N. P. Barnett, "Continuous Objective Monitoring of Alcohol Use: 21st Century Measurement using Transdermal Sensors," *Alcoholism, clinical and experimental research*, vol. 37, no. 1, pp. 16-22, 2013.
- [33] J. Ahmad and F. Zafar, "Review of Body Area Network Technology & Wireless Medical Monitoring," *International Journal of Information and Communication Technology Research*, vol. 2, no. 2, pp. 186-188, 2012.

- [34] A. C. W. Wong, M. Dawkins, G. Devita, N. Kasparidis, A. Katsiamis, O. King, F. Lauria, J. Schiff and A. J. Burdett, "A 1 V 5 mA Multimode IEEE 802.15.6/Bluetooth Low-Energy WBAN Transceiver for Biotelemetry Applications," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 1, pp. 186-198, 2013.
- [35] "IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications f," *IEEE Std 802.15.4-2006*, pp. 1-305, 2006.
- [36] "IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirement Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications fo," *IEEE Std 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std 802.15.4-*, pp. 1-203, 2007.
- [37] M. Chen, S. Gonzalez, A. Vasilakos, H. Cao and V. C. M. Leung, "Body Area Networks: A Survey," *Mobile Networks and Applications*, vol. 16, no. 2, pp. 171-193, 2011.
- [38] R. Cavallari, F. Martelli, R. Rosini, C. Buratti and R. Verdone, "A Survey on Wireless Body Area Networks: Technologies and Design Challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 3, pp. 1635 - 1657, 2014.
- [39] M. Othman, "Pervasive computing," [Online]. Available: <http://pervasivecomputinginfo.blogspot.com/2018/10/ieee-802156-standard.html>. [Accessed 21 02 2022].
- [40] J. Ljorca, A. Desai, U. Vishkin, C. C. Davis and S. D. Milner, "Reconfigurable optical wireless sensor networks," *SPIE Remote Sensing*, vol. 5237, no. 1, pp. 136-146, 2004.
- [41] D. Kedar and S. Arnon, "Non-line-of-sight optical wireless sensor network operating in multiscattering channel," *Applied Optics*, vol. 45, no. 33, pp. 8454-8461, 2006.
- [42] J. B. Carruther and J. M. Kahn, "Angle diversity for nondirected wireless infrared communication," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 6, pp. 960-969, 2000.
- [43] K. Sharma and M. K. Ghose, "Wireless Sensor Networks: An Overview on its Security Threats," *IJCA Special Issue on "Mobile Ad-hoc Networks" MANETs*, pp. 42-45, 2010.
- [44] C. Karlof and D. Wagner, "Secure routing in wireless sensor networks: attacks and countermeasures," *Ad Hoc Networks*, vol. 1, no. 2-3, pp. 293-315, 2003.

- [45] E. Shi and A. Perrig, "Designing secure sensor networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 38-43, 2004.
- [46] C. P. Pfleeger, *Security in Computing*, Upper Saddle River: Prentice Hall Professional, 2003.
- [47] C. B. Yahya, "The role of optoelectronics in enabling low power," in *9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, 2007.
- [48] Equivital Hidalgo Ltd., [Online]. Available: <https://www.equivital.com/>. [Accessed 15 01 2020].
- [49] F. Karl, B. Mark, T. William, P. Adam, M. Glen. and H. Reed, "Real Time Physiological Status Monitoring (RT-PSM): Accomplishments, Requirements, and Research Roadmap," US Army Research Institute of Environmental Medicine, Natick, Massachusetts, 2016.
- [50] T. J. W.A., "The Personal Monitor and Communicator (PMC): An Electronic Dogtag," West LaFayette, Ind: Purdue Research Foundation, 1989.
- [51] B. Mark J., H. Reed W., A. J., L. William A. and F. B., "Enhancing warfighter readiness through physiologic situational awareness - The warfighter physiological status monitoring - Initial capability," in *International Conference on Augmented Cognition*, Mahwah, New Jersey, 2005.
- [52] I. Phil, "Nonin Medical, Inc.," Noninvasive patient monitoring devices for healthcare, [Online]. Available: <https://www.nonin.com/technologies/pulse-oximetry/>. [Accessed 29 January 2020].
- [53] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645-1660, 2013.
- [54] G. Singh, "Internet of Things Advancement in Defence," *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology Special-Issue EATHD-2015*, pp. 28-37, 2015.
- [55] A. Oracevic, S. Dilek and S. Ozdemir, "Security in internet of things: A survey," in *International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, Marrakech, Morocco, 2017.
- [56] C. Otto, A. Milenković, C. Sanders and E. Jovanov, "System architecture of a wireless body area sensor network for ubiquitous health monitoring," *Journal of Mobile Multimedia*, vol. 1, no. 4, pp. 307-326, 2006.

