

# Modulacijski postupci za kapacitivno spregnutu komunikaciju putem ljudskog tijela zasnovani na diskretnoj promjeni komunikacijskog kanala

---

Filipović, Luka

Doctoral thesis / Doktorski rad

2024

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:495665>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-20**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Luka Filipović

**MODULACIJSKI POSTUPCI ZA  
KAPACITIVNO SPREGNUTU  
KOMUNIKACIJU PUTEM LJUDSKOG  
TIJELA ZASNOVANI NA DISKRETNOM  
PROMJENI KOMUNIKACIJSKOG  
KANALA**

Doktorska disertacija

Osijek, 2024.

Doktorska je disertacija izrađena na:

Zavodu za komunikacije,

Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek,

Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

**Mentor:** prof. dr. sc. Marijan Herceg

Disertacija ima 127 stranica.

Doktorska disertacija broj: 94

**Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:**

1. prof. dr. sc. Tomislav Matić, FERIT Osijek, predsjednik
2. prof. dr. sc. Mario Vranješ, FERIT Osijek, član
3. prof. dr. sc. Gordan Šišul, FER Zagreb, vanjski član
4. prof. dr. sc. Davor Vinko, FERIT Osijek, zamjenik člana

**Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:**

1. prof. dr. sc. Tomislav Matić, FERIT Osijek, predsjednik
2. prof. dr. sc. Mario Vranješ, FERIT Osijek, član
3. prof. dr. sc. Gordan Šišul, FER Zagreb, vanjski član
4. prof. dr. sc. Davor Vinko, FERIT Osijek, zamjenik člana

**Datum obrane doktorske disertacije:** 4.7.2024.



# Sadržaj

	Stranica
<b>1. UVOD . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>2. KOMUNIKACIJA PUTEM LJUDSKOG TIJELA .</b>	<b>3</b>
<b>2.1. Modeli ljudskog tijela kao komunikacijskog sustava za kapacitivno spregnuti HBC . . . . .</b>	<b>6</b>
2.1.1. Empirijski modeli . . . . .	7
2.1.2. Modeli zasnovani na proračunima elektromagnetskog polja - EM . . . . .	9
2.1.3. Modeli opisani električnim krugovima - EC . . . . .	15
2.1.4. Hibridni modeli. . . . .	19
2.1.5. Fantom modeli . . . . .	20
2.1.6. Usporedba različitih modela kanala za komunikaciju putem ljudskog tijela. . . . .	22
<b>2.2. Modulacijski postupci kod kapacitivno spregnutih HBC sustava . . . . .</b>	<b>23</b>
2.2.1. Modulacijski postupak zasnovan na promjeni amplitude s dvama diskretnim stanjima . . . . .	24
2.2.2. Modulacijski postupak s diskretnom promjenom frekvencije . . . . .	26

2.2.3. Modulacijski postupak s diskretnom promjenom faze	
27	
2.2.4. Ostali modulacijski postupci . . . . .	29
<b>3. DISKRETNI MODULACIJSKI POSTUPAK ZASNOVAN NA PROMJENI INDEKSA INDUKTIVITETA. . . . .</b>	<b>31</b>
<b>3.1. Model IIM-CC-HBC sustava . . . . .</b>	<b>32</b>
<b>3.2. Način rada IIM-CC-HBC sustava . . . . .</b>	<b>37</b>
3.2.1. Detekcija primljene informacije kod IIM-CC-HBC .	38
3.2.2. Vjerojatnost pogreške pri detekciji bita kod IIM-CC-HBC . . . . .	43
<b>3.3. Evaluacija performansi IIM-CC-HBC modulacijskog postupka. . . . .</b>	<b>52</b>
3.3.1. Utjecaj udaljenosti između predajnika i prijemnika na performanse IIM-CC-HBC . . . . .	56
3.3.2. Utjecaj spola i konstitucije osobe na performanse IIM-CC-HBC. . . . .	62
3.3.3. Utjecaj udaljenosti od tla na performanse IIM-CC-HBC . . . . .	66
3.3.4. Utjecaj veličine elektroda i sučelja elektroda-koža na performanse IIM-CC-HBC . . . . .	69
3.3.5. Usporedba performansi IIM-CC-HBC s ostalim modulacijskim postupcima . . . . .	71

<b>4.</b>	<b>DISKRETNI MODULACIJSKI POSTUPAK ZASNOVAN NA PROMJENI IMPEDANCIJE . . . . .</b>	<b>73</b>
4.1.	Način rada ISK-CC-HBC sustava . . . . .	73
4.1.1.	Detekcija primljene informacije kod ISK-CC-HBC .	76
4.1.2.	Vjerojatnost pogreške pri detekciji bita kod ISK-CC-HBC . . . . .	78
4.2.	Evaluacija performansi ISK-CC-HBC modulacijskog postupka. . . . .	78
4.2.1.	Utjecaj udaljenosti između predajnika i prijemnika na performanse ISK-CC-HBC . . . . .	81
4.2.2.	Utjecaj spola i konstitucije osobe na performanse ISK-CC-HBC. . . . .	88
4.2.3.	Utjecaj udaljenosti od tla na performanse ISK-CC-HBC . . . . .	91
4.2.4.	Utjecaj veličine elektroda i sučelja elektroda-koža na performanse ISK-CC-HBC . . . . .	96
4.2.5.	Usporedba performansi ISK-CC-HBC s ostalim modulacijskim postupcima . . . . .	97
4.2.6.	Usporedba različitih modulacijskih postupaka kod kapacitivno spregnutih HBC sustava . . . . .	98
<b>5.</b>	<b>ZAKLJUČAK . . . . .</b>	<b>101</b>
	Literatura . . . . .	104
	Popis slika . . . . .	115
	Popis tablica . . . . .	120
	Popis kratica . . . . .	121
	Sažetak . . . . .	125

<b>Abstract . . . . .</b>	<b>126</b>
<b>Biografija . . . . .</b>	<b>127</b>

# 1. UVOD

Smanjenje broja osoba oboljelih od kroničnih bolesti (npr. kardiovaskularne bolesti, dijabetes) jedan je od najvećih izazova s kojima se susreću mnoge zemlje diljem svijeta. Kardiovaskularne bolesti, prema podacima Svjetske zdravstvene organizacije (engl. *World Health Organization*, WHO), razlog su prosječno 17,9 milijuna umrlih svake godine. Oko 422 milijuna ljudi boluje od dijabetesa, dok je 1,5 milijuna smrti godišnje direktno povezano s dijabetesom. Četiri od deset osoba preminulih od srčanog udara preživjelo bi da im je krvni tlak bio pravilno reguliran. Navedene bolesti najčešće pogađaju starije osobe. Prema podacima koje daje WHO, broj osoba starijih od 60 godina narast će na više od 2 milijarde do 2050. godine. Učinkoviti nadzor kroničnih bolesti putem komunikacijskih mreža na ljudskom tijelu (engl. *Body Area Network*, BAN) moguće je rješenje za zadržavanje postojeće ili povećanje kakvoće življenja osoba s kroničnim oboljenjima.

Kod BAN sustava senzori koji su smješteni na površini ljudskoga tijela ili unutar ljudskoga tijela (implantati) prikupljaju podatke vezane uz fiziološke procese (npr. otkucaje srca). Podaci prikupljeni pomoću senzora distribuiraju se prema centralnom podatkovnom čvoru gdje se mogu obrađivati, slati direktno liječničkoj službi ili stvarnovremenski pratiti. Osim navedene zdravstvene upotrebe, BAN sustavi mogu se koristiti i u druge svrhe (fitness narukvica, prijenos zabavnog audio/video sadržaja, praćenje lokacije itd.).

Prvi testirani sustav za komunikaciju putem ljudskog tijela predložen je 1995. godine [1]. 2012. godine donesen je IEEE 802.15.6 standard [2] kojim su definirani fizikalni slojevi bežičnih komunikacijskih mreža na ljudskom tijelu (engl. *Wireless Body Area Network*, WBAN) uključujući komunikaciju putem ljudskog tijela (engl. *Human Body Communication*, HBC).

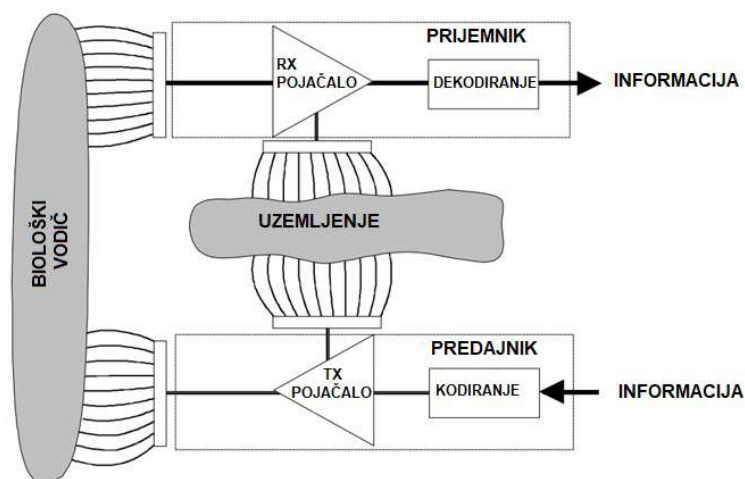
U drugom je poglavlju opisan HBC sustav i objašnjene su razlike između različitih vrsta HBC sustava. Potom su analizirani modeli kanala te modulacijski postupci koji se koriste kod kapacitivno spregnutog HBC-a. Trećim i četvrtim poglavljem predstavljena su dva nova modulacijska postupka kod kapacitivno spregnutog HBC-a. U tim je poglavljima opisan način rada te model svakog od sustava. Izvedeni su matematički izrazi za vjerojatnost pogreške pri detekciji bita te je testiran utjecaj parametara HBC sustava na predstavljene modulacijske postupke. Peto poglavlje donosi zaključak.

## 2. KOMUNIKACIJA PUTEH LJUDSKOG TIJELA

Posljednjih su dvadesetak godina značajno smanjene dimenzije i troškovi izrade elektroničkih uređaja koji bi mogli biti korišteni u HBC sustavima. Takav razvoj tehnologije donio je nove opcije u nadzoru aktivnosti ljudskog tijela (npr. brojanje koraka, nadzor otkucaja srca, nadzor krvnog tlaka itd.) koji se mogu koristiti u ozbiljnoj medicinskoj primjeni.

Kako bi se pacijentu omogućila što bolja kakvoća življenja, sve se više primjenjuju senzori s kojih se podaci distribuiraju prema liječničkom osoblju pomoću nekog od bežičnih standarda. Razlog korištenja bežičnih standarda povećanje je mobilnosti pacijenta (pacijenti se slobodno kreću, pri čemu ne moraju biti žično spojeni s medicinskim uređajima). Nadalje, kod korištenja žičnog povezivanja pacijenata s medicinskim uređajima postoji rizik od oštećenja vodiča. Navedeni se rizik može izbjeći pomoću bežičnog povezivanja korištenjem bežičnih standarda kao što su, primjerice, Zigbee, Bluetooth te HBC. Zigbee i Bluetooth dizajnirani su za domete pri komunikaciji od nekoliko desetaka metara, dok su HBC sustavi dizajnirani za manje domete. Karakteristike HBC sustava uključuju malu potrebnu odašiljačku snagu predajnika (malo nepotrebno zračenje u okolinu), ali i male energetske potrebe cjelokupnog primopredajnog sustava (produljeni vijek trajanja baterijskog sustava napajanja uređaja). Glavna prednost HBC sustava u odnosu

na Zigbee i Bluetooth visoka je razina sigurnosti jer presretanje signala s HBC sustava zahtijeva ulazak u osobni prostor osobe koja takav sustav koristi [3], [4]. Prvi HBC sustav osmislio je Zimmerman, a prikazan je slikom 2.1. Sustav se sastoji od predajnika smještenog na jednoj osobi i prijemnika smještenog na drugoj osobi. Podatkovna sekvenca prenosi se s predajnika na prijemnik prilikom rukovanja dviju osoba. Predajnik i prijemnik povezani su s osobama putem bakrenih elektroda koje omogućavaju zatvaranje silnica električnog polja dominantnim putem (od predajnika do prijemnika kroz ljudsko tijelo preko signalnih elektroda) i povratnim putem (silnice električnog polja prostiru se od referentnih elektroda predajnika i prijemnika do potencijala Zemlje-uzemljenja).



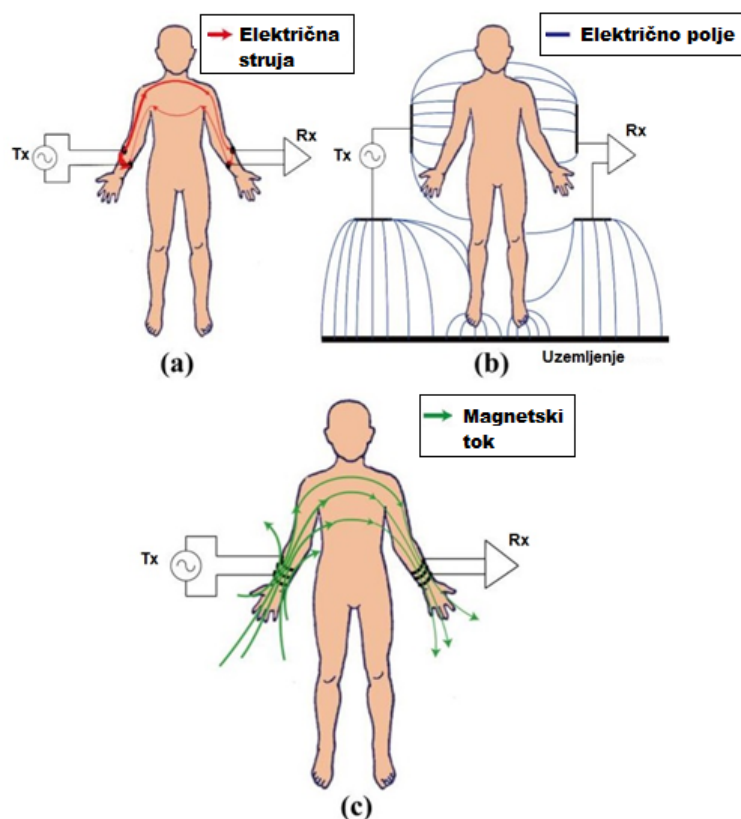
Slika 2.1: Prvi HBC sustav [1]

HBC je tehnologija koja koristi ljudsko tijelo kao medij za prijenos podataka, što je i vidljivo sa slike 2.1. Senzori su kod HBC sustava dio predajnika koji mogu biti smješteni unutar ljudskog tijela, na površini kože ili u neposrednoj blizini ljudskog tijela. Prijemnik se nalazi na ljudskom tijelu ili u neposrednoj blizini, a može, osim sklopa za prikaz nadziranih tjelesnih aktivnosti, sadržavati i aktuatore (npr. inzulinsku pumpu) [5]. Zahtjevi koji



su postavljeni pred HBC sustav su pouzdanost, što manje dimenzije predajnika i prijemnika te mala potrošnja energije [3]. Cilj dizajna uređaja za HBC sustave je izrada sklopova koje će korisnik moći nositi na sebi u različitim situacijama, a da pri tome ispravnost mjerenja, komunikacije i distribucije izmjerenih podataka ni u jednom trenutku ne bude ugrožena. Također, cilj je izraditi uređaj kojemu će životni vijek baterije ili drugog izvora napajanja biti nekoliko godina ili barem nekoliko mjeseci, ovisno o složenosti primjene uređaja. HBC sustavi dijele se na tri vrste: kapacitivni, galvanski i magnetski [6]. Sve tri vrste prikazane su slikom 2.2.

Kod galvanskog HBC sustava obje elektrode predajne i prijemne strane nalaze se na ljudskom tijelu. S prijemne strane šalje se mali izmjenični strujni signal koji se detektira i demodulira na prijemnoj strani [8]. Kod kapacitivnog je HBC sustava po jedna elektroda na predajnoj i prijemnoj strani prislonjena



Slika 2.2: HBC vrste: a) galvanski, b) kapacitivni, c) magnetski [7]

na kožu korisnika ili se nalazi u njenoj neposrednoj blizini. Takve elektrode nazivaju se signalnim elektrodama. Preostale dvije elektrode ostavljene su „u zraku“, bez kontakta s ljudskim tijelom, a nazivaju se referentnima [9]. Silnice električnog polja, generiranog pomoću izmjeničnog izvora na predajniku, zatvorene su kroz ljudsko tijelo, što predstavlja dominantni put, te kroz zrak i okolinu, što predstavlja povratni put. Primljeni signal očituje se kao razlika potencijala između signalne i referentne elektrode. Magnetski HBC zasniva se na zavojnicama omotanim oko dijelova ljudskog tijela. Zavojnica na predajniku generira magnetsko polje. Magnetsko polje prolazi kroz ljudsko tijelo te se na zavojnici prijemne strane, na temelju elektromagnetske indukcije, inducira napon preko kojega se primljeni signal može demodulirati [7].

## **2.1. Modeli ljudskog tijela kao komunikacijskog sustava za kapacitivno spregnuti HBC**

Razvoj modela ljudskoga tijela kao komunikacijskog kanala važan je za razumijevanje mehanizama komunikacije ljudskim tijelom te za daljnji razvoj HBC predajnika i prijemnika. Modelima se pokušava što vjernije oponašati svojstva ljudskog tijela. Primjerice, kvalitetnim je modelom moguće predvidjeti prigušenje signala koje nastaje prolaskom kroz ljudsko tijelo. Prije osvrta na vrste modela kanala treba napomenuti kako je standardom IEEE 802.15.6 određena frekvencija od 21 MHz za HBC sustave [10], [11].

Na električna svojstva ljudskog tijela utječe stanična građa tkiva. Naime, područje oko ljudske stanice može se modelirati kao kapacitet čije su ploče područja visoke vodljivosti (stanična i izvanstanična tekućina) između kojih je stanična membrana s niskom vodljivošću. Pri niskim frekvencijama, zbog velike impedancije stanične membrane, samo mala struja može poteći

izvanstaničnim područjem. Kod viših je frekvencija, smanjenjem impedancije stanične membrane, moguć prolazak struje izvanstaničnim područjem, ali i kroz stanicu. Rastom frekvencije doći će do porasta vodljivosti i pada permitivnosti [9].

Općenito, modeli ljudskog tijela kao komunikacijskog sustava kod kapacitivnog HBC sustava mogu se podijeliti u pet kategorija. To su: empirijski modeli, modeli zasnovani na elektromagnetskim proračunima (engl. *Electromagnetic*, EM), modeli opisani električnim krugovima (engl. *Electric circuit*, EC), hibridni modeli i fantom modeli.

### 2.1.1. Empirijski modeli

Aproksimacija ponašanja ljudskoga tijela kao komunikacijskog kanala empirijskim modelima zasnovana je na mjerenjima određenih parametara komunikacijskog sustava (prigušenje signala, omjer napona predajnika i prijemnika i sl.). Empirijski modeli dobivaju se pomoću rezultata mjerenja koji obično obuhvaćaju određeni frekvencijski opseg. Na taj način dobiva se krivulja raspona vrijednosti koji predstavljaju utjecaj ljudskog tijela na određeni parametar. Kakvoći modela doprinosi veći broj osoba na kojima je vršeno mjerenje, testiranje različitih konfiguracija predajnika i prijemnika, uzimanje u obzir utjecaja okoline itd.

U radu [12] napravljene su različite vrste mjerenja kod kapacitivnog HBC sustava. Kod svih je mjerenja promatran  $S_{21}$  parametar, tj. prigušenje komunikacijskog kanala, a mjerenje je izvršeno pomoću vektorskog mrežnog analizatora (engl. *Vector Network Analyzer*, VNA) u frekvencijskom rasponu od 1 MHz do 100 MHz. Parametar  $S_{21}$  predstavlja logaritam omjera napona na predajniku i napona na prijemniku. Mjerenjima izvršenim na

jednoj osobi promatrani su utjecaji sljedećih parametara HBC kanala na prigušenje signala: prolazak signala različitim dijelovima tijela, pomak dijelova tijela tijekom komunikacije, prisutnost znoja između elektrode i tijela, udaljenost između predajnika i prijemnika te nailazak signala na zglobove. Za utvrđivanje frekvencije pri kojoj će prigušenje signala biti najmanje, mjerenja su izvršena na 10 osoba. Iz rezultata mjerenja može se zaključiti kako je prigušenje nešto veće na dijelu tijela s većim udjelom masnog tkiva, tj. trbuhu nego na prsima. Nadalje, mjerenja s elektrodama postavljenim na lokacijama (predajnik-prijemnik): ruka-noga, prsa-prsa i ruka-ruka pokazala su kako pokreti poput pomaka ruke naprijed-natrag, disanja te hodanja nemaju gotovo nikakav utjecaj na prigušenje signala. Daljnjim je mjerenjem utvrđeno kako znoj između elektrode i kože, u frekvencijskom rasponu od 1 MHz do 30 MHz, uzrokuje manje prigušenje signala. Dokazano je i kako se povećanjem udaljenosti između predajne i prijemne strane povećava i prigušenje te da nailazak signala na zglobove (lakat, rame) stvara dodatno prigušenje. Mjerenjima izvršenima na 10 osoba utvrđeno je kako je najmanje prigušenje signala dobiveno pri frekvenciji od 10 MHz.

Autori su u radu [13] promatrali promjene svojstava HBC kanala kod kapacitivnog HBC sustava ovisno o osobama na kojima se vrši mjerenje. U eksperimentu su sudjelovale 94 osobe. Treba napomenuti kako je kod ovog modela samo predajnik smješten na ljudskoj ruci. Prijemnik se nalazi odvojen od tijela (na stolu). Komunikacija se ostvaruje kada osoba rukom dotakne vodljivu plohu prijemnika, čime se zatvara vodljivi put između predajnika i prijemnika kroz ljudsko tijelo. Vodljiva ploha zapravo predstavlja elektrodu. Fizički razmak između predajnika i prijemnika je 30 cm, dok je vodljivi put kroz ljudsko tijelo duljine 1,5 metra. Vodljivi put kroz ljudsko tijelo uključuje

lijevu i desnu ruku te torzo. Frekvencijski opseg pri mjerenju parametra  $S_{21}$  bio je od 10 MHz do 100 MHz. Prigušenje signala u rasponu je od 65 dB do 75 dB gotovo u cijelom frekvencijskom opsegu ukoliko je prijemnik uzemljen, tj. ukoliko osciloskop pomoću kojega je izvršeno mjerenje signala na prijemniku nije galvanski odvojen od elektroenergetske mreže. Ukoliko prijemnik nije uzemljen, prigušenje je nešto veće.