- [57] E. Jovanov, A. Milenkovic, C. Otto and P. C. De Groen, "A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation," *Journal of Neuro Engineering and Rehabilitation*, vol. 2, no. 6, p. 10, 2005.
- [58] G. B. Marković and M. L. Dukić, "Bežične senzorske mreže, I deo: Osnovna arhitektura, karakteristike i primene," *Telekomunikacije, Vol.3, RATEL*, 2008.
- [59] G. B. Marković and M. L. Dukić, "Bežične senzorske mreže, II deo: Pregled komunikacione arhitekture," *Telekomunikacije, Vol.7, RATEL*, 2008.
- [60] S. K. Singh, M. Singh and D. Singh, "Routing Protocols in Wireless Sensor Networks- A Survey," *International Journal of Computer Science & Engineering Survey*, vol. 1, no. 2, pp. 63-82, 2010.
- [61] M. S. Rajković, G. B. Marković and M. L. Dukić, "Hijerarhijski DSCC protokol rutiranja za energetski heterogene WSN," *Infoteh-Jahorina*, vol. 11, pp. 367-372, 2012.
- [62] M. Mrkaja, "Prilagodljivi (dinamički) algoritmi za rutiranje," in *Infoteh, Jahorina*, 2005.
- [63] THALES, "Hermes Partnership," 2012. [Online]. Available: <http://www.hermes-europe.net/files/meetings-and-workshops-from-sept-2011/ban-workshop-at-bodynets-2012/schillaci/workshoposlo-rev-1-thales-italia.pdf>. [Accessed 30 January 2020].
- [64] M.Niedermeier, X.He, H.Meer, C.Buschmann, K.Hartmann, B.Langmann, M.Koch, S.Fischer and D.Pfisterer, "Critical Infrastructure Surveillance Using Secure Wireless Sensor Networks," *Journal of sensor and actuator networks, Vol. 4, Iss. 4*, pp. 336-370, 2015.
- [65] J. N. Al-Karaki and A. E. Kamal, "Routing techniques in wireless sensor networks: a survey," *IEEE wireless communications*, vol. 11, no. 6, pp. 6-28, 2004.
- [66] I. Akyildiz and M. Vuran, "Wireless Sensor Networks, Series in Communications and Networking," *John Wiley & Sons*, vol. 6, pp. 17-33, 2010.
- [67] D. Boyle and T. Newe, "Security Protocols for Use with Wireless Sensor Networks: A Survey of Security Architectures," in *Third International Conference on Wireless and Mobile Communications*, Guadeloupe, French Caribbean, 2007.
- [68] D. Goyal and M. R. Tripathy, "Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey," in *Second International Conference on Advanced Computing & Communication Technologies*, Rohtak, Haryana, India, 2012.
- [69] D. Lee, "Energy Harvesting Chip and the Chip Based Power Supply Development for a Wireless Sensor Network," *Multidisciplinary Digital Publishing Institute - Sensors*, vol. 8, pp. 7690-7714, 2008.

- [70] R. D'Errico and L. Ouvry, "A Statistical Model for On-Body Dynamic Channels," *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 17, pp. 92-104, 2010.
- [71] L. C. Andrews and R. L. Phillips, Laser beam propagation through random media, SPIE Optical Engineering Press, 2005.
- [72] E. Jakeman and P. Pusey, "Significance of k distributions in scattering experiments," *Physical Review Letters*, vol. 40, no. 9, pp. 546-550, 1978.
- [73] A. Al-Habash, L. C. Andrews and R. L. Phillips, "Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media," *Optical Engineering*, vol. 40, no. 8, pp. 1554-1562, 2001.
- [74] A. Jurado-Navas, J. M. Garrido-Balsells, J. F. Paris and A. Puerta-Notario, "A unifying statistical model for atmospheric optical scintillation," in *Numerical Simulations of Physical and Engineering Processes*, London, United Kingdom, IntechOpen, 2011, pp. 181-208.
- [75] N. D. Chatzidiamantis, H. G. Sandalidis, G. K. Karagiannidis, S. A. Kotsopoulos and M. Matthaiou, "New results on turbulence modeling for free-space optical systems," in *17th International Conference on Telecommunications*, Doha, Qatar, 2010.
- [76] G. L. Stüber, Principles of Mobile Communication, Springer International Publishing AG, 2017.
- [77] W. C. Lee, Mobile Communications Engineering: Theory and Applications, McGraw Hill Education, 2017.
- [78] J. G. Proakis and M. Salehi, Digital Communications, McGraw Hill, 2008.
- [79] J. Parsons, The Mobile Radio Propagation Channel, 2nd Edition, New York: Wiley, 2000.
- [80] D. Greenwood and L. Hanzo, "Characterization of mobile radio channels," in *Signal Processing for Mobile Communications Handbook*, London, CRC Press, 1992, pp. 163-185.
- [81] M. K. Simon and M.-S. Alouini, Digital Communication over Fading Channels, 2nd Edition, New York: Wiley, 2004.
- [82] J. M. Garrido-Balsells, A. Jurado-Navas, J. F. Paris, M. Castillo-Vazquez and A. Puerta-Notario, "Novel formulation of the  $\mathcal{M}$  model through the Generalized-K distribution for atmospheric optical channels," *Optics Express*, vol. 23, no. 5, pp. 6345-6358, March 2015.

- [83] W. K. Pratt, *Laser communication systems*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1969.
- [84] B. S. S. Naimullah, S. Hitam, N. S. M. Shah, M. Othman, S. B. A. Anas and M. K. Abdullah, "Analysis of the effect of haze on free space optical communication in the Malaysian environment," in *International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications*, Penang, Malaysia, 2007.
- [85] O. Bouchet, M. El Tabach, M. Wolf, D. C. O'Brien, G. E. Faulkner, J. W. Walewski, S. Randel, M. Franke, S. Nerreter, K.-D. Langer, J. Grubor and T. Kamalakis, "Hybrid wireless optics (HWO): Building the next-generation home network," in *6th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing*, Graz, Austria, 2008.
- [86] M. J. and D. C., "Free Space Optics: Fixed Wireless Broadband," The Strategis Group, 2000.
- [87] R. M. Gagliardi and S. Karp, *Optical Communications*, New York: John Wiley, 1995.
- [88] W. O. Popoola and Z. Ghassemlooy, "BPSK subcarrier intensity modulated freespace optical communications in atmospheric turbulence," *Journal of Lightwave*, vol. 27, pp. 967-973, 2009.
- [89] G. Valley and e. C., "Isoplanatic Degradation of Tilt Correction and Short-term Imaging," *Applied Optics*, vol. 19, no. 4, pp. 574-577, 1980.
- [90] L. C. Andrews, R. L. Phillips and C. Y. Hopen, *Laser Beam Scintillation with Applications*, Bellingham: SPIE, 2001.
- [91] J. Li and M. Uysal, "Achievable information rate for outdoor free space optical communication with intensity modulation and direct detection," in *GLOBECOM '03. IEEE Global Telecommunications Conference*, San Francisco, 2003.
- [92] J. W. Goodman, *Statistical Optics*, New York: John Wiley, 1985.
- [93] R. Ramaswami, K. Sivarajan and G. Sasaki, *Optical networks- a practical perspective* 3rd edition, Burlington: Morgan Kaufmann, 2009.
- [94] M. J. N. Sibley, *Optical Communications*, London: Macmillian Press Limited, 1995.
- [95] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 5th Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2021.
- [96] J. H. Churnside and R. G. Frehlich, "Experimental evaluation of log-normally modulated Rician and IK models of optical scintillation in the atmosphere," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 6, no. 11, pp. 1760-1766, 1989.