### 2.1.2. Modeli zasnovani na proračunima elektromagnetskog polja - EM

Modeli ljudskog tijela kao komunikacijskog kanala zasnovani na proračunima elektromagnetskog polja mogu se podijeliti na dvije vrste: analitičke i modele izrađene pomoću metode konačnog broja elemenata (engl. *Finite Element Method*, FEM). Analitički modeli uključuju matematičke izraze kojima je opisan komunikacijski kanal, dok se kod istraživanja koja uključuju kapacitivne HBC sustave, korištenjem alata za FEM simulacije, obično programski simulira razdioba električnog polja na ljudskom tijelu. Pri tome je oblik dijelova ljudskog tijela pojednostavljen (kvadar, valjak i sl.). Broj točaka u prostoru koje predstavljaju dijelove tijela je konačan.

U radu [14] autori su istražili mehanizme prijenosa signala kod HBC-a na površini ljudske kože koja je aproksimirana beskonačno dugačkom poluravninom s nesavršenom vodljivošću. Istraživanje je uključivalo analizu prijenosa signala u frekvencijskom opsegu do 100 MHz te udaljenost od predajnika i prijemnika do 1,3 metra. Predstavljen je matematički izraz za prigušenje signala u kojemu su sadržani korekcijski faktori koji opisuju utjecaj kože na prigušenje signala. Autori su usporedili predstavljeni model s mjerenjima prigušenja signala na udaljenostima do 1,3 metra. Predstavljeni model, kao

i mjerenja, pokazuje kako se signal priguši za oko 50 % na udaljenosti od 0,1 metra. Prigušenje eksponencijalno raste s udaljenošću pa je pri udaljenosti od 1,3 metra prigušenje preko 95 %. Izmjereni se rezultati dobro podudaraju s rezultatima dobivenima pomoću modela, a najviša korelacija postignuta je pri udaljenostima od 0,6 metra do 0,9 metra.

Znanstvenim radom [15] predstavljen je još jedan analitički EM model. Za teoretski matematički proračun jakosti električnog polja pretpostavljeno je kako je ljudsko tijelo beskonačno dugačka poluravnina s konačnim vrijednostima vodljivosti i relativne permitivnosti. Model je vrednovan mjerenjima u frekvencijskom opsegu od 100 kHz do 1 GHz te pri udaljenostima od 0,5 metra do 2,5 metra. Mjerenjima su testirane i osjetljivost na interferenciju i robusnost na vanjske utjecaje. Prilikom izrade matematičkog proračuna u obzir je uzeto devet različitih konfiguracija elektroda predajnika i prijelnika. Kod jedne je od konfiguracija po jedna elektroda predajnika i prijelnika smještena na tijelu, dok je druga ostavljena „u zraku“. Navedena konfiguracija elektroda karakteristična je za kapacitivni HBC sustav. Nadalje, testirana je i konfiguracija elektroda kod koje su obje elektrode predajnika i prijelnika u kontaktu s ljudskim tijelom, što je karakteristično za galvanski HBC sustav. Istraživanje je obuhvatilo i kombinaciju navedenih konfiguracija elektroda (npr. obje elektrode predajnika nalaze se na tijelu, dok je kod prijelnika samo jedna elektroda na tijelu, a druga ostavljena „u zraku“). U obzir je uzeta i različita prostorna raspodjela elektroda (npr. elektrode predajnika i prijelnika nalaze se u istoj horizontalnoj ravnini pri čemu je jedna elektroda predajnika pomaknuta za  $90^\circ$  u odnosu na zamišljeni pravac koji prolazi kod preostale tri elektrode sustava). Za svaku konfiguraciju elektroda izvedeni su koeficijenti udjela pojedinog člana (permitivnost, faktor

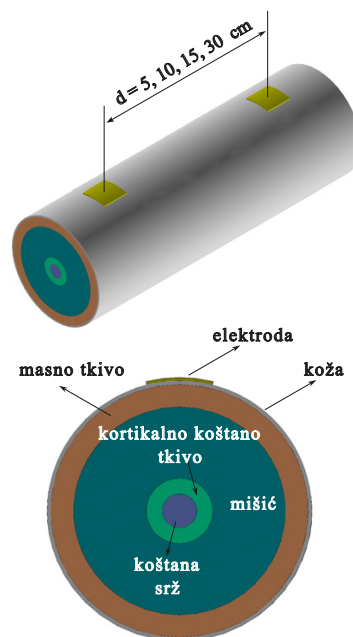
vertikalnog prigušenja, faktor horizontalnog prigušenja) u izrazu za proračun jakosti električnog polja. Mjerenje prigušenja signala prolaskom kroz HBC sustav pokazalo je kako pri frekvenciji od 21 MHz najmanje prigušenje ostvaruje upravo konfiguracija elektroda koja predstavlja kapacitivni HBC, dok pri višim frekvencijama pokazuje nedostatke koji se očituju kao povećanje prigušenja signala uslijed interferencije i povećanje prigušenja signala s obzirom na utjecaj okoline (prisutnost metalnih predmeta te pomicanje tijela i kablova mjerne opreme).

Znanstvenim radom [16] prikazan je utjecaj položaja ljudske ruke na parametar  $S_{21}$  u frekvencijskom opsegu od 10 MHz do 100 MHz kod kapacitivnog HBC sustava. Predstavljen je i FEM model kod kojega su svi dijelovi ljudskog tijela (noge, ruke, torzo), osim gornjeg dijela glave, pravokutnici. Gornji je dio glave modeliran kao polukugla. Dimenzije dijelova tijela, visina osobe i debljine pojedinih tkiva nisu navedene. Navedeno je kako je kod izrade modela korišteno šest različitih vrsta tkiva (koža, masno tkivo, mišić, kost, srce, siva tvar) s pripadajućim vodljivostima i relativnim permitivnostima. Pri mjerenjima, promatrano je 10 različitih položaja ruke. Predajnik je bio smješten na zapešću jedne ruke, dok je prijemnik bio smješten na zapešću druge ruke. U frekvencijskom opsegu od 10 MHz do 50 MHz prigušenje signala gotovo je nepromijenjeno neovisno o položaju ruke te se krivulje prigušenja dobro poklapaju sa simulacijama u kojima je korišten predstavljeni FEM model.

Ljudska ruka je dio tijela koji se najčešće modelira FEM modelima. U svrhu modeliranja ljudske ruke najčešće se koristi oblik valjka (rjeđe oblik kvadra). Jedan od modela ruke predstavljen je u radu [17]. Model uključuje pet različitih tkiva (koža, masno tkivo, mišić, kortikalno koštano tkivo, koštana srž) koji zajedno čine valjkasti model ljudske ruke, kako je prikazano slikom

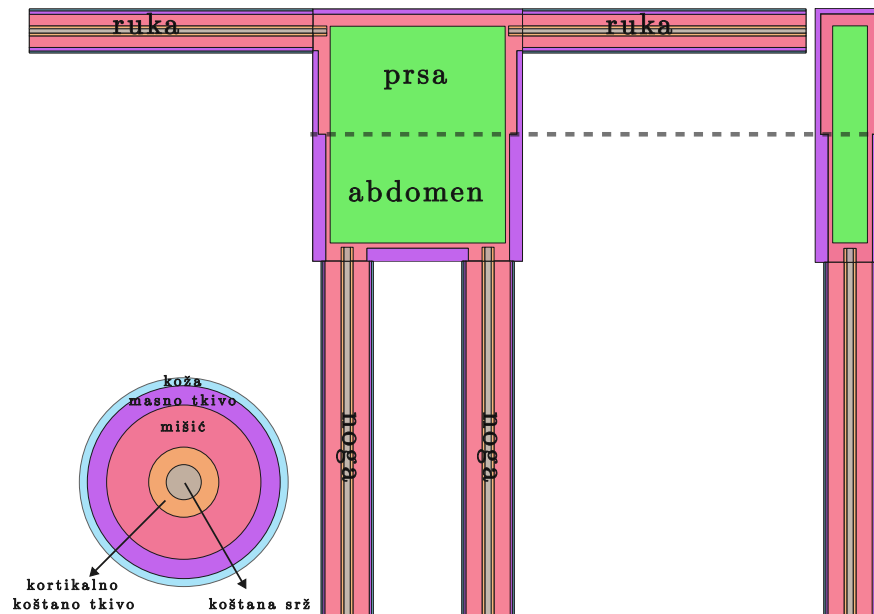
**2.3.** Na ruci su smještene bakrene elektrode dimenzija 2 x 2 cm, a promatrani razmak između predajnika i prijemnika je 5, 10, 15 i 30 cm. Mjerenjem parametra  $S_{21}$  kroz frekvencijski raspon od 1 MHz do 100 MHz pomoću VNA potvrđena je vjerodostojnost modela. Navedeno mjerenje izvršeno je na ljudskoj ruci. Najbolje podudaranje izmjerenog i simuliranog gušenja signala dobiveno je na udaljenostima između predajnika i prijemnika 10, 15 i 30 cm.

Sličan pristup modeliranju ljudske ruke kao valjka s različitim tkivima pojavljuje se u znanstvenom radu [18]. U ovom je slučaju u obzir uzeto istih pet vrsta tkiva kao u radu [17], ali su modelu dodani druga ruka, torzo i noge, kao što je vidljivo na slici 2.4. Većina torza, izuzev rubnih dijelova koji su modelirani kao masno tkivo i mišić, modelirana je uzevši u obzir relativnu permitivnost i vodljivost za srce prema radu [19]. Srce ima približno iste iznose relativne permitivnosti i vodljivosti kao srednje vrijednosti relativne permitivnosti i vodljivosti svih organa torza. Za razliku od rada [17], u ovome



**Slika 2.3:** Model ljudske ruke prema radu [17]





**Slika 2.4:** Model ljudskog tijela korišten u radovima [18] i [20]. Presjek modela ruke (dolje lijevo), pogled modela tijela s prednje strane (sredina), pogled modela tijela s bočne strane (desno)

je radu, osim za simulaciju kod koje su predajnik i prijemnik smješteni na istoj ruci, napravljena FEM simulacija te mjerenje prigušenja signala i za slučaj kada se predajnik nalazi na jednoj, a prijemnik na drugoj ruci s međusobnim razmakom od 10 cm, 30 cm i 100 cm u frekventijskom rasponu od 1 MHz do 100 MHz. Pri mjerenju su korištene bakrene elektrode dimenzija 2 x 2 cm (signalne elektrode) i 9 x 11 cm (referentne elektrode). Pomoću dobivenih rezultata izveden je i model kanala prikazan električnim krugom koji se sastoji od RC članova pa se ovaj model može svrstati i u hibridne modele. Autori napominju kako je predloženi model primjereniji za udaljenosti između predajnika i prijelnika veće od 30 cm jer zanemaruje spregu između referentnih elektroda koja je značajna pri manjim udaljenostima. Glavni nedostatak FEM modela i modela prikazanih RC članovima koji proizlazi iz njega nesrazmjernost je između ekstremiteta. Naime, duljina ruku u modelu je 70 cm, dok je duljina nogu 28 cm.

Navedeni nesrazmjernost ekstremiteta ispravljen je u modelu iz znanstvenog

rada [20]. U modelu iz ovog znanstvenog rada duljina ruku iznosi 60 cm, a duljina nogu iznosi 100 cm, što je realnije nego u radu [18]. Autori su u navedenom radu predstavili novi model ljudskog tijela pri čemu je iz modela ekstremiteta izuzet utjecaj kostiju jer električno polje, prema radu [17], ne prodire do kostiju. Nadalje, u radu je simulacijama i mjerenjima analiziran utjecaj ostatka tijela (torza i nogu) na prigušenje pri prijenosu signala ako se predajnik nalazi na jednoj, a prijemnik na drugoj ruci. Analizirani su i slučajevi kada se u neposrednoj blizini nalazi druga osoba na kojoj se nalazi sustav zasnovan na HBC-u te utjecaj interferencije drugih elektroničkih uređaja i/ili metalnih objekata u neposrednoj blizini. Kod svih simulacija i mjerenja obuhvaćen je frekvencijski raspon od 20 MHz do 100 MHz, pri čemu su elektrode iste kao u radu [18]. Zaključak autora je kako torzo može djelomično narušiti kvalitetu komunikacije u razmatranom slučaju, dok okolni objekti i druge osobe mogu narušiti kvalitetu komunikacije samo u slučaju neposredne blizine, što bi uključivalo privatni prostor korisnika.

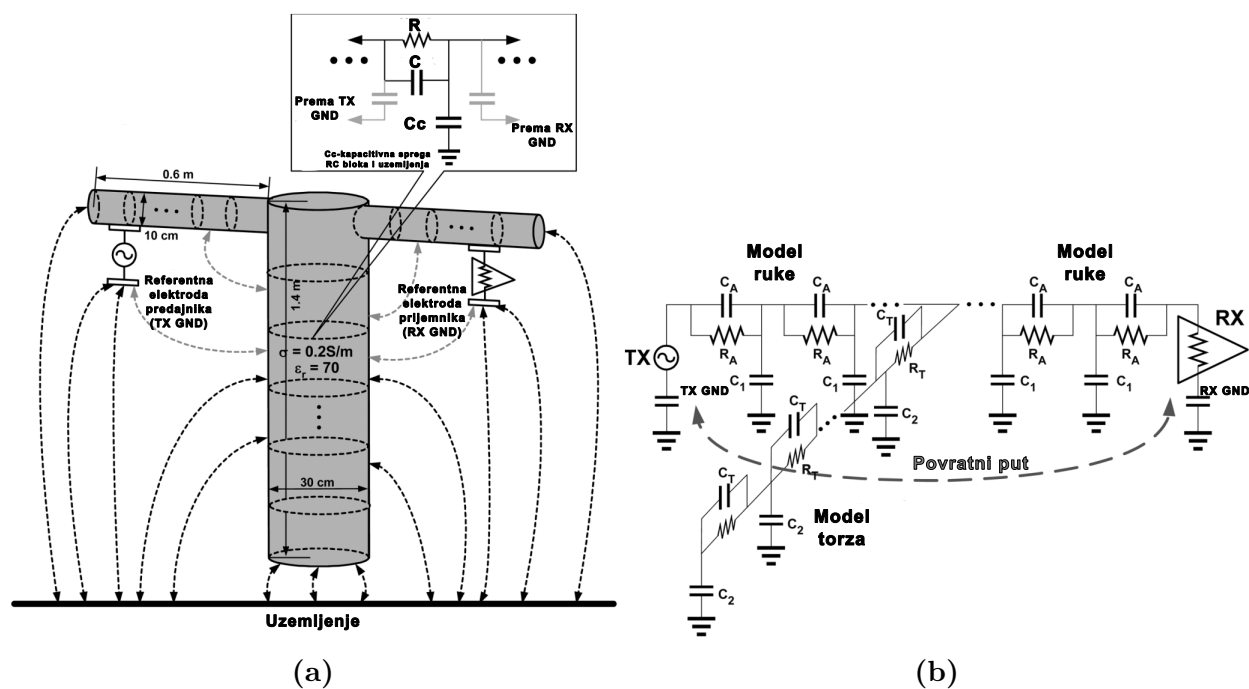
U znanstvenom radu [21] naglasak je stavljen na utjecaj referentnih elektroda na prigušenje signala kod kapacitivnog HBC-a. FEM model koji je priložen u radu sličan je modelu prikazanom slikom 2.4, a sastoji se od ruku, nogu, prsa i abdomena. Prosječne debljine tkiva za sve četiri navedene skupine dijelova tijela tablično su navedene. S obzirom na to da je fokus autora stavljen na utjecaj referentnih elektroda na prigušenje signala, njihov zaključak je da se prigušenje signala mijenja ukoliko je visina referentnih elektroda u odnosu na tlo u rasponu od 10 cm do 50 cm, dok iznad 50 cm prigušenje ostaje konstantno. Promjena udaljenosti između dviju referentnih elektroda (od 1 cm do 30 cm) utječe na prigušenje signala za manje od 1 dB, a povećanjem dimenzija referentnih elektroda može se utjecati na smanjenje

prigušenja signala.

### 2.1.3. Modeli opisani električnim krugovima - EC

Modelima ljudskog tijela za kapacitivni HBC kojima je ljudsko tijelo opisano pomoću električnih krugova (engl. *Electric Circuit*, EC) modelira se cijelo ljudsko tijelo, pojedini dijelovi ljudskog tijela ili spoj između elektrode i tijela pomoću impedancija. Ukoliko je modelom prikazana impedancija pojedinog dijela tijela, tada se u slučaju potrebe modela cijelog tijela impedancije pojedinih dijelova tijela spajaju u veće blokove.

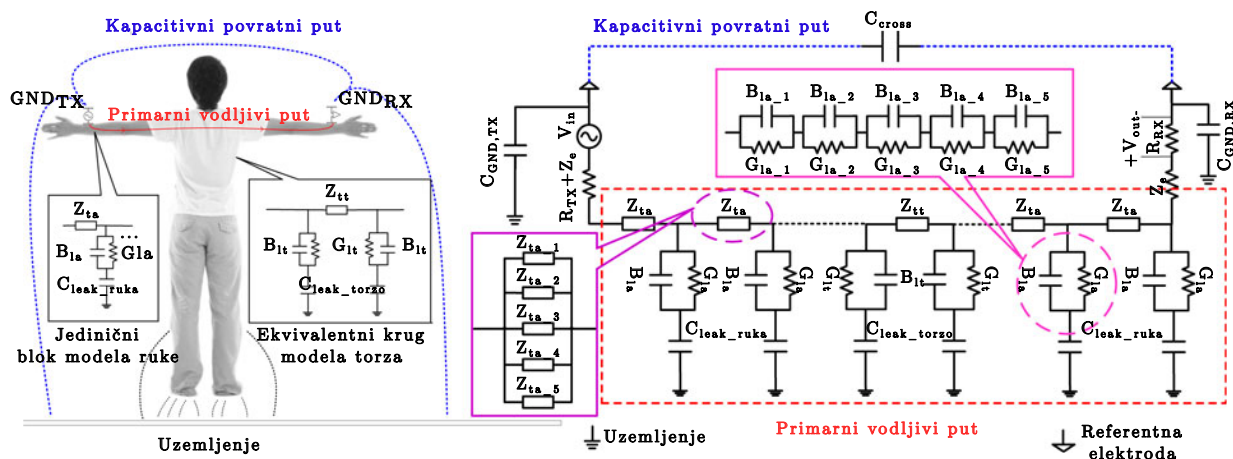
Autori u znanstvenom radu [22] predlažu model ljudskog tijela koji se sastoji od triju cilindara, kao što je prikazano slikom 2.5a. Većim je cilindrom, visine 140 cm i promjera 30 cm, predstavljen torzo. Dva tanka cilindra, okomita na veći cilindar, predstavljaju model ljudskih ruku. Njihova dužina je 60 cm, a promjer 10 cm. Udio pojedinog tkiva u torzu i rukama



**Slika 2.5:** Model ljudskog tijela prema radu [22]: (a) model prikazan valjcima s pripadajućim kapacitivnim spregama, (b) konačni model prikazan RC članovima

nije uzet u obzir. Svaki cilindar podijeljen je u desetcentimetarske kaskadno spojene blokove, a svaki blok predstavljen je RC članom. RC članovi predstavljaju dijelove ljudskog tijela s određenim otporom i kapacitetom čije su vrijednosti proračunate pomoću pripadajućih vrijednosti vodljivosti i relativnih permitivnosti tkiva od kojih je tijelo sazdano. Konačni model poprima formu prikazanu slikom 2.5b. Autori su uzeli u obzir i kapacitivnu spregu, tj. međudjelovanje električnog polja između pojedinih blokova i vanjskog uzemljenja. Broj desetcentimetarskih blokova se u konačnom modelu, ovisno o duljini ruku i/ili torza, po potrebi može smanjiti ili povećati. Rezultati simulacija korištenjem predloženog modela uspoređeni su s mjerenjima parametra  $S_{21}$  na ljudskom tijelu u frekvencijskom rasponu od 100 kHz do 100 MHz za tri udaljenosti između predajnika i prijemnika (10 cm, 40 cm i 120 cm). Rezultati mjerenja značajnije odudaraju od rezultata dobivenih simulacijama pri frekvencijama višim od 30 MHz.

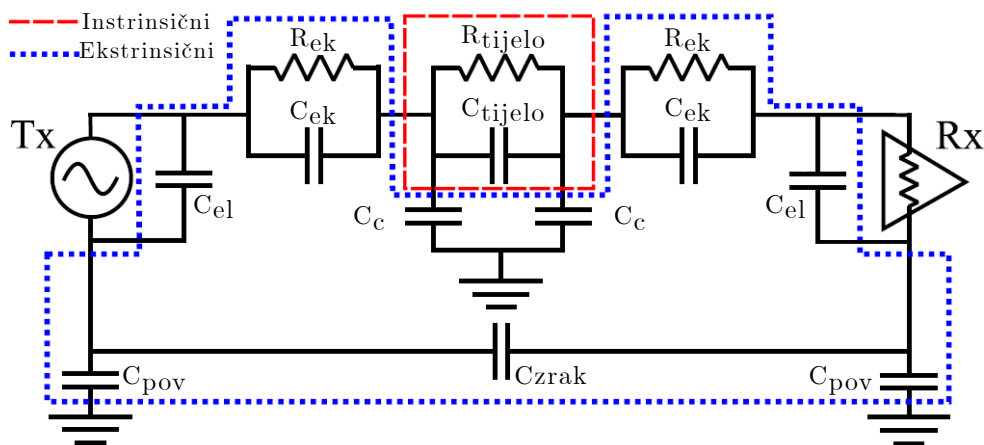
Sličan pristup modeliranju tijela pomoću više blokova kao u radu [22] korišten je i u znanstvenom radu [23]. Predloženim modelom uzeto je u obzir istih pet vrsta tkiva kao u radu [17], a model je prikazan slikom 2.6. Jedinični blok modela sastoji se od pet impedancija tkiva ( $Z_{ta1}$ - $Z_{ta5}$  za ruke te  $Z_{tt1}$ - $Z_{tt5}$



Slika 2.6: Model ljudskog tijela prema radu [23]

za torzo). Navedenih pet impedancija pojedinog bloka zajedno čine ukupnu impedanciju bloka ( $Z_{ta}$  za ruke te  $Z_{tt}$  za torzo). Blok još sadrži i ukupnu susceptanciju ( $B_{la}$  za ruke te  $B_{lt}$  za torzo) te ukupnu vodljivost ( $G_{la}$  za ruke te  $G_{lt}$  za torzo). One predstavljaju spoj između svakog od dvaju susjednih tkiva, a sastoje se od ( $B_{la1}$ - $B_{la5}$  te  $G_{la1}$ - $G_{la5}$  za ruke). Isti princip određivanja susceptancije i vodljivosti primjenjuje se i za torzo. Osim navedenoga, model uzima u obzir i spregu između referentnih elektroda ( $C_{cross}$ ), spregu između pojedine referentne elektrode i vanjskog uzemljenja ( $C_{GND}$ ) te impedanciju signalnih elektroda ( $Z_e$ ). Model je evaluiran mjerenjem prigušenja signala u frekvencijskom rasponu od 1 MHz do 40 MHz.

Znanstvenim radom [24] predložen je model ljudskog tijela prikazan jednim RC članom (intrinzični dio) s pripadajućom kapacitivnom spregom između tijela i tla. Osim navedenog RC člana, postoje još i RC članovi kojima je prikazano sučelje elektroda-koža te kapaciteti svakog od dvaju parova elektroda, kao i kapacitivna sprega između referentnih elektroda predajnika i prijemnika te sprega između svake od njih i tla. Model je detaljno opisan u sljedećem poglavlju, a prikaz korištenog osnovnog modela nalazi se na slici 2.7. U sklopu znanstvenog rada [24] predstavljen je i prošireni model koji uzima u obzir i

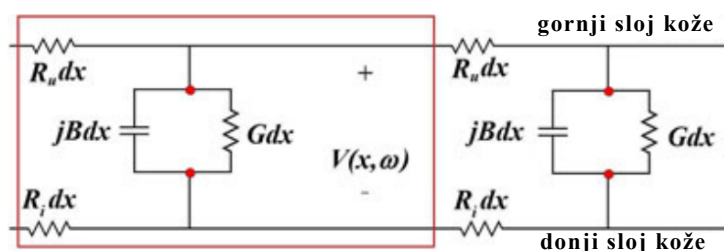


Slika 2.7: Model ljudskog tijela prema radu [24]

svojstva mjerne opreme. Model je vrednovan mjerenjima prigušenja pomoću VNA u frekvencijskom rasponu od 1 MHz do 100 MHz.

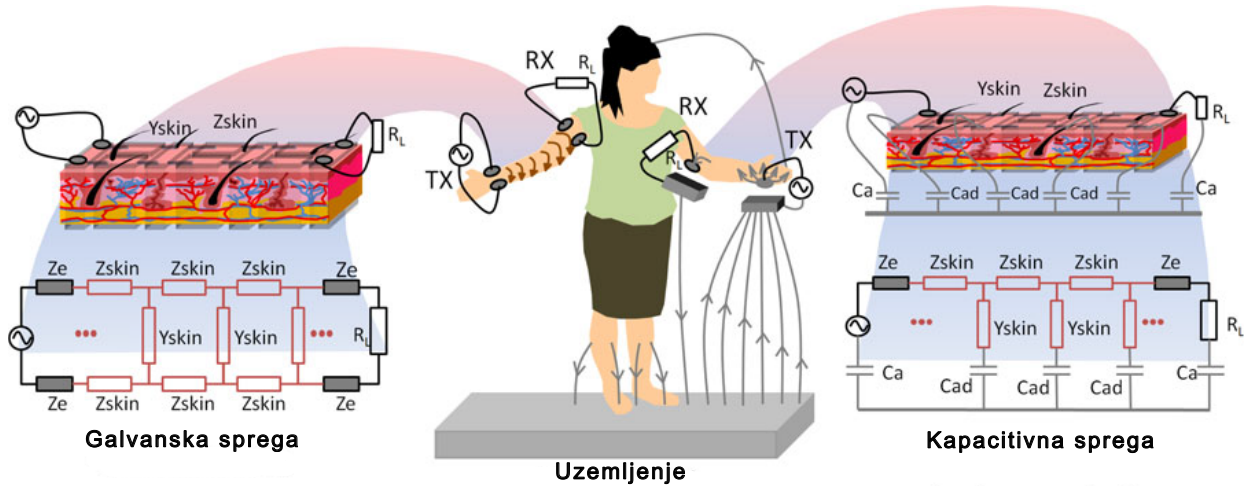
Znanstvenim radom [25] autori su predstavili model komunikacijskog kanala kao prijenosne linije. Model se sastoji od kaskadno spojenih blokova koji se nalaze između predajnika i prijemnika, što je vidljivo na slici 2.8. U radu je analiziran utjecaj admitancije kože, koja se javlja duž putanje signala, na prigušenje signala. Spomenutom su admitancijom modelirana elektrofiziološka svojstva ljudske kože. Vodljivost uglavnom određuju znojne žlijezde i kanali unutar staničnih membrana, a susceptanciju u najvećoj mjeri određuje gornji sloj kože, tzv. rožnati sloj (lat. *stratum corneum*). Mjereno je prigušenje signala u ovisnosti o frekvenciji sve do 1 GHz. Model je uspoređen s mjerenjima iz rada [26], a najbolja podudarnost rezultata je u frekvencijskom rasponu od 150 MHz do 600 MHz, pri čemu su korištene tvorničke Ag/Cl elektrode. Model je uspoređen s modelom iz rada [27] i utvrđena je podudarnost rezultata mjerenja u frekvencijskom rasponu od 300 MHz do 1 GHz, dok je kod nižih frekvencija odstupanje prigušenja signala značajnije nego pri usporedbi s [26].

Prošireni model kod kojega je ljudska koža razložena na više segmenata, tj. na veći broj impedancija, predstavljen je u radu [28]. Cilj autora bio je utvrđivanje veze između propagacijske konstante medija (koža, kao i kod [25]) i različitih transverzalnih impedancija ovisno o vrsti sprege. Predstavljena



Slika 2.8: Model ljudske kože prema radu [25]

su dva modela: za galvanski HBC i za kapacitivni HBC. Oba modela vidljiva su na slici 2.9. U ovom su modelu za kapacitivni HBC, za razliku od [25], u obzir uzete i kapacitivne sprege između kaskadno spojenih blokova i okoline.



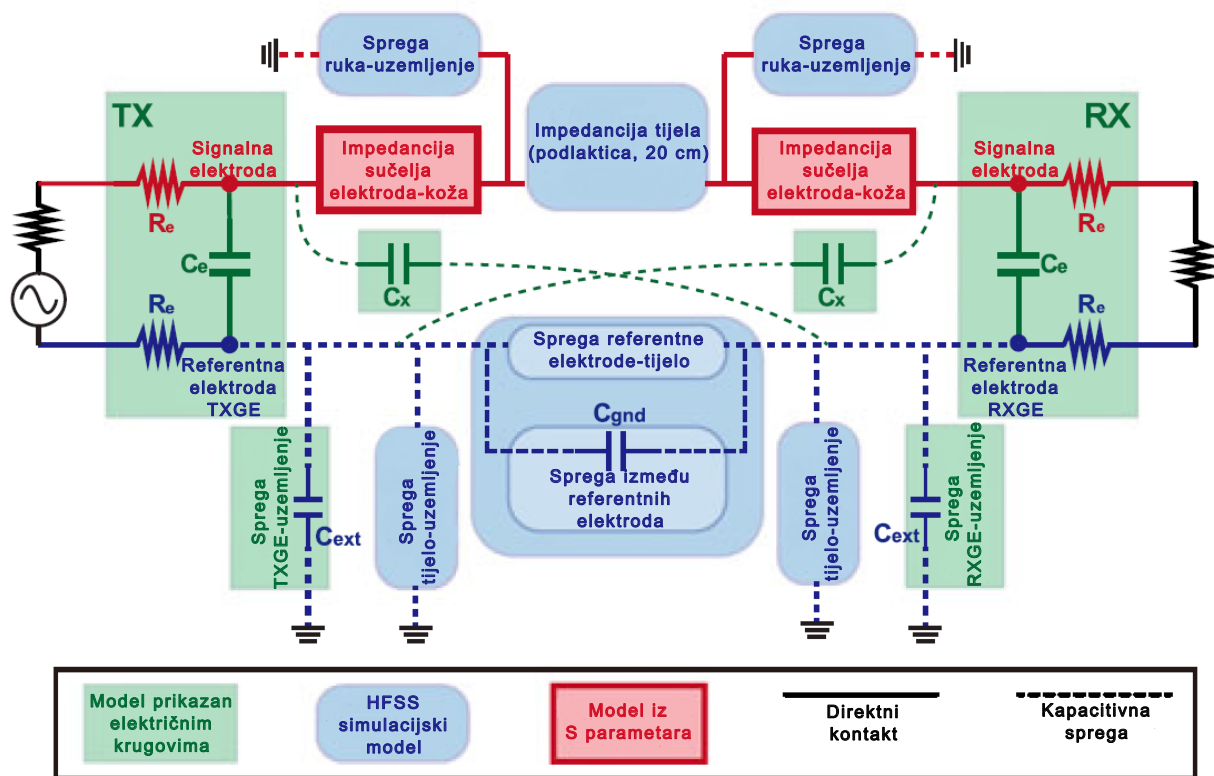
Slika 2.9: Model ljudske kože prema radu [28]

#### 2.1.4. Hibridni modeli

Hibridni modeli sastoje se od dvaju ili više tipova podmodela ljudskog tijela kao komunikacijskog kanala.

Autori u radu [29] predlažu model tijela koji se sastoji od triju različitih vrsta podmodela pomoću kojih je implementiran hibridni model prikazan slikom 2.10. Impedancija sučelja koža-elektroda izvedena je iz  $S$  parametara koji su dobiveni mjerenjem pomoću VNA. Impedancija sučelja elektroda-koža te impedancije između referentnih elektroda i vanjskog uzemljenja prikazane su pomoću otpora i kapaciteta. Takva se vrsta podmodela može okarakterizirati kao EC model. Sve ostale impedancije i sprege modelirane su FEM simulacijom u Ansys HFSS (engl. *High-frequency structure simulator*, HFSS) alatu te se ovaj dio hibridnog modela može okarakterizirati kao EM model. U ovom je radu pretpostavljeno kako je ljudsko tijelo uniformno, tj. ima konstantan iznos relativne permitivnosti i vodljivosti u svakoj točki. Raz-





Slika 2.10: Hibridni model ljudskog tijela prema radu [29]

log takvog pristupa je smanjenje složenosti HFSS analize i ušteda vremena. Uspoređeno je prigušenje signala predloženog modela s mjerenjima dobivenim pomoću VNA, analizatora spektra i baterijski napajanoj sklopa koji simulira stvarnu HBC primjenu. U potonjem je slučaju dobiveno i najbolje podudaranje između predloženog modela i mjerenja. Promatrani frekvencijski raspon je od 10 MHz do 150 MHz.

### 2.1.5. Fantom modeli

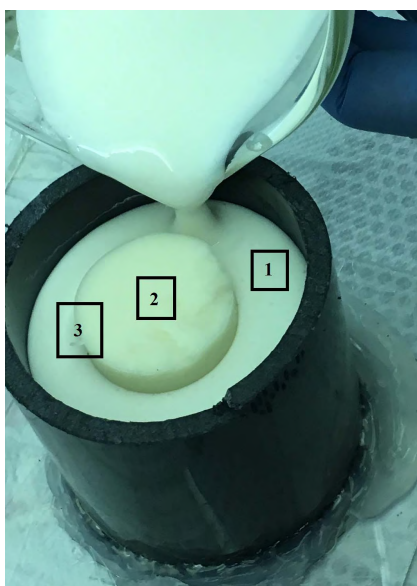
Najnoviji pokušaji modeliranja ljudskog tijela kao komunikacijskog medija idu u smjeru tvorbe tzv. fantom modela. Znanstvenici pokušavaju kombinacijom raznih materijala dobiti smjesu koja će po pitanju relativne permittivnosti i vodljivosti biti što bliže relativnoj permittivnosti i vodljivosti tkiva ljudskog tijela u željenom frekvencijskom opsegu.



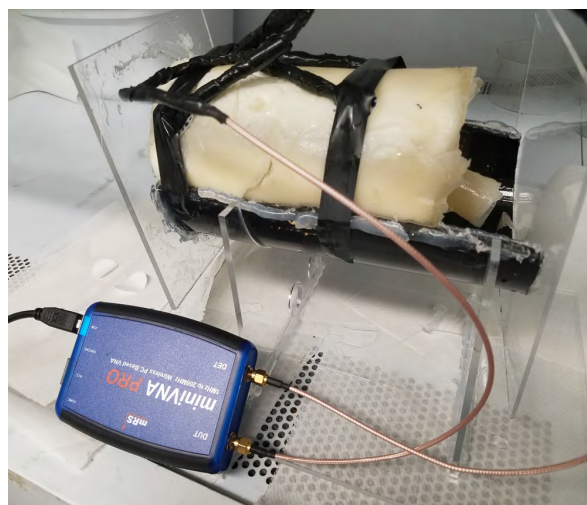
Znanstvenim radom [30] predložen je fantomski model čvrste strukture. Prva smjesa za izradu fantom modela sadrži kao dominantni materijal ulje šafranike s dodatkom primjesa kao što su: deionizirana voda, propilen glikol, želatina, formalin te posebni cementni materijal. U drugoj je smjesi dominantni materijal parafinsko ulje sa sljedećim dodacima: metilbenzenska kiselina, deionizirana voda, N-propanol, želatina, formalin i posebni cementni materijal. Dvije recepture testirane su zasebno s različitim udjelom korištenih materijala, a potom su testirane i mješavine dviju receptura u različitim omjerima. Slikom 2.11a prikazan je čvrsti model s dvjema različitim smjesama koje imaju slična svojstva kao ljudska tkiva. U frekvencijskom opsegu od 100 kHz do 100 MHz mjerene su permitivnost i vodljivost mišića, mokre kože, kortikalnog koštanog tkiva i masnog tkiva. Izmjerene su vrijednosti uspoređene s podacima iz literature [19]. Pri frekvenciji od 21 MHz, koja je po IEEE 802.15.6 standardu određena za HBC, postignuto je dobro podudaranje permitivnosti mišića, mokre kože, kortikalnog koštanog tkiva i masnog tkiva iz literature s permitivnošću različitih smjesa fantomskih modela. Što se tiče vodljivosti, dobra podudarnost postignuta je za masno tkivo i koštanu srž. Nedostatak je modela što su za podudaranje i vodljivosti i relativne permitivnosti za isto tkivo potrebne dvije različite smjese.

Radom [31] predložena je nova smjesa koja se sastoji od aluminijskog praha, natrijeva klorida i materijala TX-150 koji je prema [32] načinjen od polisaharida. Dobivena smjesa ima dobru podudarnost po pitanju vodljivosti i relativne permitivnosti s mišićnim tkivom čovjeka u promatranom frekvencijskom opsegu od 100 kHz do 1 MHz. Odstupanja postoje, ali ih pri frekvenciji 21 MHz gotovo i nema. Za konačni fantom model korištene su smjese iz [30] kako bi se modelirali koža, masno tkivo, kortikalno koštano

tkivo i koštana srž, dok je novopredložena smjesa korištena za modeliranje mišića. Fantom model testiran je mjerenjem prigušenja signala pomoću VNA uz spojene Ag/AgCl elektrode. Konačni izgled fantom modela prikazan je slikom 2.11b. Rezultati su uspoređeni s rezultatima mjerenja izvršenih na trima različitim osobama. Dobra podudarnost rezultata je u frekvencijskom opsegu od 15 MHz do 70 MHz.



(a)



(b)

**Slika 2.11:** *Fantom modeli: (a) Različite smjese korištene za model prema radu [30]: 1-smjesa s udjelom prve i druge recepture 60%/40%, 2-smjesa s udjelom prve i druge recepture 20%/80%, 3-sučelje između dvije smjese, (b) Model predstavljen u radu [31] u procesu testiranja*

### 2.1.6. Usporedba različitih modela kanala za komunikaciju putem ljudskog tijela

Tablicom 2.1 obuhvaćeni su svi prethodno spomenuti modeli kanala za komunikaciju putem ljudskog tijela. Za svaki model naveden je frekvencijski opseg za koji je predviđena upotreba modela. Također, ukoliko su u radu bile navedene, tablično su predstavljene duljine komunikacijskog kanala. One se razlikuju ovisno o dijelu tijela koji je modeliran, kao i o predviđenom

položaju predajnika i prijemnika. Ako su predstavljeni modeli evaluirani mjerenjima, za svaki od njih vidljivi su svi dostupni parametri elektroda. Osim navedenoga, tablica sadrži još i vrstu kojoj pojedini model pripada.

**Tablica 2.1:** *CC-HBC modeli*

Referenca	Frekvencijski opseg	Duljina komunikacijskog kanala	Dimenzije elektroda pri evaluaciji modela	Vrsta
[12]	1 MHz - 100 MHz	Promjenjiva (ovisno o potrebama mjerenja)	4 cm x 5 cm, 4 cm x 10 cm (bakrene elektrode), Nije navedeno (Ag/AgCl elektrode)	Empirijski
[13]	10 MHz - 100 MHz	1,5 m	2 cm x 2 cm	Empirijski
[14]	do 100 MHz	do 1,3 m	Nije navedeno	EM (matematički)
[15]	100 kHz - 1 GHz	od 0,5 m do 2,5 m	3 cm, 4 cm i 5 cm u promjeru	EM (matematički)
[16]	10 MHz - 100 MHz	Nije navedeno	Nije navedeno	EM(FEM)
[17]	1 MHz - 100 MHz	5 cm, 10 cm, 15 cm, 30 cm	2 cm x 2 cm (signalne), za referentne nije navedeno	EM(FEM)
[18]	1 MHz - 100 MHz	10 cm, 30 cm, 100 cm	2 cm x 2 cm (signalne), 9 cm x 11 cm (referentne)	EM(FEM)
[20]	20 MHz - 100 MHz	30 cm, 60 cm, 120 cm	2 cm x 2 cm (signalne), 9 cm x 11 cm (referentne)	EM(FEM)
[21]	1 MHz - 40 MHz	10 cm uz razmak između referentnih elektroda u rasponu od 1 cm do 30 cm	16 cm <sup>2</sup> (oblici: kvadrat, trokut, šesterokut, krug), 36 cm <sup>2</sup> (oblik: kvadrat), 100 cm <sup>2</sup> (oblik: kvadrat)	EM(FEM)
[22]	100 kHz - 100 MHz	10 cm, 40 cm, 120 cm	1,5 cm <sup>2</sup> (signalne), od 24 cm <sup>2</sup> do 60 cm <sup>2</sup> (referentne)	EC
[23]	1 MHz - 40 MHz	15 cm, 30 cm, 150 cm	2cm x 2cm (signalne), 4 cm x 4 cm (referentne)	EC
[24]	1 MHz - 100 MHz	15 cm, 30 cm, 140 cm	2 cm x 2 cm	EC
[25]	do 1 GHz	10 cm, 30 cm, 100 cm	Nije navedeno kod usporedbe s [26], 3,14 cm <sup>2</sup> kod usporedbe s [27]	EC
[28]	1 MHz - 100 MHz	15 cm, 30 cm, 45 cm, 125 cm, 150 cm	3 cm x 3 cm	EC
[30]	100 kHz - 100 MHz	Nije navedeno	Nije navedeno	Fantom
[31]	100 kHz - 100 MHz	14 cm	0,8 cm <sup>2</sup>	Fantom

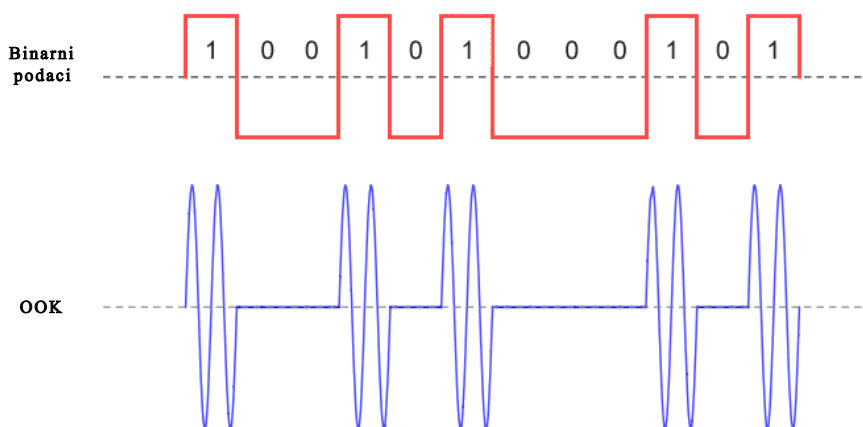
## 2.2. Modulacijski postupci kod kapacitivno spregnutih HBC sustava

U ovom potpoglavlju opisani su modulacijski postupci kod kapacitivno spregnutog HBC-a. Osim po vrsti modulacijskog postupka, postojeća sklopovska rješenja razlikuju se po radnoj frekvenciji, sklopovskoj složenosti i

primjeni samog sklopa.

### 2.2.1. Modulacijski postupak zasnovan na promjeni amplitude s dvama diskretnim stanjima

Kod modulacijskog postupka zasnovanog na promjeni amplitude s dvama diskretnim stanjima (engl. *On-Off Keying*, OOK), binarni se podaci prenose komunikacijskim sustavom na sljedeći način. Prisutnost signala vala nosioca označava kako je simbol koji se prenosi binarna „1“, dok odsutnost signala vala nosioca označava kako je simbol koji se prenosi binarna „0“. Princip rada OOK prikazan je slikom 2.12.