- [97] H. Zhou, W. Xie, L. Zhang, Y. Bai, W. Wei and Y. Dong, "Performance analysis of FSO coherent BPSK systems over Rician turbulence channel with pointing errors," *Optics Express*, vol. 27, no. 19, pp. 27062-27075, 2019.
- [98] H. G. Sandalidis, T. A. Tsiftsis, G. K. Karagiannidis and M. Uysal, "BER Performance of FSO Links over Strong Atmospheric Turbulence Channels with Pointing Errors," *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 44-46, 2008.
- [99] A. Belmonte and J. M. Kahn, "Performance of synchronous optical receivers using atmospheric compensation techniques," *Optics Express*, vol. 16, no. 18, p. 14151–14162, 2008.
- [100] D. Vučković, B. Prlinčević, P. Spalević, S. Panić and H. Škrijelj, "Performance analysis of FSO transmission of image processing fire detection over Rician fading channels," in *24th International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK*, Portoroz, 2015.
- [101] M. Nakagami, "The m-Distribution—A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading," in *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, Los Angeles, 1960.
- [102] J. H. Churnside and S. F. Clifford, "Log-normal Rician probability-density function of optical scintillations in the turbulent atmosphere," *Journal of the Optical Society of America*, vol. 4, no. 10, pp. 1923-1930, 1987.
- [103] K. P. Choi, "On the Medians of the Gamma Distributions and an Equation of Ramanujan," *Proceedings of the American Mathematical Society*, vol. 12, no. 1, pp. 245-251, 1994.
- [104] L. Babu and B. Srinivasan, "Characterizing the Atmospheric Effects On Laser Beam Propagation For Free Space Optical Communication," in *14th National Conference on Communications*, Bombay, 2007.
- [105] L. Dordova and O. Wilfert, "Laser Beam Attenuation Determined by the Method of Available Optical Power in Turbulent Atmosphere," *Journal of Telecommunications and Information Technology*, pp. 53-57, 2009.
- [106] A. A. Farid and S. Hranilovic, "Outage Capacity Optimization for Free-Space Optical Links With Pointing Errors," *Journal Of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1702-1710, 2007.
- [107] M. A. Al-Habash, L. Andrews and R. L. Philips, "Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media," *Optical Engineering*, vol. 40, no. 8, pp. 1554-1562, 2001.



- [108] H. Tao, L. Chongmin, J. M. Zain and A. N. Abdalla, "Robust Image Watermarking Theories and Techniques: A Review," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 122-138, 2014.
- [109] Y. Zhang, "Digital Watermarking Technology: A Review," in *In Proceedings of the ETP International Conference on Future Computer and Communication*, Wuhan, China, 2009.
- [110] R. F. Olanrewaju, *Development of Intelligent Digital Watermarking via Safe Region*, Selangore: Ph.D. Thesis, Kulliyah of Engineering, International Islamic University Malaysia, 2011.
- [111] F. Zhang and H. Zhang, "Digital Watermarking Capacity and Reliability," in *The IEEE International Conference on e-Commerce Technology*, San Diego, USA, 2004.
- [112] S. Katti, V. R. Namuduri and K. Namuduri, "A Practical Approach for Evaluating the Capacity of Watermarking Channel," in *The International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing*, Chennai, India., 2005.
- [113] N. M. Makbol and B. E. Khoo, "Comment on Robust Blind Image Watermarking Scheme Based on Redundant Discrete Wavelet Transform and Singular Value Decomposition," in *AEUE - International Journal of Electronics and Communications*, 2013.
- [114] L. Pérez-Freire, P. Comesaña, J. R. Troncoso-Pastoriza and F. Pérez-González, "Watermarking Security: A Survey.," in *Transactions on Data Hiding and Multimedia Security*, Berlin, Germany, Springer, 2006, pp. 41-72.
- [115] A. K. Singh, B. Kumar, G. Singh and A. Mohan, *Medical Image Watermarking*, Berlin/Heidelberg, Germany: Springer, 2017.
- [116] C. D. Vleeschouwer, J.-F. Delaigle and B. Macq, "Invisibility and Application Functionalities in Perceptual Watermarking-An Overview.," *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 1, pp. 64-77, 2002.
- [117] N. -I. Wu and M. -S. Hwang, "Data Hiding: Current Status and Key Issues," *International Journal of Network Security*, vol. 4, no. 1, pp. 1-9, 2011.
- [118] M. U. Celik, G. K. Sharma, E. Saber and A. M. Tekalp, "Hierarchical Watermarking for Secure Image Authentication with Localization," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 11, no. 6, pp. 585-595, 2002.