Slika 2.12: OOK modulacijski postupak [33]

U radu u kojemu je po prvi puta prezentiran koncept HBC-a korišten je OOK [1]. Predajnik je smješten na jednoj, a prijemnik na drugoj osobi, a do prijenosa informacija dolazi prilikom rukovanja dviju osoba. Frekvencija signala nosioca je 333 kHz. Binarni podaci se na predajnoj strani šalju iz mikrokontrolera na LC rezonator putem kojega se distribuira nosilac signala na signalnu elektrodu. Na prijemnoj se strani nalaze pojačalo, inverter te analogne sklopke i integrator kojima upravlja mikrokontroler u svrhu demodulacije. Nedostatak je izvedbe što su dimenzije predajnika i prijemnika re-

lativno velike te što osobe, kako bi komunikacija bila izvršena, trebaju stajati na velikim vodljivim ploham, tj. elektrodama.

Sklop za opću HBC namjenu predstavljen je u radu [34]. Specifičnost sklopa je što se pomoću zavojnica pokušava kompenzirati kapacitivna sprega između referentne elektrode i vanjskog uzemljenja. Korišteni modulacijski postupak je OOK, a radna frekvencija je 21 MHz i u skladu je s IEEE 802.15.6 standardom [2].

Autori su u radu [35] predstavili sklop koji koristi OOK modulacijski postupak, a naglasak je stavljen na sigurnost pri komunikaciji. Korisnik pri komunikaciji prenosi i sekvencu bitova kao sigurnosni ključ. Način komunikacije razlikuje se od klasičnog kapacitivno spregnutog HBC-a (engl. *Capacitive-Coupled HBC*, CC-HBC) jer se predajnik nalazi na ruci osobe putem koje se vrši komunikacija, dok se prijemu, koji je spojen na računalo, pristupa dodiranjem prsta. Radna frekvencija je 500 kHz.

CC-HBC se može koristiti i za slanje informacija zabavnog sadržaja. Znanstvenim radom [36] predstavljen je prijenos audia ljudskim tijelom. Signal je prenošen od prstiju jedne do prstiju druge ruke. Referentne elektrode su smještene zajedno s tiskanim pločicama sklopovlja. No, zbog svojih relativno velikih dimenzija nisu primjerene za nošenje nego su tijekom eksperimenta bile stacionirane na stolu. Radna frekvencija je 10 MHz.

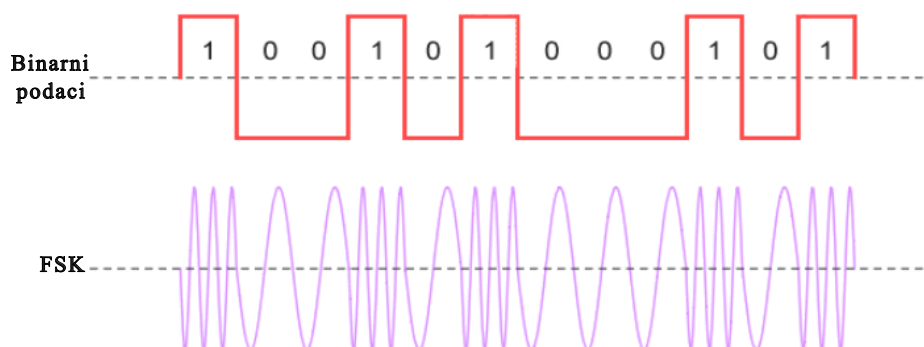
Znanstvenim radom [37] predstavljen je sklop s dvostrukom ulogom posredstvom HBC-a: prijenos podataka i prijenos energije sakupljene žetvom energije (engl. *energy harvesting*). Radna frekvencija je promjenjiva, a varira od 0,5 MHz do 2 MHz. Odabir radne frekvencije određen je rezonantnom frekvencijom pri kojoj će prijenos energije biti maksimalan.

Sklop namijenjen isključivo primjeni u medicini predstavljen je u radu [38].

Radi se o sklopu kojemu je zadaća konstantan nadzor otkucaja srca. Radna frekvencija je 21 MHz kao i u radu [34], što odgovara IEEE 802.15.6 standardu. Signal koji se prenosi od predajnika do prijemnika je signal dobiven snimanjem elektrokardiogramom.

### 2.2.2. Modulacijski postupak s diskretnom promjenom frekvencije

Kod modulacijskog postupka s diskretnom promjenom frekvencije (engl. *Frequency Shift Keying*, FSK) binarni se podaci prenose komunikacijskim sustavom na sljedeći način. Ovisno o tome prenosi li se binarna „1“ ili binarna „0“, frekvencija signala vala nosioca mijenja se na veću ili manju vrijednost frekvencije u odnosu na centralnu frekvenciju vala nosioca. Princip rada FSK prikazan je slikom 2.13.



Slika 2.13: FSK modulacijski postupak [33]

HBC sustav opće namjene predstavljen je u radu [39]. Prva testiranja izvedena su pomoću elektroda različitih dimenzija načinjenih od aluminijske folije. Cilj autora bio je napraviti HBC primopredajnike na različitim odjevnim predmetima ili predmetima koje osobe neprestano nose sa sobom. Stoga su aluminijska folija i bakrene trake iskorištene kao elektrode i implementirane su unutar remena, papuča, ručnog sata te dlanovnika. Kasnijim istraživanjem drugih autora pokazano je kako vrsta materijala korištenog za izradu elektroda nema gotovo nikakav utjecaj na performanse sustava sve

dok su korišteni materijali vodiči [40]. Radne frekvencije korištene kod FSK modulacijskog postupka u predstavljenim sklopovima su 140 kHz i 180 kHz.

I u radu [41] autori su predstavili FSK sklop opće HBC namjene. Ovo je jedini od radova pronađenih u literaturi koji koristi FSK modulacijski postupak, a u kojemu je predstavljen samo predajnik, bez prijemnika. Radna frekvencija je promjenjiva, a nalazi se u rasponu od 30 MHz do 120 MHz.

Znanstvenim radom [42] predstavljen je sustav koji koristi diskretnu modulaciju frekvencije s faznim diskontinuitetima (engl. *Discontinuous-Phase FSK*, DPFSK). Frekvencija nosioca postavljena je na 80 MHz. Evaluacija sklopa izvršena je s elektrodama predajnika i prijemnika postavljenima na ljudskoj podlaktici. Vrsta elektroda i udaljenost između njih nisu navedene. Za testiranje je iskorištena sekvenca od dvije digitalne riječi, tj. nije prenošen digitalizirani biološki signal.

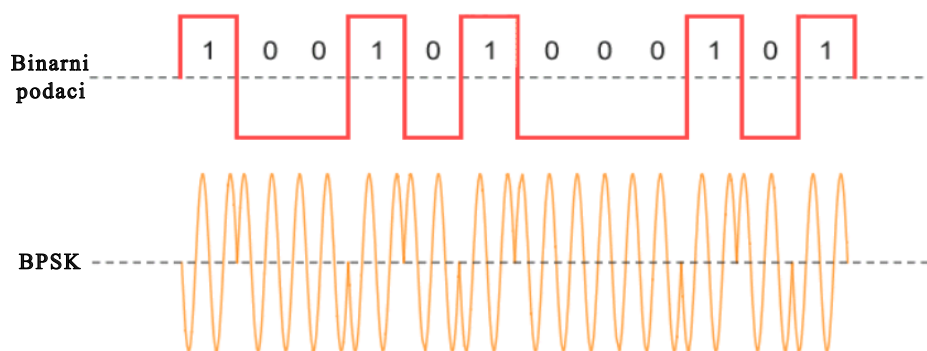
U najnovijem radu [43] pronađenom u literaturi autori koriste binarni FSK (engl. *Binary FSK*, BFSK) modulacijski postupak. No, predstavljeno rješenje nije klasični HBC sustav. Naime, predajnik se u ovom sustavu nalazi u neposrednoj blizini osobe koja na sebi nosi prijemnik. Sustav je namijenjen za prijenos zvuka, a prijemnik je implementiran u slušalicama. Frekvencija nosioca signala je 4,45 MHz.

### 2.2.3. Modulacijski postupak s diskretnom promjenom faze

Kod modulacijskog postupka s diskretnom modulacijom faze (engl. *Phase Shift Keying*, PSK) binarni se podaci prenose komunikacijskim sustavom na sljedeći način. Signal vala nosioca, ukoliko je simbol koji se prenosi binarna „1“, fazno je zakrenut  $180^\circ$  u odnosu na signal vala nosioca ukoliko je simbol koji se prenosi binarna „0“. Takav se modulacijski postupak naziva diskret-



nom modulacijom faze s dvjema fazama (engl. *Binary Phase Shift Keying*, BPSK). Princip rada BPSK prikazan je slikom 2.14. U slučaju prijenosa više bitova po simbolu iznos faznog zakreta je manji. Osim BPSK, najčešće se koriste još i kvadratura diskretna modulacija faze (engl. *Quadrature Phase Shift Keying*, QPSK) te modulacije faze s 8, 16 i 32 diskretna stanja (8 - PSK, 16 - PSK i 32 - PSK).



Slika 2.14: BPSK modulacijski postupak [33]

Autori su u radu [44] predstavili sklop dvostruke namjene. Naime, za prijenos podataka zabavnog sadržaja u tzv. ET (engl. *entertainment*, ET) načinu rada koristi se BPSK (engl. *Biphase Shift Keying*, BPSK) modulacijski postupak, tj. binarna diskretna modulacija faze. U ovom načinu rada korištena su dva frekvencijska opsega. Prvi sadržava frekvencije od 20 MHz i 60 MHz, a drugi frekvencije od 140 MHz i 180 MHz. Drugi način rada je tzv. HC (engl. *healthcare*, HC) i namijenjen je za zdravstvene svrhe. U tom načinu rada koristi se OOK modulacijski postupak, a radna frekvencija je 13,56 MHz.

Slično kao kod rada [44], i u radu [45] predstavljen je sustav dvostruke namjene, tj. sustav s dva načina rada. Jedan način rada omogućava prijenos multimedijских podataka i naziva se, kao i kod rada [44], ET način rada. Drugi način rada služi za prijenos podataka dobivenih iz bioloških signala i

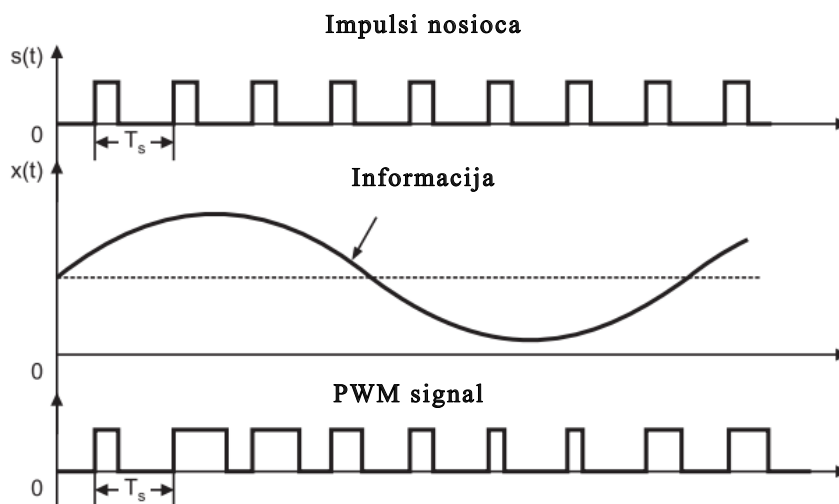


zove se standardni. Kod ET načina rada korišten je modulacijski postupak kvadrature diskretne modulacije faze (engl. *Quadrature Phase Shift Keying*, QPSK) s frekvencijama smještenim oko 42 MHz (31,5 MHz i 52,5 MHz) te 168 MHz (140 MHz i 180 MHz). Standardni način rada je u skladu s IEEE 802.15.6 standardom, koristi BPSK, a centralna frekvencija je 21 MHz.

#### 2.2.4. Ostali modulacijski postupci

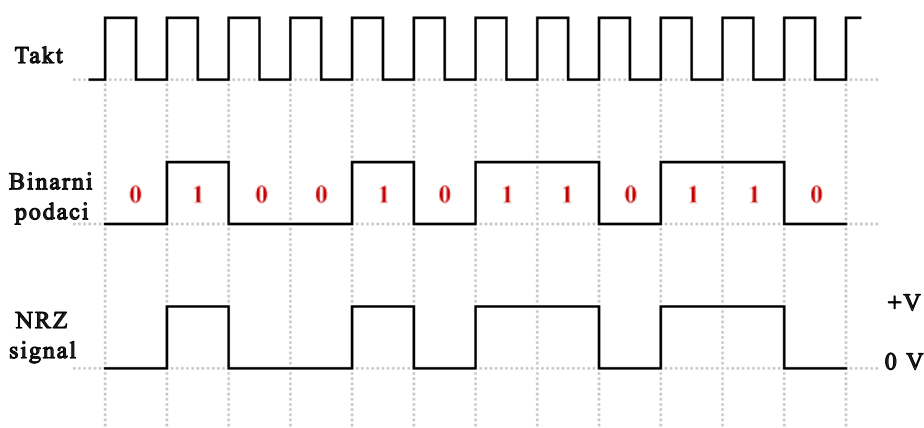
Na tragu znanstvenog rada [39] predstavljen je još jedan sustav kojim se HBC sustav pokušava implementirati u sklopu odjeće [46]. Razlika između predstavljenog rješenja i klasičnog CC-HBC sustava je u povratnoj sprezi. U ovom je slučaju povratna sprega između referentnih elektroda predajnika i prijemnika ostvarena preko posebnog rukava načinjenog od vodljivog materijala. Ovaj se sustav može smatrati i vrstom hibridnog rješenja između galvanski i kapacitivno spregnutog HBC-a. Korišten je pulsno-širinski modulacijski postupak (engl. *Pulse Width Modulation*, PWM). Radna frekvencija je 250 kHz. Kod PWM modulacijskog postupka vrši se uzorkovanje informacije s frekvencijom uzorkovanja koja je vezana uz nosilac, tj. impulse nosioca. PWM signal sastoji se od niza impulsa čija širina, tj. vrijeme ispunje (engl. *Duty Cycle*) ovisi o amplitudi uzorkovanog signala informacije kako je prikazano slikom 2.15.

U literaturi postoji i korištenje linijskog binarnog koda bez međustanja (engl. *Non-return-to-zero*, NRZ) u svrhu prijenosa fotografija s jedne ljudske ruke na drugu [48], kao i sklopovskog rješenja koje osim NRZ koristi i pulsno amplitudni modulacijski postupak razine 4, tj. PAM4 (engl. *Pulse Amplitude Modulation 4-level*) te OOK [49]. Kod NRZ linijskog binarnog kodiranja binarni podaci predstavljeni su visokom logičkom razinom (+V) ukoliko se radi



Slika 2.15: PWM modulacijski postupak [47]

o logičkoj jedinici te niskom logičkom razinom (0 V) ukoliko se radi o logičkoj nuli. Kod NRZ signala ne postoji nijedna druga naponska razina osim dviju navedenih, kako je prikazano slikom 2.16. Postoji i NRZ kodiranje kod kojega se za nisku logičku razinu koristi negativan napon (-V). Modulacijski postupak kod sklopa predstavljenog u radu [49] bira se programski ovisno o potrebnoj brzini prijenosa i uvjetima komunikacijskog kanala.



Slika 2.16: NRZ linijsko kodiranje [50]

### 3. DISKRETNI MODULACIJSKI POSTUPAK ZASNOVAN NA PROMJENI INDEKSA INDUKTIVITETA

Prvi modulacijski postupak predložen u sklopu ove disertacije naziva se diskretni modulacijski postupak zasnovan na promjeni indeksa induktiviteta za kapacitivno spregnutu komunikaciju putem ljudskog tijela (engl. *Inductance Index Modulation CC-HBC*, IIM-CC-HBC) [51].

U posljednje se vrijeme u komunikacijskim sustavima sve više koristi postupak indeksne modulacije (engl. *Index Modulation*, IM) [52] u svrhu bolje spektralne i energetske učinkovitosti. Kod ovoga se postupka iskorištavaju indeksi dijelova komunikacijskog sustava za kreiranje novog signalnog prostora kako bi se učinkovito prenijeli informacijski bitovi.

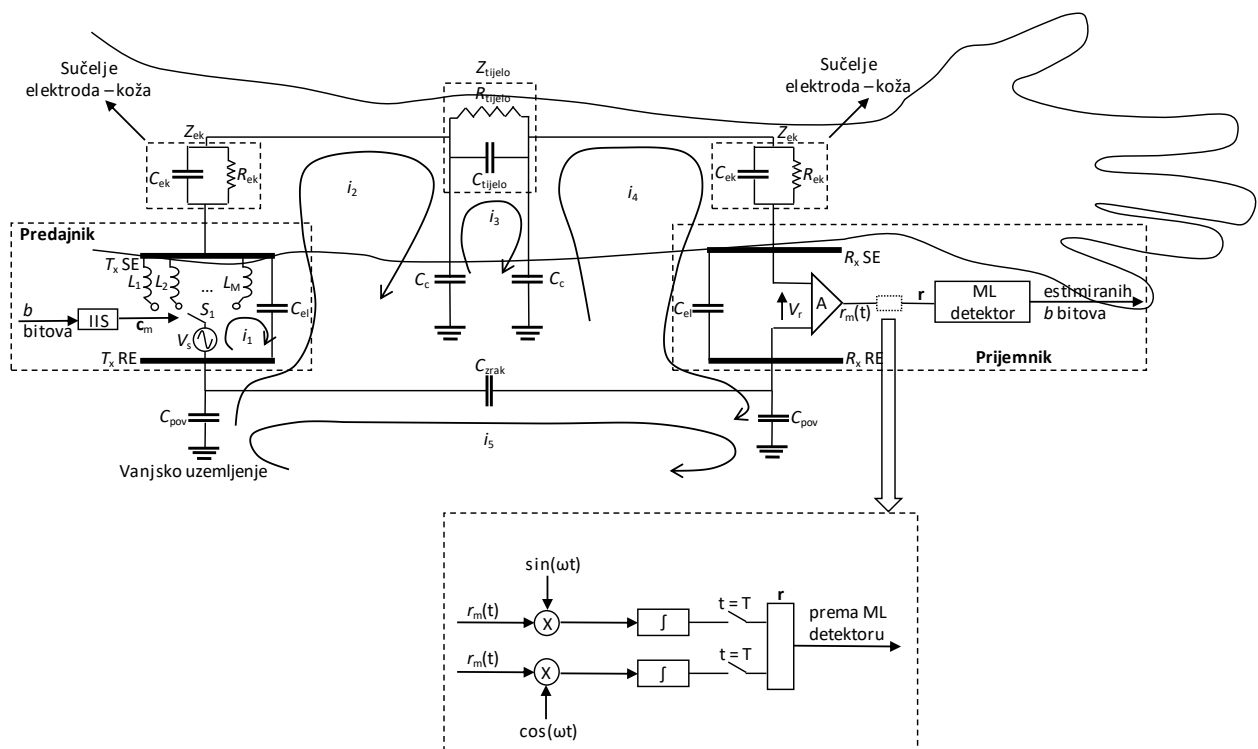
Primjena IM postupka može se pronaći kod molekularnih komunikacija [53], ali i u drugim područjima (prijenos podataka s više nosilaca, kodna indeksna modulacija, komunikacijski sustavi s više korisnika, prostorna modulacija) [54–57]. Jedno od rješenja koje također koristi IM je diskretna prostorna modulacija (engl. *Space Shift Keying*, SSK) za komunikacijske sustave s više odašiljačkih i prijemnih antena (engl. *Multiple-Input-Multiple-Output*, MIMO) [58]. Kod SSK sustava indeksi antena odabiru se pomoću bitova koji se žele prenijeti do prijemnika. U tom slučaju nije potrebno sklopovlje za amplitudnu i/ili faznu modulaciju i detekciju, što značajno smanjuje sklopovsku

složenost.

IIM-CC-HBC nadahnut je prednostima koje omogućava SSK modulacijski postupak. U ovom slučaju to su niska sklopovska složenost i dobra energetska učinkovitost.

### 3.1. Model IIM-CC-HBC sustava

Prikaz IIM-CC-HBC komunikacijskog sustava nalazi se na slici 3.1. Kako je i vidljivo na slici, predajnik i prijemnik smješteni su na ljudskoj ruci. Njihove su signalne elektrode ( $T_x$  SE i  $R_x$  SE) kapacitivno spregnute preko ljudske ruke kao medija, dok su im referentne elektrode međusobno spregnute posredstvom zraka kao medija.



Slika 3.1: IIM-CC-HBC komunikacijski sustav

Općenito, komunikacijski se kanal sastoji od dva dijela: instrinzičnog i ekstrinzičnog [24]. Intrinzični dio uključuje tkiva ljudske ruke od sučelja predajnik-ljudsko tijelo do sučelja ljudsko tijelo-prijemnik, a može se mo-

delirati kao impedancija  $Z_{\text{tijelo}}$  koja se sastoji od paralelno spojenih otpora tijela ( $R_{\text{tijelo}}$ ) i kapaciteta tijela ( $C_{\text{tijelo}}$ ). Vrijednosti parametara  $R_{\text{tijelo}}$  i  $C_{\text{tijelo}}$  su promjenjive i ovise o električnim svojstvima (permitivnost i vodljivost) sljedećih ljudskih tkiva: koža, mišići, masno tkivo, kortikalno koštano tkivo i spužvasto koštano tkivo. Ekstrinzični dio komunikacijskog kanala čine sljedeći članovi: sučelje elektroda-koža, kapacitet između predajne i referentne elektrode predajnika, kapacitet između predajne i referentne elektrode prijemnika, sprega referentnih elektroda putem vanjskog uzemljenja (tzv. povratni put) te kapaciteti uzrokovani kapacitivnom spregom između ljudskog tijela i vanjskog uzemljenja.

Sučelja elektroda-koža, koja uključuju signalne elektrode predajnika ( $T_x$  SE) i prijemnika ( $R_x$  SE), modelirana su impedancijom  $Z_{\text{ek}}$  koja se sastoji od paralelno spojenih otpora između elektrode i kože ( $R_{\text{ek}}$ ) i kapaciteta između elektrode i kože ( $C_{\text{ek}}$ ). Nadalje, kapacitivna sprega između ljudskog tijela i vanjskog uzemljenja, tj. električnog potencijala Zemlje (nultog potencijala) modelirana je kapacitetom  $C_c$ , dok je kapacitet između signalnih i referentnih elektroda označen s  $C_{\text{el}}$ .  $C_{\text{zrak}}$  i  $C_{\text{pov}}$  označavaju međusobnu spregu između referentnih elektroda predajnika ( $T_x$  RE) i prijemnika ( $R_x$  RE) te spregu između referentnih elektroda i vanjskog uzemljenja. Kapacitet koji nastaje između referentne i signalne elektrode predajnika i prijemnika računa se kao:

$$C_{\text{el}} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_{\text{el}}}, \quad (3-1)$$

gdje je:

$\varepsilon_0$  - relativna permitivnost vakuuma,

$\varepsilon_r$  - relativna permitivnost dielektrika (u ovom slučaju dielektrik je zrak),

$S$  - površina elektrode,

$d_{el}$  - razmak između elektroda.

Parametri  $C_{zrak}$  i  $C_{pov}$  kod elektroda kvadratnog oblika se, prema [21], računaju kao:

$$C_{zrak} = [1 + 1.3105(\frac{D_{TR}}{l})^{0.1075}] \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{D_{TR}} \quad (3-2)$$

i

$$C_{pov} = 2[1 + 3.1124(\frac{2D_{gnd}}{l})^{0.9691}] \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{2D_{gnd}}, \quad (3-3)$$

pri čemu je:

$l$  - duljina stranice elektrode,

$D_{TR}$  - udaljenost između predajnika i prijemnika,

$D_{gnd}$  - udaljenost između referentnih elektroda i tla.

Kapacitet  $C_c$  se, prema [59], za osobu koja stoji računa kao:

$$C_c = C_{\infty,ruka} + C_{P,ruka}, \quad (3-4)$$

gdje je:

$C_{\infty,ruka}$  - kapacitet objekta (u ovom slučaju objekt je ruka) smještenog na značajnoj udaljenosti iznad tla,

$C_{P,ruka}$  - kapacitet koji je posljedica blizine objekta u odnosu na tlo.

Kod proračuna parametara komunikacijskog kanala za IIM-CC-HBC modulacijski postupak ruka se, prema radu [59], može modelirati kao cilindar promjera  $d$  i duljine  $a$ . U disertaciji je pretpostavljeno da se ruka uvijek na-

lazi u horizontalnom položaju. Dakle, kapaciteti  $C_{\infty,ruka}$  i  $C_{P,ruka}$  za model ruke se, prema [59], računaju kao:

$$C_{\infty,ruka} = 2\pi\epsilon_0 \frac{2d + a}{3} \quad (3-5)$$

i

$$C_{P,ruka} = \pi\epsilon_0 d \left[ \frac{d}{4GND_z} + \ln \left( 1 + \frac{a}{GND_z} \right) \right], \quad (3-6)$$

gdje je:

$d$  - promjer ruke,

$a$  - duljina dijela ruke koji predstavlja komunikacijski kanal,

$GND_z$  - udaljenost između ljudske ruke i tla kada je ruka u horizontalnom položaju.

Ukoliko se pretpostavi kako je promatrani dio tijela, što je u ovom slučaju ruka, izotropan i u presjeku ekvipotencijalan, tada se vrijednosti parametara  $R_{tijelo}$  i  $C_{tijelo}$  prema radu [22] računaju kao:

$$R_{tijelo} = \frac{a}{\sigma_t \cdot A}, \quad (3-7)$$

$$C_{tijelo} = \frac{\epsilon_{rt} \cdot \epsilon_0 \cdot A}{a}, \quad (3-8)$$

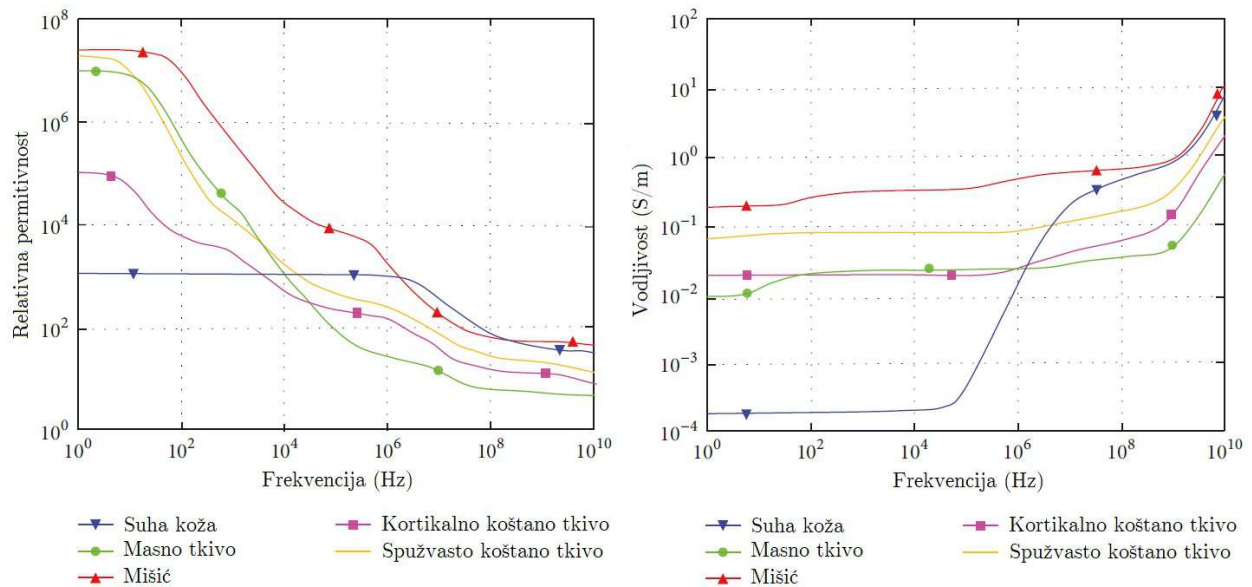
pri čemu je:

$A$  - površina presjeka promatranog dijela tijela,

$\sigma_t$  - vodljivost tkiva,

$\epsilon_{rt}$  - relativna permitivnost tkiva.

Relativna permitivnost i vodljivost u ovisnosti o frekvenciji za pet vrsta tkiva preuzete su iz literature [19], [60] a vrijednosti su prikazane slikom 3.2.



**Slika 3.2:** Relativna permitivnost i vodljivost tkiva u ovisnosti o frekvenciji [9]

Sučelje elektroda-koža može se modelirati kao paralelni  $R_{ek} - C_{ek}$  član [24], [61]. Pri tome  $R_{ek}$  predstavlja vodljivost gornjeg sloja kože (lat. *epidermis*).  $C_{ek}$  se može promatrati kao pločasti kondenzator čije su vodljive plohe signalna i referentna elektroda predajnika, tj.  $T_x$  SE i  $R_x$  SE s jedne strane te tkiva ispod gornjeg sloja kože s druge strane. Gornji sloj kože predstavlja izolator takvog pločastog kondenzatora.

Na predajnoj strani nalazi se birač induktiviteta koji je zadužen za odabir odgovarajućeg induktiviteta s obzirom na niz bitova  $b$  koji je ušao u IIS.  $M$  induktiviteta spojeno je između naponskog izvora  $V_s$  i signalne elektrode predajnika ( $T_x$  SE), kao što je prikazano slikom 3.1.

Na prijemnoj je strani, između signalne ( $R_x$  SE) i referentne elektrode ( $R_x$  RE), smješteno pojačalo (A).



### 3.2. Način rada IIM-CC-HBC sustava

Kod IIM-CC-HBC modulacijskog postupka je  $b$  informacijskih bitova preslikano u različita diskretna stanja komunikacijskog kanala između predajnika i prijemnika komunikacijskog sustava. Na predajnoj se strani odabire jedan od  $M = 2^b$  induktiviteta koji će biti korišteni kod prijenosa signala ljudskim tijelom. Pri tome  $b$  označava broj mapiranih informacijskih bitova. Stanje CC-HBC komunikacijskog kanala mijenja se odabirom jednog od  $b$  različitih induktiviteta. Na prijemnoj se strani provodi estimacija kanala pomoću detektora maksimalne sličnosti (engl. *Maximum-Likelihood*, ML) i vrši se detekcija informacijskih bitova.

Kao što je vidljivo na slici 3.1, niz koji sadrži  $b$  informacijskih bitova (simbol) predaje se biraču induktiviteta (engl. *Inductance Index Selector*, IIS) koji ga, pomoću sklopke  $S_1$ , mapira u indeks aktiviranog induktiviteta. Pri tome je:

$$b = \log_2(M), \quad (3-9)$$

gdje je:

$b$  - broj bitova informacijskog niza,

$M$  - duljina vektora  $\mathbf{c}_m$ .

Vektor  $\mathbf{c}_m$  je izlaz iz IIS-a koji određuje aktivirani induktivitet. Broj različitih CC-HBC kanala između predajnika i prijemnika određen je brojem različitih induktiviteta na predajniku:

$$\mathbf{c}_m = \left[ 0 \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad 0 \right]^T. \quad (3-10)$$

U navedenom je vektoru vrijednost različita od nule samo na  $m$ -toj poziciji, a  $(\cdot)^T$  označava operator transponiranja matrice. Nadalje, vektorom  $\mathbf{c}_m$  je, na izlazu iz birača induktiviteta, određen jedan od  $M$  mogućih induktiviteta koji će biti aktiviran.  $b$  bitova mapirano je u indeksu aktiviranog induktiviteta, a signal lokalnog oscilatora predajne strane predan je signalnoj elektrodi preko  $m$ -tog aktiviranog induktiviteta.

### 3.2.1. Detekcija primljene informacije kod IIM-CC-HBC

Općenito, neka je signal na prijemniku definiran kao:

$$r_m(t) = s_m(t) + n(t), \quad 1 \leq m \leq M, \quad (3-11)$$

gdje je:

$s_m(t)$  - jedan od mogućih  $M$  signala  $\{s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)\}$  s pripadajućom vjerojatnošću pojavljivanja  $P_m$ ,

$n(t)$  - Gaussov bijeli šum u kojemu svaka varijabla ima srednju vrijednost nula i spektralnu gustoću snage  $\frac{N_0}{2}$ .

Gaussova slučajna varijabla opisana je pomoću sljedećih dvaju parametara: srednjom vrijednošću  $\mu \in \mathbb{R}$  i varijancom  $\sigma^2$ . Skraćeni oblik zapisa Gaussove slučajne varijable s navedenim parametrima je  $X \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ , a funkcija gustoće vjerojatnosti (engl. *Probability Density Function*, PDF) određena je kao:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}. \quad (3-12)$$

Prijelaz iz kontinuirane u diskretnu domenu vrši se, prema slici 3.1, na način da se primljeni signal množi sa signalom lokalnog oscilatora te se na-

kon integriranja uzorkuje frekvencijom  $\frac{1}{T}$ . Signal na prijemniku, ukoliko je aktiviran  $m$ -ti induktivitet na predajniku, može se zapisati kao:

$$r_m = s_m + n = \sqrt{b\psi_b} \mathbf{h} \mathbf{c}_m + n, \quad 1 \leq m \leq M, \quad (3-13)$$

pri čemu je  $\psi_b$  prosječan odnos signal/šum po bitu, tj.:

$$\psi_b = \frac{E_b}{N_0}, \quad (3-14)$$

gdje je:

$E_b$  - energija bita,

$N_0$  - spektralna gustoća snage šuma.

U izrazu (3-13)  $n$  je aditivni bijeli Gaussov šum (engl. *Additive White Gaussian Noise*, AWGN) s kompleksnom Gaussovom razdiobom sa srednjom vrijednošću nula i varijancom  $\frac{N_0}{2}$ . S obzirom na pretpostavljenu prisutnost AWGN šuma, u cijeloj disertaciji je pretpostavljen AWGN model kanala.

Vjerojatnost pojave svakog simbola zastupljena je s jednakom vjerojatnošću pa vrijedi:

$$P_m = \frac{1}{M}, \quad \forall m. \quad (3-15)$$

Vektor  $\mathbf{h}$  je dimenzije  $1 \times M$ , pri čemu  $M$  predstavlja broj različitih CC-HBC kanala između predajnika i prijemnika  $h_m$  koji ovise o aktiviranom induktivitetu na predajnoj strani, a može se napisati kao:

$$\mathbf{h} = \left[ h_1 \quad \dots \quad h_m \quad \dots \quad h_M \right]. \quad (3-16)$$

Vektor  $\mathbf{h}$  definiran je prijenosnom funkcijom, tj. omjerom napona između elektroda prijemnika  $V_r$  i napona lokalnog oscilatora  $V_s$  na predajniku. Svaki element vektora  $\mathbf{h}$  je dvodimenzionalan. Omjer napona  $\frac{V_r}{V_s}$  određuje se rješavanjem jednadžbi opisanih Kirchoffovim zakonima za napon [59], [62]. Matrični oblik navedenih jednadžbi prikazan je izrazom (3-17).

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{el} + Z_1 & -Z_{el} & 0 & 0 & 0 \\ -Z_{el} & Z_{el} + Z_{ek} + Z_c + Z_{pov} & -Z_c & 0 & -Z_{pov} \\ 0 & -Z_c & 2Z_c + Z_{tijelo} & Z_c & 0 \\ 0 & 0 & -Z_c & -Z_c + Z_{ek} + Z_y + Z_{pov} & -Z_{pov} \\ 0 & -Z_{pov} & 0 & -Z_{pov} & 2Z_{pov} + Z_{zrak} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix}, \quad (3-17)$$

Napon  $V_r$  određuje se kao:

$$V_r = i_4 \cdot Z_y, \quad (3-18)$$

pri čemu je  $Z_y$  impedancija elektroda na prijemniku, a izražava se kao:

$$Z_y = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{el}}, \quad (3-19)$$

dok je:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f, \quad (3-20)$$

pri čemu  $f$  označava frekvenciju. Preostale impedancije iz izraza (3-17) računaju se na sljedeći način:

$$Z_{el} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{el}}, \quad (3-21)$$

$$Z_1 = j \cdot \omega \cdot L, \quad (3-22)$$

$$Z_{ek} = \frac{1}{\frac{1}{R_{ek}} + j\omega C_{ek}}, \quad (3-23)$$

$$Z_c = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_c}, \quad (3-24)$$

$$Z_{pov} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{pov}}, \quad (3-25)$$

$$Z_{tijelo} = \frac{1}{\frac{1}{R_{tijelo}} + j\omega C_{tijelo}}, \quad (3-26)$$

$$Z_{zrak} = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_{zrak}}. \quad (3-27)$$

Općenito, faza i amplituda struje  $i_1$  mijenjaju se uslijed promjene aktiviranog induktiviteta  $L_m$ . Posljedica je takve promjene i mijenjanje svih ostalih struja ( $i_2, i_3, i_4, i_5$ ) prikazanih slikom 3.1. Promjena napona  $V_T$  je, prema izrazu (3-18), posljedica promjene struje  $i_4$ . Pomoću navedenog napona može se demodulirati primljeni simbol informacije.

Na prijemnoj je strani potrebno obaviti estimaciju indeksa induktiviteta korištenog pri prijenosu podataka kako bi se ispravno demodulirao primljeni signal. Estimacija indeksa induktiviteta svodi se na estimaciju CC-HBC kanala na prijemu.

Ukoliko se svi simboli pojavljuju s jednakom vjerojatnošću, kako je ovdje pretpostavljeno, tada je, prema izvoru [63], za detekciju optimalan ML detektor.

Signal na prijemu prikazan izrazom (3-11) može se prikazati u vektor-

skom obliku kao:

$$\mathbf{r} = \mathbf{s}_m + \mathbf{n}, \quad 1 \leq m \leq M. \quad (3-28)$$

Treba napomenuti kako je  $\mathbf{r}$  dvodimenzionalan.

Estimacija indeksa induktiviteta, u svrhu detekcije primljene informacije, određena je, prema [63] za ML detektor, sljedećim izrazom:

$$\begin{aligned} \hat{m} &= \arg \max_{1 \leq m \leq M} [P_m p(\mathbf{r}|\mathbf{s}_m)] \\ &= \arg \max_{1 \leq m \leq M} P_m [p(\mathbf{r} - \mathbf{s}_m)] \\ &= \arg \max_{1 \leq m \leq M} \left[ P_m \frac{1}{\pi N_0} e^{-\frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|^2}{N_0}} \right] \\ &\stackrel{(a)}{=} \arg \max_{1 \leq m \leq M} \left[ P_m e^{-\frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|^2}{N_0}} \right] \\ &= \arg \max_{1 \leq m \leq M} \left[ \ln P_m - \frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|^2}{N_0} \right] \\ &\stackrel{(b)}{=} \arg \max_{1 \leq m \leq M} \left[ \frac{N_0}{2} \ln P_m - \frac{1}{2} \|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|^2 \right]. \end{aligned} \quad (3-29)$$

$p(\mathbf{r}|\mathbf{s}_m)$  u izrazu (3-29) predstavlja uvjetnu vjerojatnost, tj. vjerojatnost da je uz poslani  $\mathbf{s}_m$  primljen  $\mathbf{r}$  dok je  $p(\cdot)$  PDF šuma.  $\|\cdot\|$  predstavlja normu vektora. Funkcija *arg max* traži onaj  $m$  uz koji će argument funkcije *arg max* imati najveću vrijednost. U izrazu (3-29) korištena su sljedeća pojednostavljena:

(a):  $\frac{1}{\pi N_0}$  je pozitivne i konstantne vrijednosti (nije ovisan o  $m$ ) i može se izostaviti.

(b):  $\frac{N_0}{2}$  je pozitivan i konstantan broj pa se može izostaviti. Isto vrijedi i za  $\frac{1}{2}$  ispred  $\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|^2$ .

Za slučaj kada je vjerojatnost pojave svakog simbola zastupljena s jednakom vjerojatnošću, tj. uzevši u obzir izraz (3-15), izraz (3-29) svodi se na:

$$\begin{aligned}\hat{m} &= \arg \max_{1 \leq m \leq M} \left[ -\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|^2 \right] \\ &\stackrel{(d)}{=} \arg \min_{1 \leq m \leq M} \|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|,\end{aligned}\tag{3-30}$$

pri čemu je korišteno sljedeće pojednostavljenje:

(d): traženje maksimuma izraza  $-\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|^2$  ekvivalentno je traženju minimuma njegove negativne vrijednosti, tj.  $\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|^2$ . Kvadrat se također može izostaviti jer je za *arg min* svejedno promatra li se  $\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|^2$  ili drugi korijen tog izraza.

Kako bi estimirao indeks  $\hat{m}$ , koji predstavlja indeks aktiviranog induktiviteta na predajniku, ML detektor traži koji vektor  $\mathbf{s}_m$  ima najmanju Euklidovu udaljenost u odnosu na vektor  $\mathbf{r}$ . Kod IIM-CC-HBC modulacijskog postupka moguće je imati  $M$  diskretnih stanja. Uz  $b$  mapiranih bitova te odnos signal/šum po bitu  $\psi_b$ , izraz (3-30) prelazi u sljedeći izraz:

$$\hat{m} = \arg \min_m \left\| \mathbf{r} - \sqrt{b\psi_b} \mathbf{h}_m \right\|^2, \quad m \in \{1, 2, \dots, M\}.\tag{3-31}$$

### 3.2.2. Vjerojatnost pogreške pri detekciji bita kod IIM-CC-HBC

Svaki detektor, uključujući ML detektor, dijeli prostor konstelacijskog dijagrama primljenog signala  $\mathbb{R}^2$  na  $M$  područja, označenih s  $D_1, D_2, \dots, D_M$ , takvih da ako je  $\mathbf{r} \in D_m$  detektor donosi odluku da je poslana poruka  $m$ . Područje  $D_m$ ,  $1 \leq m \leq M$ , naziva se područje odluke poruke  $m$  (u daljnjem tekstu samo područje odluke), tj. za svaki primljeni signal koji je detektiran

unutar  $D_m$  detektor će odlučiti kako se radi o signalu  $m$ .

Pogreška pri prijenosu simbola događa se ukoliko, uz poslanu poruku  $\mathbf{s}_m$ , primljeni signal  $\mathbf{r}$  nije unutar područja odluke  $D_m$ . Vjerojatnost pogreške pri detekciji simbola kod detektora s područjima odluke  $D_m$ ,  $1 \leq m \leq M$  izražava se, prema izvoru [63], kao:

$$\begin{aligned} P_e &= \sum_{m=1}^M P_m P[\mathbf{r} \notin D_m \mid \mathbf{s}_m \text{ poslana}] \\ &= \sum_{m=1}^M P_m P_{e|m}, \end{aligned} \quad (3-32)$$

pri čemu je:

$P_{e|m}$  - vjerojatnost pogreške pri prijenosu  $m$ -te poruke.

Vjerojatnost  $P_{e|m}$  se, prema izvoru [63], može zapisati kao:

$$P_{e|m} = \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} \int_{D_{m'}} p(\mathbf{r} \mid \mathbf{s}_m) d\mathbf{r}. \quad (3-33)$$

Granica integracije  $D_{m'}$ , u izrazu (3-33), označava područje odluke obuhvaćeno integracijom.  $m'$  u sumi označava prolazak kroz sve indekse osim  $m$ -tog, tj. pogreška u prijenosu simbola dogodit će se ukoliko je uz poslani signal  $\mathbf{s}_m$  primljeni signal u bilo kojem području odluke osim u  $m$ -tom.