- [119] D. P. Mukherjee, S. Maitra and S. T. Acton, "Spatial Domain Digital Watermarking of Multimedia Objects for Buyer Authentication," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 6, no. 1, pp. 1-15, 2004.
- [120] N. Nikolaidis and I. Pitas, "Robust Image Watermarking in the Spatial Domain," *Signal Processing* 66 (1998) 385—403, vol. 66, pp. 385-403, 1998.
- [121] E. Najafi, "A robust embedding and blind extraction of image watermarking based on discrete wavelet transform," *Mathematical Sciences*, vol. 11, pp. 307-3018, 2017.
- [122] W. C. Chu, "DCT-based image watermarking using subsampling," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 5, no. 1, pp. 34-38, 2003.
- [123] Z. Milivojevic, B. Princevic and D. Brodic, "Performance of DDS Algorithm for Insertion of Double Watermark," in *International scientific conference UNITECH*, Gabrovo, Bulgaria, 2014.
- [124] R. Liu and T. Tan, "An SVD-based watermarking scheme for protecting rightful ownership," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 4, no. 1, pp. 121-128, 2002.
- [125] J. Liu, X. Niu and W. Kong, "Image Watermarking Based on Singular Value Decomposition," in *International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia*, Pasadena, USA, 2006.
- [126] B. Princevic, Z. Milivojevic and D. Brodic, "Efficiency of MBD algorithm for filtering watermarked images," in *XIX conference IT*, Montenegro, 2014.
- [127] M. Evans, N. Hastings and B. Peacock, *Probability Density Function and Probability*, New York: Wiley, 2000.
- [128] K. Oldham, J. Myland and J. Spanier, *An Atlas of Functions*, Washington DC: Springer, 2009.
- [129] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge : Cambridge University Press, 2005.
- [130] L. C. Andrews and R. L. Phillips, *Laser Beam Propagation through Random Media* 2nd Edition, Washington: SPIE digital Library, 2005.
- [131] M. Kankanhalli, Rajmohan and K. R. Ramakrishnan, "Adaptive visible watermarking of images," in *IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*, Florence, Italy, 1999.
- [132] C.-H. Huang and J.-L. Wu, "Attacking visible watermarking schemes," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 6, no. 1, pp. 16-30, 2004.

- [133] S.-C. Pei and Y.-C. Zeng, "A novel image recovery algorithm for visible watermarked images," *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 1, no. 4, pp. 543-560, 2006.
- [134] Y. Yang, S. Xingming, H. Yang and C.-T. Li, "Removable visible image watermarking algorithm in the discrete cosine transform domain," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 17, no. 3, pp. 1-11, 2008.
- [135] C.-C. Chen, Y.-H. Tsai and H.-C. Yeh, "Difference-expansion based reversible and visible image watermarking scheme," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 76, no. 6, pp. 8497-8516, 2017.
- [136] S. Aghajanzadeh and M. Uysal, "Diversity-Multiplexing Trade-Off in Coherent Free-Space Optical Systems With Multiple Receivers," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 2, no. 12, pp. 1087-1094, 2010.
- [137] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 57-96, 2016.
- [138] B. Prlinčević, B. Milovanović, P. Spalević, S. Panić and Z. Milivojević, "Performance analysis of FSO transmission of watermarked image over Rician fading channels," in *International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications - TELSIKS*, Nis, Serbia, 2015.
- [139] B. Princevic, Z. Milivojevic and D. Brodic, "MIPFD Algorithm for Image Fire Detection," in *XLIX international conference ICEST*, Nis, Serbia, 2014.
- [140] M. Kankanhalli, Rajmohan and K. R. Ramakrishnan, "Adaptive visible watermarking of images," in *IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems*, Florence, Italy, 1999.
- [141] R. Lukac and K. Plataniotis, "Secure single-sensor digital camera," *Electronics Letters*, vol. 42, no. 11, pp. 627-629, 2006.
- [142] C. H. Huang and J. L. Wu, "Attacking visible watermarking schemes," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 6, no. 1, pp. 16-30, 2004.
- [143] A. Al-Habash, L. C. Andrews and R. L. Phillips, "Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media," *Optical Engineering* 40(8):1554-1562, vol. 40, no. 8, pp. 1554-1562, 2001.

- [144] F. Ahmed A. and H. Steve, "Outage capacity optimization for free space optical links with pointing errors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 25, no. 7, pp. 1702-1710, 2007.
- [145] I. S. Gradshteyn and J. M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, Academic Press, 2014.
- [146] C. Chen, W.-D. Zhong, X. Li and D. Wu, "MDPSK-based nonequalization OFDM for coherent free-space optical communication," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 16, pp. 1617-1620, 2014.
- [147] M. Smilić, Z. Perić, M. Dejan, A. Marković and M. Savić, "Influence of zero and non-zero boresight pointing errors on biterror rate free-space optic transmission over Málaga atmospheric channel," *Optica Applicata*, vol. 48, no. 2, pp. 179-189, 2018.
- [148] [Online]. Available: <https://functions.wolfram.com/xx.xx.xx.xxxx.xx>.
- [149] H. G. Sandalidis, T. A. Tsiftsis, G. K. Karagiannidis and M. Uysal, "BER performance of FSO links over strong atmospheric turbulence channels with pointing errors," *IEEE Communications Letters*, vol. 12, no. 1, pp. 44-46, 2008.