Uvrštavanjem izraza (3-33) u izraz (3-32) dobiva se:

$$P_e = \sum_{m=1}^M P_m \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} \int_{D_{m'}} p(\mathbf{r} \mid \mathbf{s}_m) d\mathbf{r}. \quad (3-34)$$

Kod signala s jednakom vjerojatnošću, tj. kada je pojava svakog od simbola (poruka) jednako vjerojatna, vrijedi  $P_m = 1/M$  te je za detekciju opti-



malan, prema izvoru [63], ML detektor. Vjerojatnost pojave pogreške tada se izražava kao:

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M P_{e|m} \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} \int_{D_{m'}} p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_m) d\mathbf{r}. \end{aligned} \quad (3-35)$$

Za AWGN kanal dalje slijedi:

$$P_{e|m} = \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} \int_{D_{m'}} p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_m) d\mathbf{r}. \quad (3-36)$$

Do odstupanja primljene poruke  $\mathbf{r}$  u odnosu na poslanu poruku  $\mathbf{s}_m$  dolazi uslijed djelovanja šuma u komunikacijskom kanalu, tj. dolazi do razlike između vektora  $\mathbf{r}$  i  $\mathbf{s}_m$  pa dalje slijedi:

$$P_{e|m} = \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} \int_{D_{m'}} p(\mathbf{r} - \mathbf{s}_m) d\mathbf{r}. \quad (3-37)$$

Uvrštavanjem PDF vektora šuma izraz (3-37) postaje:

$$P_{e|m} = \frac{1}{\pi N_0} \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} \int_{D_{m'}} e^{-\frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|^2}{N_0}} d\mathbf{r}. \quad (3-38)$$

Samo u rijetkim konstelacijskim dijagramima područja odluke  $D_{m'}$  su oblika koji bi omogućio rješavanje integrala iz izraza (3-36) kao određenog integrala. Alternativni je pristup u takvim slučajevima traženje gornje granice vjerojatnosti pogreške, tj. određuje se najveća moguća vjerojatnost pogreške koja će vrijediti za sve točke konstelacijskog dijagrama. Najjednostavnija

i najčešće korištena kod ML detektora je tzv. unija granica (engl. *Union Bound*).

Područje odluke  $D_{m'}$  kod ML detekcije može se izraziti kao:

$$D_{m'} = \left\{ \mathbf{r} \in \mathbb{R}^2 : p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_{m'}) > p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_k), \forall 1 \leq k \leq M, k \neq m' \right\}. \quad (3-39)$$

Kod postojanja samo dvije točke u konstelacijskom dijagramu, tj. kod tzv. binarnih postupaka, s pripadajućim signalima  $\mathbf{s}_m$  i  $\mathbf{s}_{m'}$ , područje odluke  $D_{mm'}$  koje je vezano uz indeks  $m'$  definira se kao:

$$D_{mm'} = \{p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_{m'}) > p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_m)\}. \quad (3-40)$$

Uspoređujući izraze (3-39) i (3-40) može se zaključiti kako vrijedi:

$$D_{m'} \subseteq D_{mm'}. \quad (3-41)$$

Naime, u slučaju većeg broja točaka konstelacijskog dijagrama, signalni prostor dijeli se na više dijelova nego u slučaju kada postoje samo dvije točke konstelacijskog dijagrama. Stoga je područje odluke u kojemu se nalazi  $\mathbf{s}_{m'}$ , uz veći broj točaka konstelacijskog dijagrama, podskup područja odluke u kojemu se nalazi  $\mathbf{s}_m$  ako uz njega postoji samo još jedna točka konstelacijskog dijagrama. Stoga dalje slijedi:

$$\int_{D_{m'}} p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_m) d\mathbf{r} \leq \int_{D_{mm'}} p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_m) d\mathbf{r}. \quad (3-42)$$

Desna je strana izraza (3-42) vjerojatnost pojave pogreške kod binarnog postupka s jednakom vjerojatnošću pojave signala  $\mathbf{s}_m$  i  $\mathbf{s}_{m'}$  ukoliko je poslan signal  $\mathbf{s}_m$ , tj. pogreška se dogodila ukoliko je primljeni signal  $\mathbf{r}$  unutar područja odluke  $D_{mm'}$  (područje odluke vezano uz  $\mathbf{s}_{m'}$ ), a poslan je signal  $\mathbf{s}_m$ .

Vjerojatnost pogreške između parova signala (engl. *Pairwise Error Probability*, PEP), koji se označava kao  $P_{m \rightarrow m'}$ , definira se na sljedeći način:

$$P_{m \rightarrow m'} = \int_{D_{mm'}} p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_m) d\mathbf{r}. \quad (3-43)$$

Izraz (3-43) se, u slučaju postojanja  $M$  točaka konstelacijskog dijagrama, proširuje sumom jer se pogreška dogodila ukoliko se kao primljeni signal  $\mathbf{r}$  u području odluke  $D_{mm'}$  našao bilo koji od  $M$  mogućih signala osim  $\mathbf{s}_{m'}$ . Dakle, preko izraza (3-36) te (3-42) dalje slijedi:

$$\begin{aligned} P_{e|m} &\leq \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} \int_{D_{mm'}} p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_m) d\mathbf{r} \\ &= \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} P_{m \rightarrow m'}, \end{aligned} \quad (3-44)$$

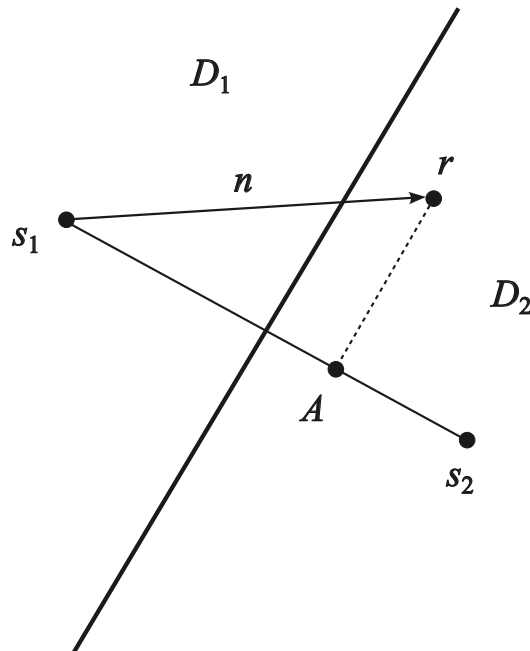
te se pomoću izraza (3-35) dobiva konačni izraz unije granica za općeniti komunikacijski kanal. Izraz glasi:

$$\begin{aligned} P_e &\leq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} \int_{D_{mm'}} p(\mathbf{r} | \mathbf{s}_m) d\mathbf{r} \\ &= \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} P_{m \rightarrow m'}. \end{aligned} \quad (3-45)$$

U idealnom komunikacijskom sustavu, gdje nema utjecaja nikakvog šuma, svaki odaslani bit s predajne strane bio bi ispravno detektiran na prijemnoj strani. U realnom sustavu šum utječe na signal i može se dogoditi pogreška pri detekciji informacije na prijemnoj strani.

Kod binarnih sustava predajnik šalje prijemniku jedan od dva jednako vje-

rojatna signala, a promatrani kanal je AWGN. Općenito, neka su dva signala koja se šalju  $s_1(t)$  i  $s_2(t)$ . S obzirom na činjenicu da su signali jednako vjerojatni, područja odluke odvojena su simetralom dužine između  $s_1$  i  $s_2$  kako je prikazano slikom 3.3. Vjerojatnosti pogreške su, zbog simetrije, jednake neovisno o tome radi li se o signalu  $s_1$  ili  $s_2$ . Stoga vrijedi  $P_b = P(\text{pogreška} | s_1 \text{ poslan})$ . Kako je vidljivo na slici 3.3, svaki primljeni signal  $r$  koji se, po Euklidovoj udaljenosti, nalazi bliže točki  $s_1$ , tj. u području odluke  $D_1$ , bit će detektiran kao  $s_1$  i obrnuto. Pod utjecajem šuma može se dogoditi primitak signala  $r$  u području odluke  $D_2$  uz poslani signal  $s_1$ .



Slika 3.3: Područja odluke kod binarnih signala jednake vjerojatnosti [63]

Prema [63], ako se pretpostavi kako je  $s_1$  poslan, pogreška se događa ako je  $r$  unutar područja odluke  $D_2$ . Stoga će projekcija  $r - s_1$  na duljinu  $s_2 - s_1$ , koja je označena točkom  $A$ , biti veća od  $\frac{d_{12}}{2}$ . Ukoliko vrijedi:

$$d_{12} = \|s_2 - s_1\|, \quad (3-46)$$

te ako je:

$$\mathbf{n} = \mathbf{r} - \mathbf{s}_1, \quad (3-47)$$

tada će projekcija  $\mathbf{r} - \mathbf{s}_1$  na  $\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1$  postati:

$$\frac{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1)}{d_{12}}. \quad (3-48)$$

Vjerojatnost pogreške dana je izrazom

$$P_b = P \left[ \frac{\mathbf{n} \cdot (\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1)}{d_{12}} > \frac{d_{12}}{2} \right], \quad (3-49)$$

tj.

$$P_b = P \left[ \mathbf{n} \cdot (\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1) > \frac{d_{12}^2}{2} \right], \quad (3-50)$$

pri čemu je  $\mathbf{n} \cdot (\mathbf{s}_2 - \mathbf{s}_1)$  Gaussova slučajna varijabla sa srednjom vrijednošću nula i varijancom  $\frac{d_{12}^2 N_0}{2}$ . Prema slici 3.4, pogreška se dogodila ukoliko je poslan signal  $\mathbf{s}_1$ , a primljeni signal  $r$  nalazi se unutar područja odluke  $D_2$ .

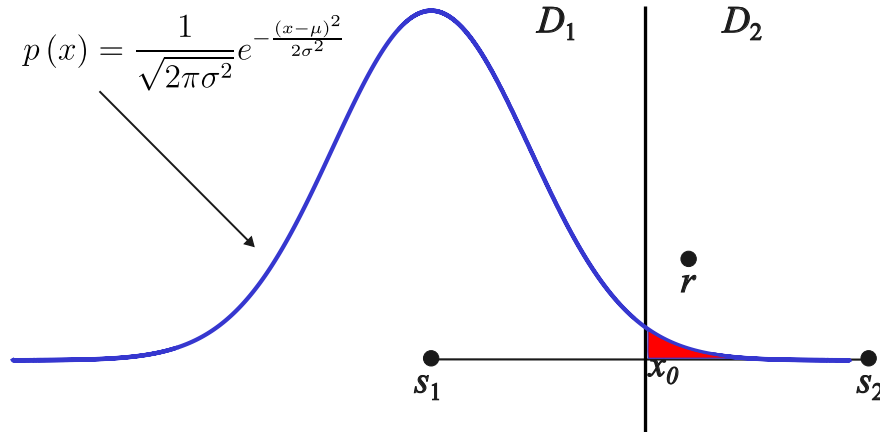
Vjerojatnost takvog događaja opisana je područjem PDF sa slike 3.4 koje je označeno crvenom bojom. Integriranje područja PDF od same granice između dvaju područja odluke pa do beskonačnosti predstavlja Q funkciju. Dakle, vjerojatnost da Gaussova slučajna varijabla  $X \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$  ima vrijednost veću ili jednaku  $x_0$  određuje se kao:

$$P(X \geq x_0) \int_{x_0}^{\infty} p(x) dx = \int_{x_0}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (3-51)$$

Uz supstituciju  $y = \frac{x-\mu}{\sigma}$  izraz (3-51) postaje:

$$P(y > \frac{x_0 - \mu}{\sigma}) = \int_{\frac{x_0 - \mu}{\sigma}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy, \quad (3-52)$$

pri čemu je funkcija unutar integrala normalizirana Gaussova PDF, tj.  $Y \sim \mathcal{N}(0, 1)$ .



Slika 3.4: Gaussova PDF i prikaz Q funkcije

Integral u izrazu (3-52) naziva se Q funkcijom koja je opisana izrazom:

$$Q(\frac{x_0 - \mu}{\sigma}) = \int_{\frac{x_0 - \mu}{\sigma}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy. \quad (3-53)$$

U posebnom slučaju u kojemu se radi o AWGN kanalu, a što je slučaj za IIM-CC-HBC, uvrštavajući desnu stranu jednakosti izraza (3-50) u izraz (3-52) dobiva se PEP kao:

$$P_{m \rightarrow m'} = Q \left( \sqrt{\frac{d_{mm'}^2}{2N_0}} \right). \quad (3-54)$$

Stoga izraz (3-45) postaje:

$$P_e \leq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \sum_{\substack{1 \leq m' \leq M \\ m' \neq m}} Q \left( \sqrt{\frac{d_{mm'}^2}{2N_0}} \right). \quad (3-55)$$

Gore navedeni izraz je unija granica i označava maksimalnu moguću vjerojatnost pogreške.

Izraz (3-34) označava učestalost pogreške prilikom detekcije simbola (engl. *Symbol Error Probability*, SER) ili učestalost pogreške prilikom detekcije poruke (engl. *Message Error Probability*). Vjerojatnost pogreške kod prijenosa jednog bita (engl. *Bit Error Probability*, BEP) u simbolu označava se kao  $P_b$ . Osim u slučajevima u kojima postoji određena simetrija među točkama konstelacijskog dijagrama, određivanje vjerojatnosti  $P_b$  složen je proces. U svim se drugim slučajevima BEP može ograničiti na sljedeći način. Ukoliko se dogodi pogreška kod najmanje jednog primljenog bita, dogodila se i pogreška kod simbola. S obzirom da za neki simbol s  $b$  bitova vrijedi  $b = \log_2(M)$ , može se zapisati sljedeće:

$$P_b \leq P_e \leq bP_b \quad (3-56)$$

ili

$$\frac{P_e}{\log_2(M)} \leq P_b \leq P_e. \quad (3-57)$$

Iz izraza (3-55) vidljivo je da je za određivanje  $P_e$  potrebno odrediti PEP za svaku od točaka konstelacijskog dijagrama. Uzevši u obzir odgovarajuću indeksaciju kod IIM-CC-HBC kao i odnos signal/šum po bitu  $\psi_b$  te broj pogrešno detektiranih bitova u simbolu  $N(m, m')$  između  $h_m$  i  $h_{m'}$ , izraz (3-55) za vjerojatnost  $P_b$  kod IIM-CC-HBC, prema radovima [58] i [64], postaje:

$$P_{b,\text{IIM}} \leq \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{M-1} \sum_{m'=m+1}^M \frac{2N(m, m')}{b} Q \left( \sqrt{\frac{b\psi_b}{2} \|h_m - h_{m'}\|^2} \right). \quad (3-58)$$

U izrazu (3-58) omjerom  $\frac{2N(m,m')}{b}$  definira se udio pogrešno detektiranih bitova u cjelokupnom broju bitova jednog simbola.  $P_b$  i  $P_e$  imat će iste vrijednosti samo ako su svi bitovi simbola pogrešno detektirani. U cijeloj je disertaciji pretpostavljeno da se susjedni simboli, tj. simboli vezani uz susjedne točke konstelacijskog dijagrama razlikuju u jednom bitu. Izraz (3-58) zapravo predstavlja srednju vrijednost učestalosti pogreške prilikom detekcije bita (engl. *Bit Error Rate*, BER) jer vjerojatnost pogrešne detekcije bita BEP i BER koreliraju kod dovoljno velikog broja uzoraka, što je i pretpostavljeno prilikom evaluacije performansi u cijeloj disertaciji.

### 3.3. Evaluacija performansi IIM-CC-HBC modulacijskog postupka

U ovom poglavlju napravljena je evaluacija performansi IIM-CC-HBC sustava. Kako bi se analizirale performanse u realnom scenariju, inicijalni IIM-CC-HBC parametri odabrani su kako slijedi. Predajnik i prijemnik smješteni su na ljudskoj ruci, a udaljenost između njih je 10 cm. Udaljenost između signalne i referentne elektrode kod predajnika i prijemnika je 1 cm. Dimenzije svih četiriju elektroda su 3 x 3 cm. Elektrode su kvadratnog oblika i u potpunosti bakrene. Udaljenost između ruke i tla, koja je uzeta u obzir kod proračuna, jest 1 m. Također, odabran je polumjer ljudske ruke u iznosu od 4,5 cm. Za vodljivost tkiva  $\sigma_t$  i relativnu permitivnost tkiva  $\epsilon_{rt}$  odabrane su, prema grafovima sa slike 3.2 srednje vrijednosti pri frekvenciji 21 MHz. Dakle, za  $\sigma_t$  je odabrana vrijednost 0,1 S/m, dok je za  $\epsilon_{rt}$  odabrana vrijednost 100. Nadalje su, prema izvorima iz literature [18], [21], [24] i [29], te prema izrazima od (3-2) do (3-8), određeni preostali parametri za simulacije.



Navedeni inicijalni parametri prikazani su u tablici 3.1.

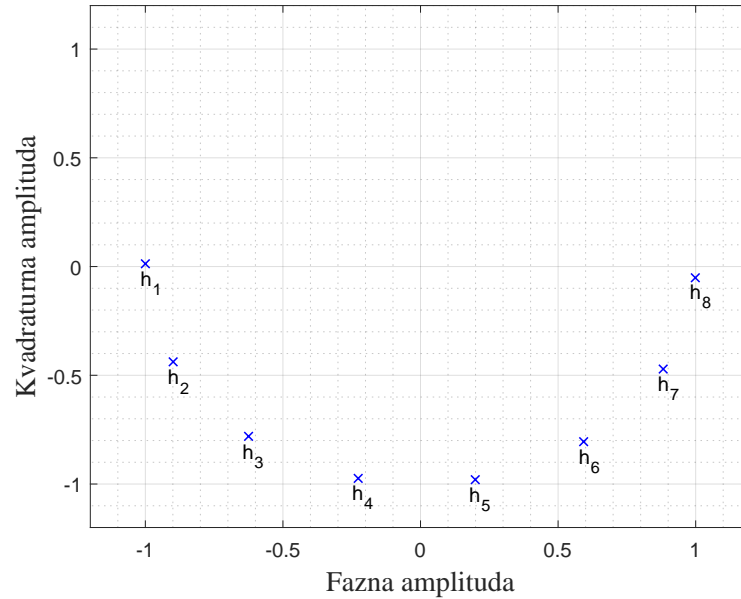
**Tablica 3.1:** CC-HBC inicijalni parametri korišteni za simulacije

Parametar	Vrijednost	Mjerna jedinica
$C_{\text{pov}}$	1,4602	pF
$C_{\text{el}}$	1,89	pF
$C_{\text{zrak}}$	198,54	fF
$C_{\text{c}}$	5,4872	pF
$C_{\text{ek}}$	13,7796	pF
$R_{\text{ek}}$	130	$\Omega$
$R_{\text{tijelo}}$	157,19	$\Omega$
$C_{\text{tijelo}}$	56,3267	pF

Signal  $V_s$  je sinusnog valnog oblika frekvencije 21 MHz. Navedena frekvencija u skladu je s IEEE 802.15.6 standardom [2]. Sve su simulacije napravljene unutar MATLAB (engl. *Matrix Laboratory*) programskog alata prema već spomenutom modelu kanala sa slike 3.1.

Kod IIM-CC-HBC modulacijskog postupka moguće je postići  $M$  diskretnih stanja komunikacijskog kanala, a samim time i točaka konstelacijskog dijagrama. Uz  $M = 8$ , inicijalne parametre i normiranu amplitudu kod točaka konstelacijskog dijagrama, navedeni konstelacijski dijagram izgleda kao na slici 3.5.

Odabirom jednoga od  $M$  induktiviteta mijenja se impedancija  $Z_{\text{el}}$  predajnika, a posljedično i struja  $i_4$  te napon  $V_r$ . Za određivanje točaka konstelacijskog dijagrama  $h_1$  i  $h_8$ , koje postoje za bilo koji  $M$ , empirijski su određena dva induktiviteta čijim će uključivanjem Euklidova udaljenost između navedenih točaka biti najveća, tj. čijim će uključivanjem fazni zakret napona  $V_r$  za pripadajuće točke biti najveći. Za  $M > 2$  određuje se dodatnih  $M - 2$  induktiviteta na način da se kut između točaka konstelacijskog dijagrama  $h_1$  i  $h_8$  podijeli na  $M$  jednakih dijelova te se za svaki dobiveni kut očita potrebna vrijednost induktiviteta kojom je navedeno postignuto. Pripadajući iznosi



Slika 3.5: IIM-CC-HBC konstelacijski dijagram s inicijalnim parametrima

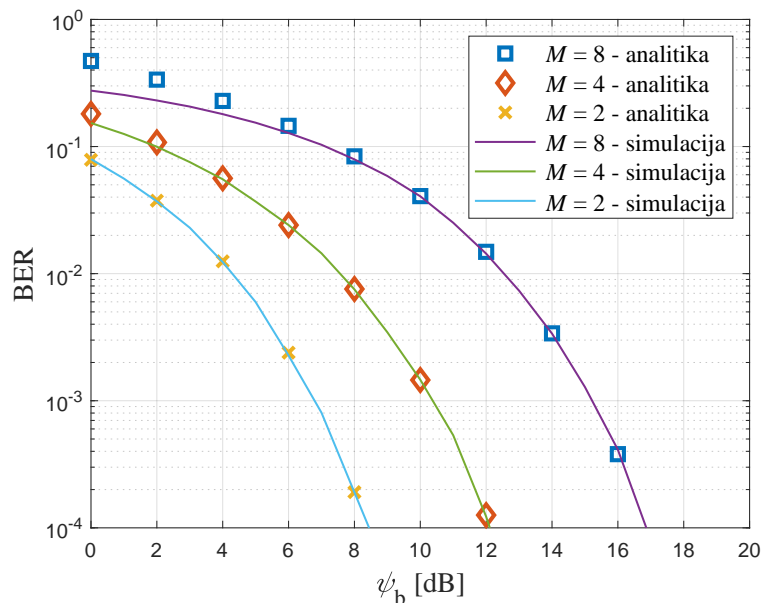
induktiviteta te njihovi indeksi kao i koordinate točaka nalaze se u tablici 3.2.

Nakon određivanja točaka napravljena je BER analiza za inicijalni slučaj kada je  $M = 2$ ,  $M = 4$  i  $M = 8$ . Za svaki od triju navedenih slučajeva dobiveni rezultati analitički su potvrđeni Monte Carlo simulacijom. Navedena analiza nalazi se na grafu sa slike 3.6. Vidljivo je kako se analitički rezultati dobro poklapaju s rezultatima simulacije, napose kod većih iznosa  $\psi_b$ . Očekivano, kod  $M = 2$  je za isti  $\psi_b$  postignut najniži BER jer je Euklidova udaljenost između točaka koje su odabrane za tu realizaciju ( $h_1$  i  $h_8$ ) maksimalna koju

Tablica 3.2: Induktiviteti s pripadajućim točkama konstelacijskog dijagrama kod IIM-CC-HBC za  $M=8$

Indeks $k$	$L_k$ [ $\mu\text{H}$ ]	$h_k$
1	50	$-0,9999 + 0,0128i$
2	18,24	$-0,8989 - 0,4381i$
3	18,04	$-0,6249 - 0,7807i$
4	17,94	$-0,2265 - 0,8053i$
5	17,85	$0,1990 - 0,9800i$
6	17,74	$0,5929 - 0,8053i$
7	17,50	$0,8820 - 0,4713i$
8	5	$0,9987 - 0,0515i$

je moguće postići kod IIM-CC-HBC, a iznosi 1.9996. Kod  $M = 4$  odabrane su točke  $h_1, h_3, h_6$  i  $h_8$ . Ukoliko je  $M = 8$ , tada su zastupljene sve točke sa slike 3.6. U tom slučaju je i BER za isti iznos odnosa  $\psi_b$  najviši jer su točke konstelacijskog dijagrama najbliže jedna drugoj. Za BER od  $10^{-4}$  potrebne su sljedeće vrijednosti  $\psi_b$ : 8,5 dB ( $M = 2$ ), oko 12 dB ( $M = 4$ ), oko 17 dB ( $M = 8$ ).



**Slika 3.6:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC s inicijalnim parametrima

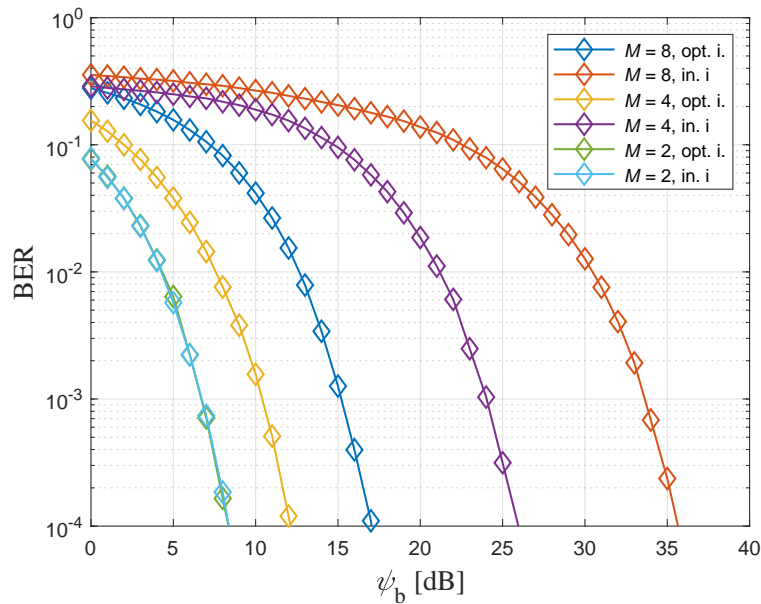
Inicijalni parametri simulacije opisani su na početku ovog potpoglavlja. Osim inicijalnih, moguće su i neke druge vrijednosti parametara koje će utjecati na sustav. U sljedećim dijelovima analiziran je utjecaj parametara komunikacijskog kanala na IIM-CC-HBC sustav. Analiza se prvenstveno odnosi na BER. Prije analize utjecaja parametara IIM-CC-HBC sustava na BER, potrebno je promotriti raspone vrijednosti koje mogu poprimiti pojedini parametri komunikacijskog kanala te njihov utjecaj na odabir  $M$  inuktiviteta. Na vrijednosti pojedinih parametara kanala utječu udaljenost između predajnika i prijemnika, visina predajnika i prijemnika od tla, dio tijela koji je obuhvaćen komunikacijom, veličina elektroda, sučelje elektroda-koža itd.

### 3.3.1. Utjecaj udaljenosti između predajnika i prijemnika na performanse IIM-CC-HBC

U ovom je dijelu prikazana analiza utjecaja udaljenosti između predajnika i prijemnika na IIM-CC-HBC. Navedena udaljenost utječe na kapacitivnu spregu između elektroda predajnika i prijemnika. Ovisnost je vidljiva iz izraza (3-2). No, navedena će udaljenost utjecati i na parametre  $R_{\text{tijelo}}$  i  $C_{\text{tijelo}}$  prema izrazima (3-7) i (3-8) te na parametar  $C_{\text{zrak}}$  prema izrazima (3-5) i (3-6). U navedenim izrazima nalazi se parametar  $a$  koji predstavlja duljinu dijela tijela (ruke) koji se nalazi između predajnika i prijemnika, tj. dio ruke koji predstavlja komunikacijski kanal. Ruka je modelirana kao cilindar visine  $a$ . Stoga se može reći kako vrijedi:

$$D_{\text{TR}} = a. \quad (3-59)$$

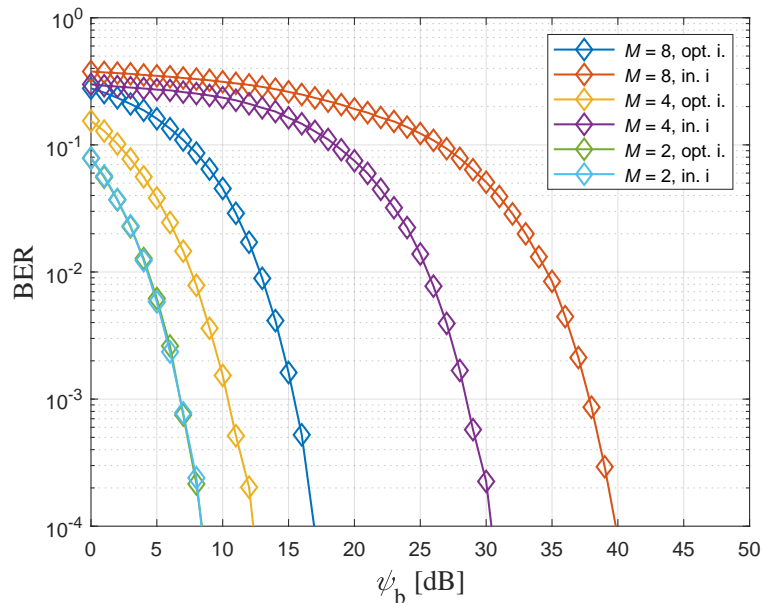
Inicijalni slučaj prikazan grafom na slici 3.6 prikazuje BER za udaljenost između predajnika i prijemnika od 10 cm. Grafom na slici 3.7 prikazan je utjecaj udaljenosti između predajnika i prijemnika na BER u slučaju kada je ta udaljenost 20 cm. Napravljena je analiza za ukupno šest slučajeva. Pri  $M = 2$ ,  $M = 4$  i  $M = 8$  analiziran je BER s optimalnim induktivitetima (oznaka „opt. i.“) te s inicijalnim induktivitetima (oznaka „in. i.“) iz tablice 3.2. Ukoliko se u obzir uzmu optimalne vrijednosti induktiviteta, tj. one kojima se postiže maksimalna Euklidova udaljenost između točaka, BER se gotovo ne razlikuje u usporedbi s grafom na slici 3.6. Razlog takvog rezultata je što je i dalje moguće pronaći osam induktiviteta pomoću kojih će Euklidove udaljenosti između točaka konstelacijskih dijagrama koje su dobivene aktivacijom tih induktiviteta biti nepromijenjene. Štoviše, ti



**Slika 3.7:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC pri  $D_{\text{TR}} = 0,2$  [m]

induktiviteti vrlo se malo razlikuju od inicijalnih. No, iz praktične perspektive gledano, realnije je testirati BER s istim inicijalnim induktivitetima i pri ovoj udaljenosti. Očekivano, kod  $M = 8$  je razlika BER-a između optimalnih i inicijalnih induktiviteta najveća. Za BER od  $10^{-4}$ , kod  $M = 8$ , potreban  $\psi_b$  s optimalnim induktivitetima iznosi oko 17 dB, dok s inicijalnim induktivitetima iznosi 35,5 dB. Udaljavanjem predajnika i prijemnika mijenja se i iznos induktiviteta potrebnih za zadržavanje iste Euklidove udaljenosti između točaka konstelacijskog dijagrama. Između nekih točaka konstelacijskog dijagrama iznos optimalnih induktiviteta razlikuje se tek na prvoj decimali. To znači kako i mala promjena komunikacijskog kanala može značajno pomaknuti točku konstelacijskog dijagrama. Pri  $M = 4$  je razlika u vrijednostima BER-a između slučajeva s optimalnim i inicijalnim induktivitetima ipak manja jer pripadajući iznosi induktiviteta za susjedne točke konstelacijskog dijagrama imaju nešto veću razliku nego kod  $M = 8$ . Za BER od  $10^{-4}$ , kod  $M = 4$ , potreban  $\psi_b$  s optimalnim induktivitetima iznosi oko 12 dB, dok s inicijalnim induktivitetima iznosi 25,5 dB. Zanimljivo je kako kod  $M = 2$

nema razlike između optimalnih i inicijalnih induktiviteta te je za BER od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  od oko 8 dB za oba slučaja. Vrijedi napomenuti i kako je najniži BER za isti iznos  $\psi_b$ , promatrajući tri vrijednosti  $M$ , postignut kod  $M = 2$  kao i kod udaljenosti između predajnika i prijemnika 10 cm.



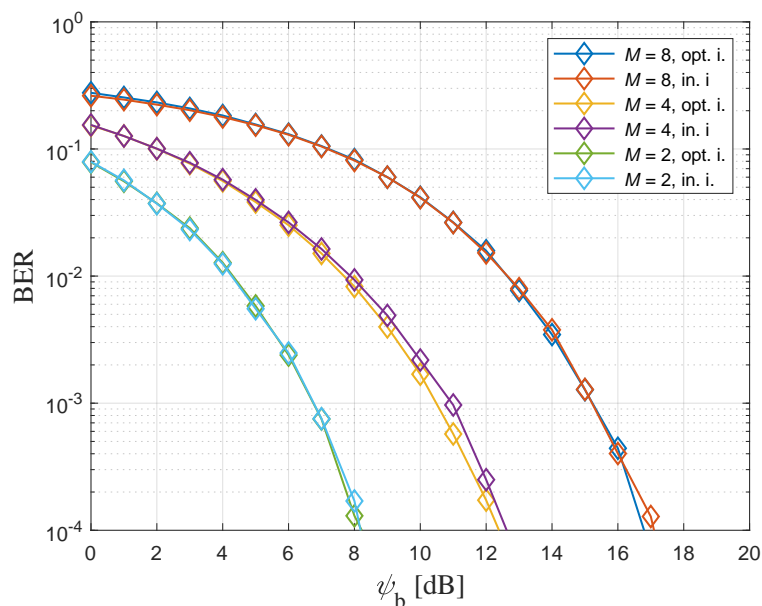
**Slika 3.8:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC pri  $D_{TR} = 0,3$  [m]

Sličan zaključak kao prema grafu na slici 3.7 može se izvesti i prema grafu na slici 3.8. BER je nešto viši nego u prethodnom slučaju zbog povećanja udaljenosti između predajnika i prijemnika na 30 cm. Pri  $M = 8$  te  $M = 4$  potreban je veći  $\psi_b$  za oko 4 dB kako bi se ostvario BER od  $10^{-4}$ . BER s optimalnim induktivitetima gotovo se ne razlikuje u odnosu na grafove sa slika 3.6 i 3.7. No, i ovdje je BER kod  $M = 2$  vrlo sličan za optimalne i inicijalne induktivitete.

Promjena parametra  $D_{TR}$ , kako je ranije navedeno, izravno utječe na četiri parametra istovremeno. To su  $C_{zrak}$ ,  $R_{tijelo}$ ,  $C_c$  i  $C_{tijelo}$ . Grafovi na slikama 3.9, 3.10, 3.11 i 3.12 prikazuju analizu utjecaja parametara  $R_{tijelo}$ ,  $C_{tijelo}$ ,  $C_c$  i  $C_{zrak}$  na BER. Svaki od navedenih četiriju parametara u analizi postavljen je na iznose koji odgovaraju maksimalnoj analiziranoj udaljenosti, tj. 30 cm,

dok su preostali parametri fiksirani na vrijednosti iz tablice 3.1.

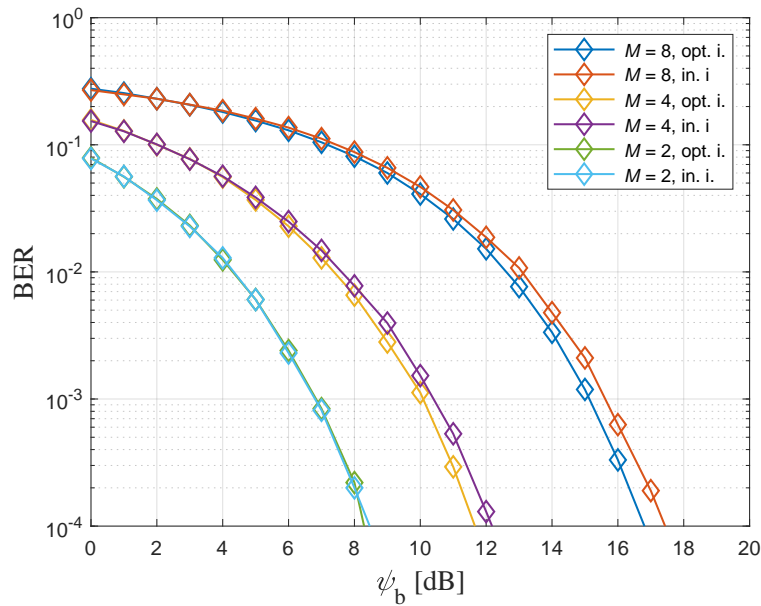
Grafom na slici 3.9 prikazan je utjecaj parametra  $R_{\text{tijelo}}$  na BER. Pri tome je  $R_{\text{tijelo}} = 471,57 \Omega$ . Iz grafa je vidljivo kako parametar  $R_{\text{tijelo}}$  ima vrlo malen utjecaj na BER jer je za svaki analizirani  $M$  razlika u potrebnom  $\psi_b$  za isti iznos BER-a između optimalnih i inicijalnih induktiviteta, vrlo mala. Za iznos BER-a od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  iznosi: 8,5 dB ( $M = 2$ ), oko 12 dB ( $M = 4$ ), oko 17 dB ( $M = 8$ ). Nadalje, usporedbom s grafom na slici 3.6 vidljivo je kako nema značajne razlike u potrebnom  $\psi_b$  za isti iznos BER-a između analiziranog slučaja ( $R_{\text{tijelo}} = 471,57 \Omega$ ) i inicijalnog slučaja ( $R_{\text{tijelo}} = 157,19 \Omega$ ).



**Slika 3.9:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC uz  $R_{\text{tijelo}} = 471,57 \Omega$

Grafom na slici 3.10 prikazan je utjecaj parametra  $C_{\text{tijelo}}$  na BER. Pri tome je  $C_{\text{tijelo}} = 18,78 \text{ pF}$ . Iz grafa je vidljivo kako parametar  $C_{\text{tijelo}}$  ima nešto veći utjecaj na BER u odnosu na parametar  $R_{\text{tijelo}}$ . No, razlika u potrebnom  $\psi_b$  za isti iznos BER-a između optimalnih i inicijalnih induktiviteta, za bilo koji analizirani  $M$ , nije veća od 0,5 dB. Za iznos BER-a od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$

iznosi: 8,5 dB ( $M = 2$ ), oko 12 dB ( $M = 4$ ), oko 17 dB ( $M = 8$ , opt. i.) i 17,5 dB ( $M = 8$ , in. i.). Nadalje, usporedbom s grafom na slici 3.6 vidljivo je kako nema značajne razlike u potrebnom  $\psi_b$  za isti iznos BER-a između analiziranog slučaja ( $C_{\text{tijelo}} = 18,78$  pF) i inicijalnog slučaja ( $C_{\text{tijelo}} = 56,3267$  pF) ukoliko se koriste optimalni induktiviteti. Ukoliko se koriste inicijalni induktiviteti, najveća razlika u potrebnom  $\psi_b$  je uz  $M = 8$  i iznosi 0,5 dB.

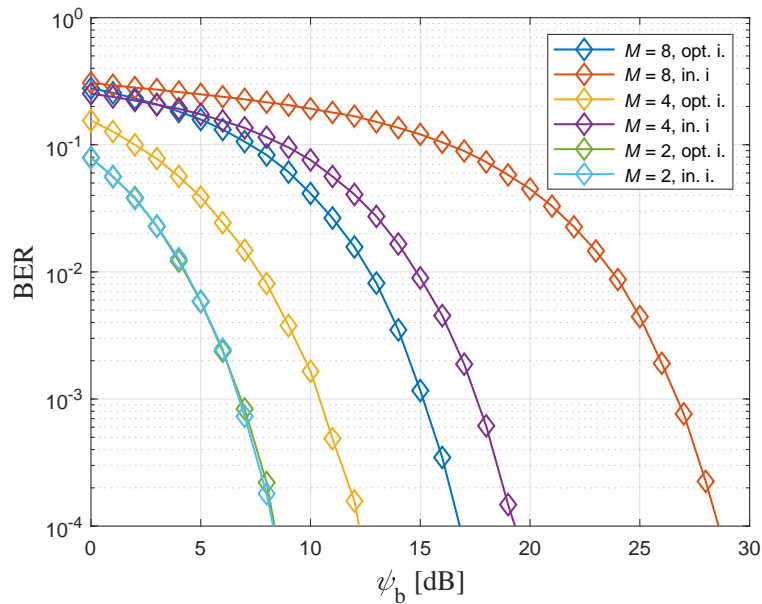


**Slika 3.10:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC uz  $C_{\text{tijelo}} = 18,78$  [pF]

Iz prethodnih analiza vidljivo je kako nešto veći utjecaj na BER ima promjena parametra  $C_{\text{tijelo}}$  nego promjena parametra  $R_{\text{tijelo}}$ . U oba je slučaja s grafova na slikama 3.9 i 3.10 kapacitivna reaktancija ( $X_{C_{\text{tijelo}}}$ ) manja od iznosa otpora za pripadajuće udaljenosti  $D_{\text{TR}}$  ( $X_{C_{\text{tijelo}}} = 134,54 \Omega$  pri 10 cm,  $X_{C_{\text{tijelo}}} = 403,56 \Omega$  pri 30 cm) pa je promjena ukupne impedancije dominantno određena promjenom kapaciteta  $C_{\text{tijelo}}$ . Shodno tome, promjena otpora  $R_{\text{tijelo}}$  ima manji utjecaj na BER. Navedeno je i vidljivo na grafu sa slike 3.9 gdje se uz fiksirani parametar  $C_{\text{tijelo}}$  gotovo i ne mijenja BER.

Značajan utjecaj na BER imaju parametri  $C_c$  i  $C_{\text{zrak}}$ . Ovisnost BER-a





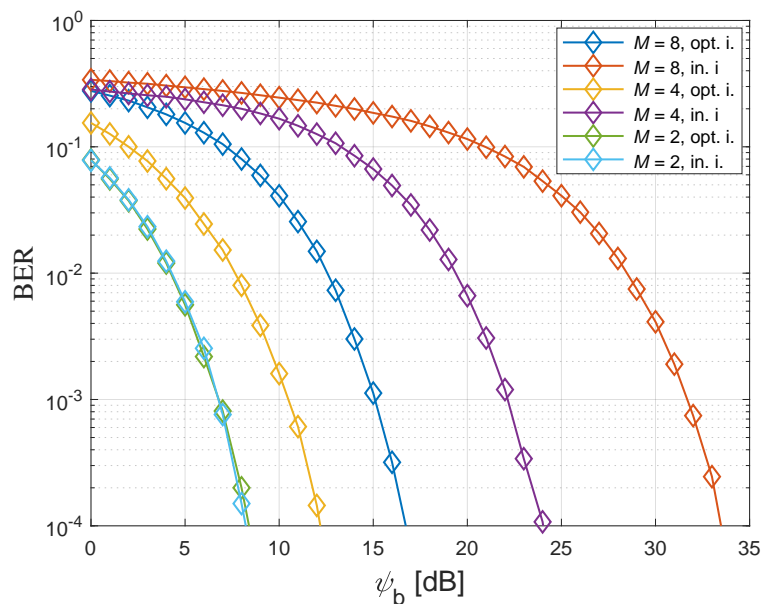
**Slika 3.11:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC uz  $C_c = 9,61$  [pF] i fiksiranu vrijednost parametra  $D_{\text{GND}}$

o parametru  $C_c$  prikazana je grafom na slici 3.11. Za iznos BER-a od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  iznosi: 8,5 dB ( $M = 2$ ), oko 12 dB ( $M = 4$ , opt. i.), 19,5 dB ( $M = 4$ , in. i.), 17,5 dB ( $M = 8$ , opt. i.) i oko 28 dB ( $M = 8$ , in. i.). Uzrok takvog rezultata slabija je kapacitivna sprega između ruke i tla ukoliko je manja udaljenost  $D_{\text{TR}}$  (manji dio ljudske ruke koji predstavlja komunikacijski kanal), a vrijedi i obrnuto. Većina tog utjecaja uzrokovana je parametrom  $C_{\infty, \text{ruka}}$  koji je prema izrazu (3-4) sastavni dio parametra  $C_c$ . Utjecaj  $C_{\text{P,ruka}}$  izraženiji je ako se smanji udaljenost između ruke i tla, tj. parametar  $GND_z$ . Navedeni je parametar u analizi prikazanoj slikom 3.11 također fiksiran i to na vrijednost od 1 metra. Iako  $D_{\text{GND}}$  ne postoji u izrazu (3-4), za relativno veliku udaljenost između predajnika i prijemnika od tla, tj. ruke od tla, može se reći kako vrijedi:

$$D_{\text{GND}} \approx GND_z. \quad (3-60)$$

Ovisnost BER-a o parametru  $C_{\text{zrak}}$  prikazana je grafom na slici 3.12. Za

iznos BER-a od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  iznosi: 8,5 dB ( $M = 2$ ), oko 12 dB ( $M = 4$ , opt. i.), oko 24 dB ( $M = 4$ , in. i.), 17,5 dB ( $M = 8$ , opt. i.) i 33,5 dB ( $M = 8$ , in. i.). Ova se pojava događa zato što je kod malih udaljenosti kapacitivna sprega između referentnih elektroda predajnika i prijemnika jaka. Udaljavanjem predajnika i prijemnika navedena sprega slabi. Iz analiza u ovome potpoglavlju može se zaključiti kako parametri  $R_{\text{tijelo}}$  i  $C_{\text{tijelo}}$  imaju puno manji utjecaj na BER nego parametri  $C_c$  i  $C_{\text{zrak}}$ .



**Slika 3.12:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC uz  $C_{\text{zrak}} = 71,15$  [fF]

### 3.3.2. Utjecaj spola i konstitucije osobe na performanse

#### IIM-CC-HBC

U ovom je dijelu prikazana analiza utjecaja parametara  $\varepsilon_{\text{rt}}$  i  $\sigma_t$  na BER. Kako je navedeno u prethodnom potpoglavlju, parametri  $R_{\text{tijelo}}$  i  $C_{\text{tijelo}}$  imaju relativno malen utjecaj na performanse IIM-CC-HBC. Kod određivanja inicijalnih vrijednosti potonjih parametara navedenih u tablici 3.1, ne uzima se u obzir udio određenog tkiva u dijelu tijela putem kojega se vrši komunikacija. Prema izvoru iz literature [65], promatran je udio određenog tkiva u ljudskoj

ruci muškarca i žene, ali ovdje nije uzeta u obzir koža. Ukoliko se uzme u obzir i debljina kože koja je, prema radu [66], u rasponu od 1 do 4 milimetra (za ovaj izračun korištena je vrijednost od 2 milimetra), dobiva se udio tkiva za oba spola kao u tablici 3.3. Prema tim se vrijednostima mogu odrediti prosječne vrijednosti  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$  za oba spola kao što je prikazano tablicom 3.4.

**Tablica 3.3:** Udio tkiva prema spolu i pripadajuća relativna permitivnost  $\varepsilon_{rt}$  i vodljivost tkiva  $\sigma_t$  pri frekvenciji 21 MHz

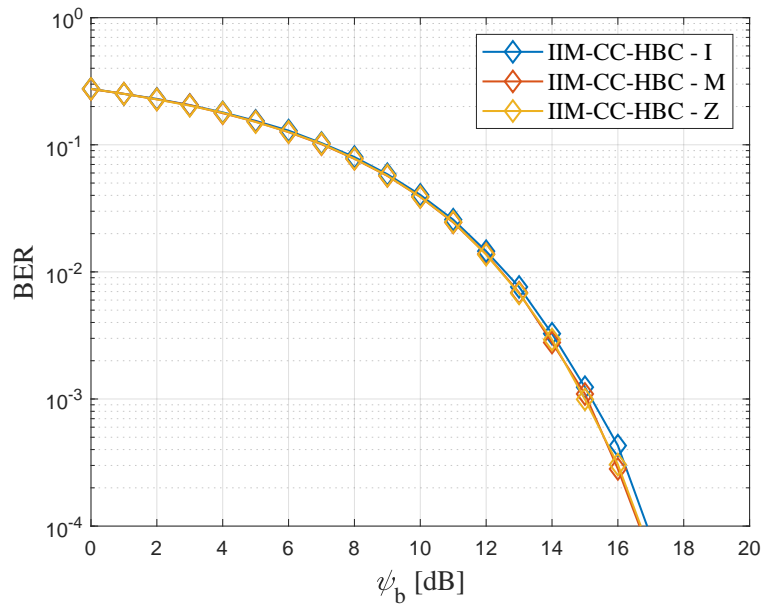
Vrsta tkiva	Udio tkiva prema spolu [%]		$\varepsilon_{rt}$	$\sigma_t$ [S/m]
	M	Ž		
Mišić	65,83	53,41	800	0,8
Kost	11,78	11,23	100	0,075
Masno tkivo	13,7	26,66	65	0,04
Koža	8,69	8,7	900	0,1

**Tablica 3.4:** Prosječna vrijednosti relativne permitivnosti  $\varepsilon_{rt}$  i vodljivosti  $\sigma_t$  prema spolu (M - muškarci, Ž - žene) pri frekvenciji 21 MHz

Prosječna vrijednost		
Spol	$\varepsilon_{rt}$	$\sigma_t$ [S/m]
M	625,54	0,55
Ž	534,14	0,46

Navedeni su parametri različiti kod različitih osoba, no mogu se izračunati srednje vrijednosti za oba spola. To je i prikazano tablicom 3.4 iz koje su uzeti podaci za analizu. Grafom na slici 3.13 analiziran je utjecaj muškog (oznaka „M“) i ženskog (oznaka „Z“) spola na BER. Zbog lakše usporedbe dodan je i inicijalni slučaj (oznaka „I“) kod kojega su  $\varepsilon_{rt} = 100$  i  $\sigma_t = 0.1$  S/m.

Vidljivo je kako razlike između BER-a za različite spolove gotovo i nema. Kod oba spola je za BER od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  od 16,5 dB ( $M = 8$ ). Iz analiza prikazanih u prethodnom dijelu može se zaključiti kako bi za  $M = 4$  potreban  $\psi_b$  za navedeni BER bio manji nego pri  $M = 8$ . Pri  $M = 2$  potreban  $\psi_b$  za na-



**Slika 3.13:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC ( $M = 8$ ) za različite vrijednosti  $\varepsilon_r$  i  $\sigma$

vedeni BER bio bi najmanji. Veće vrijednosti  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$  kod oba spola u odnosu na inicijalni slučaj utječu na niži iznos BER-a za isti  $\psi_b$ . Razlog je takvog rezultata što su za taj slučaj  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$  usrednjeni, tj. pretpostavljeno je kako svako tkivo u ljudskoj ruci ima jednak udio. Kada se uzmu u obzir stvarne vrijednosti, tada se dobije veća ukupna vrijednost  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$ , što za rezultat ima smanjenje kapacitivne reaktancije i povećanje vodljivosti, tj. smanjenje ukupne impedancije dijela tijela koji predstavlja komunikacijski kanal. Treba napomenuti da su za oba spola promatrani optimalni induktiviteti.

Kako bi se IIM-CC-HBC modulacijski postupak analizirao u što realnijim uvjetima, odabrano je pet osoba različite dobi, spola i tjelesne konstitucije. Izmjerena im je podlaktica i određena srednja vrijednost polumjera podlaktice. Podlaktica je, prema radu [59], modelirana kao cilindar. Podaci o testiranim osobama prikazani su tablicom 3.5.

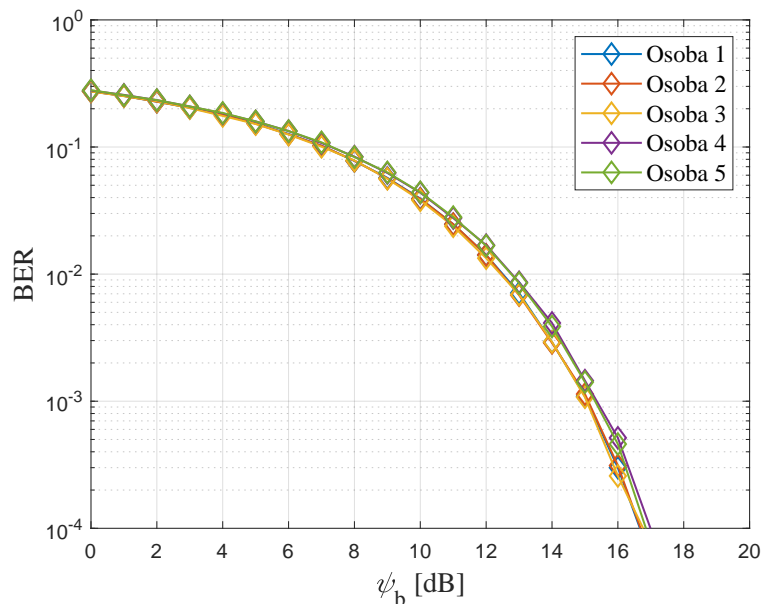
Polumjer podlaktice, prema izrazu (3-4), utječe na  $C_c$ . Nadalje, svakoj je osobi iz tablice 3.5, sukladno spolu, dodijeljen udio tkiva prema spolu iz tablice 3.4. Promjena parametara  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$  utječe na promjenu parametara

Tablica 3.5: Osobe odabrane za testiranje novih modulacijskih postupaka

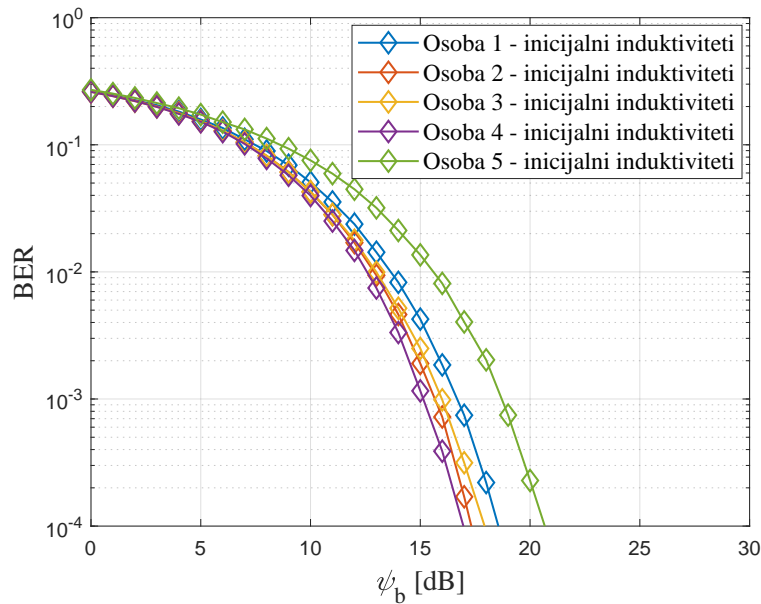
Broj osobe	Dob [godina]	Spol	Polumjer podlaktice [cm]
1	32	Ž	3,74
2	56	Ž	3,98
3	57	M	4,62
4	34	M	4,30
5	29	Ž	3,34

$C_{\text{tijelo}}$  i  $R_{\text{tijelo}}$ .

Grafom na slici 3.14 prikazan je utjecaj konstitucije osobe i spola na BER. Podaci o dobi, spolu te promjeru podlaktice osoba nalaze se u tablici 3.5. Graf pokazuje kako je u slučaju optimalnih induktiviteta razlika između BER-a pojedine osobe mala. Razlog je što se Euklidova udaljenost između točaka konstelacijskog dijagrama  $h_1$  i  $h_8$  ne mijenja, tj. položaj navedenih točaka ostaje fiksna. Položaj preostalih točkaka konstelacijskog dijagrama mijenja se vrlo malo za različite osobe jer  $\epsilon_{\text{rt}}$  i  $\sigma_{\text{t}}$  preko parametara  $R_{\text{tijelo}}$  i  $C_{\text{tijelo}}$  vrlo malo utječu na BER, a gotovo sav utjecaj na BER rezultat je razlike u promjeru podlaktice. Za BER od  $10^{-4}$  kod svih pet osoba potreban je  $\psi_{\text{b}}$  između 16,5 dB i 17 dB.



Slika 3.14: Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC ( $M = 8$ ) za različite osobe



**Slika 3.15:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC ( $M = 8$ ) za različite osobe uz inicijalne iznose induktiviteta

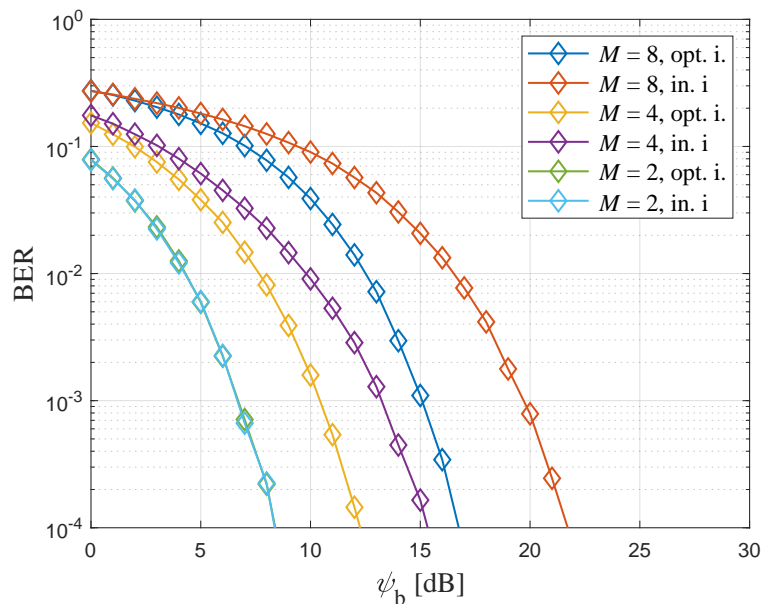
Ukoliko se odaberu inicijalne vrijednosti induktiviteta i napravi analiza za svih pet osoba, dobiva se graf kao na slici 3.15. Ovdje su vidljive nešto veće razlike između pojedinih vrijednosti BER-a. Krivulja za „Osobu 5“ značajnije odstupa, a razlog je što ta osoba ima najmanji promjer podlaktice, tj. taj promjer ima najveće odstupanje od inicijalnog promjera (najveća promjena parametra  $C_c$  u odnosu na inicijalnu vrijednost) što za posljedicu ima najveći pomak točaka konstelacijskog dijagrama ukoliko se koriste inicijalni induktiviteti. Što su  $\varepsilon_{rt}$ ,  $\sigma_t$  i promjer podlaktice bliže inicijalnim, BER će biti niži jer su inicijalni induktiviteti bliže optimalnim za određenu osobu. Za BER od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  ne razlikuje se za više od 4 dB (raspon od oko 17 dB do oko 21 dB), neovisno o kojoj se osobi radi.

### 3.3.3. Utjecaj udaljenosti od tla na performanse IIM-CC-HBC

U ovom je dijelu prikazana analiza ovisnosti BER-a o udaljenosti između referentnih elektroda predajnika i prijemnika od tla ( $D_{GND}$ ) koji se nalaze na ljudskoj ruci. Može se reći kako je analiziran utjecaj udaljenosti od tla

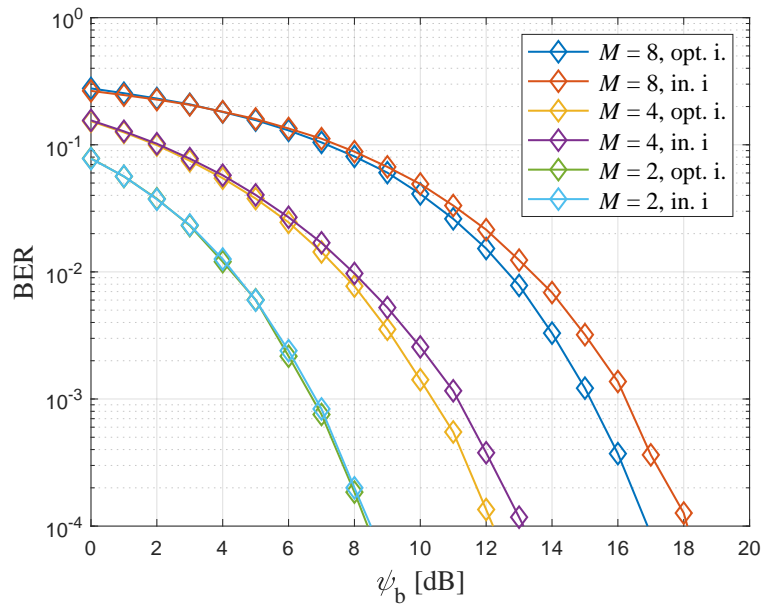
cijelog IIM-CC-HBC komunikacijskog sustava. Stoga je pretpostavljeno kako su vrijednosti parametara  $D_{\text{GND}}$  i  $GND_{\text{earth}}$  identične.

Ukoliko se zanemare relativno male udaljenosti od tla i u obzir se uzme sjedeći i stojeći položaj, može se napraviti analiza utjecaja parametra  $D_{\text{GND}}$  na BER. Analizirane su tri različite udaljenosti IIM-CC-HBC sustava od tla. Radi se o udaljenostima od 0,6 m, 1,2 m i 1,8 m. Za sve tri udaljenosti analiziran je BER s optimalnim induktivitetima (oznaka „opt. i.“) te inicijalnim induktivitetima (oznaka „in. i.“). Također, analiza uključuje tri različite vrijednosti  $M$ :  $M = 8$ ,  $M = 4$  i  $M = 2$ . Grafovi na slikama 3.16, 3.17 i 3.18 prikazuju navedene analize.

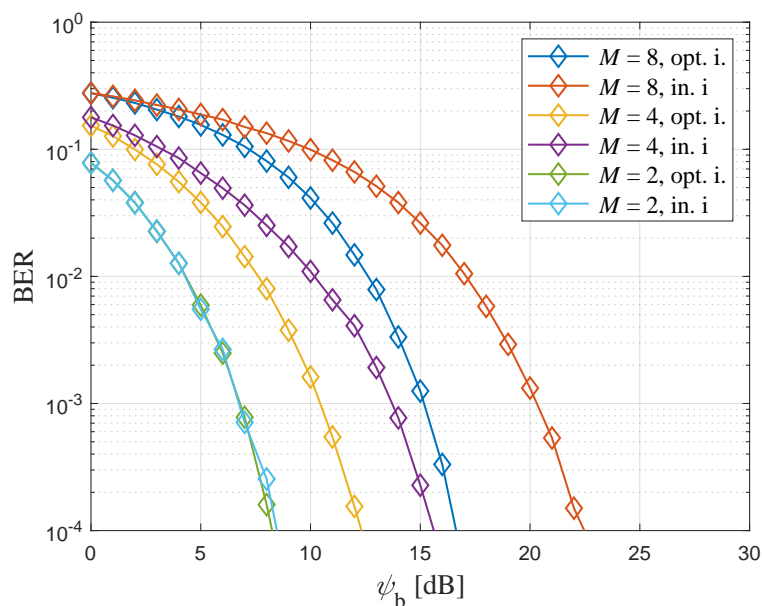


**Slika 3.16:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC pri  $D_{\text{GND}} = 0,6$  [m]

Parametar  $D_{\text{GND}}$ , prema izrazima (3-3) i (3-4), utječe na  $C_{\text{pov}}$  i  $C_c$ . Raspon vrijednosti koje poprima  $C_{\text{pov}}$  je od 1,43 pF ( $D_{\text{GND}} = 1,8$  m) do 1,49 pF ( $D_{\text{GND}} = 0,6$  m).  $C_c$  poprima vrijednosti od 5,36 pF ( $D_{\text{GND}} = 1,8$  m) do 5,5 pF ( $D_{\text{GND}} = 0,6$  m). Vidljivo je kako nema značajnije promjene BER-a kod triju promatranih vrijednosti  $D_{\text{GND}}$  uz odabir optimalnih induktiviteta. Pojednostavljeno rečeno, krivulje za istu vrijednost  $M$  (npr.  $M = 4$ , opt.



Slika 3.17: Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC pri  $D_{\text{GND}} = 1,2$  [m]



Slika 3.18: Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC pri  $D_{\text{GND}} = 1,8$  [m]

i.) uspoređujući grafove (3.16, 3.17 i 3.18) gotovo su identične. Primjerice, za BER od  $10^{-4}$  potreban je  $\psi_b$  od oko 12 dB. Uspoređujući grafove na slikama 3.16 i 3.18 može se primijetiti kako su krivulje za svih šest testiranih slučajeva gotovo identične, iako je razlika u parametru  $D_{\text{GND}}$  1,2 m. Razlog je vrlo malen utjecaj parametara  $C_{\text{pov}}$  i  $C_c$  na BER. U oba je slučaja, pri  $M$



= 2, za BER od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  od oko 8 dB. Pomak točaka konstelacijskog dijagrama uzrokovan promjenom parametra  $D_{\text{GND}}$  vidljiv je pri  $M = 4$  i  $M = 8$  gdje je razlika u potrebnom  $\psi_b$ , promatrano za BER od  $10^{-4}$ , 2,5 dB odnosno 5 dB.

Nadalje, na grafu prikazanom na slici 3.17 vidljivo je kako je razlika u vrijednostima BER-a pri udaljenosti od 1,2 metra između odabira optimalnih i inicijalnih induktiviteta najmanja. Razlog je te pojave što je vrijednost parametra  $D_{\text{GND}}$  najbliža inicijalnoj (1 metar) pa i točke konstelacijskog dijagrama imaju manji pomak (maksimalna razlika potrebnog  $\psi_b$  je 1 dB za BER od  $10^{-4}$  pri  $M = 8$ ) nego kod  $D_{\text{GND}}$  od 0,6 metara i 1,8 metara.

Razlika između BER-a s optimalnim i inicijalnim induktivitetima za  $M = 2$  je pri svim trima analiziranim vrijednostima parametra  $D_{\text{GND}}$  zanemariva što, kao i kod analize za različite vrijednosti parametra  $D_{\text{GND}}$ , potvrđuje robusnost sustava. Promatrajući krivulje pri optimalnim induktivitetima na grafovima sa slika 3.16, 3.17 i 3.18 za  $M = 8$ ,  $M = 4$  i  $M = 2$  može se zaključiti kako vrijednost parametra  $D_{\text{GND}}$  iznad 0,6 ne utječe značajno na BER .

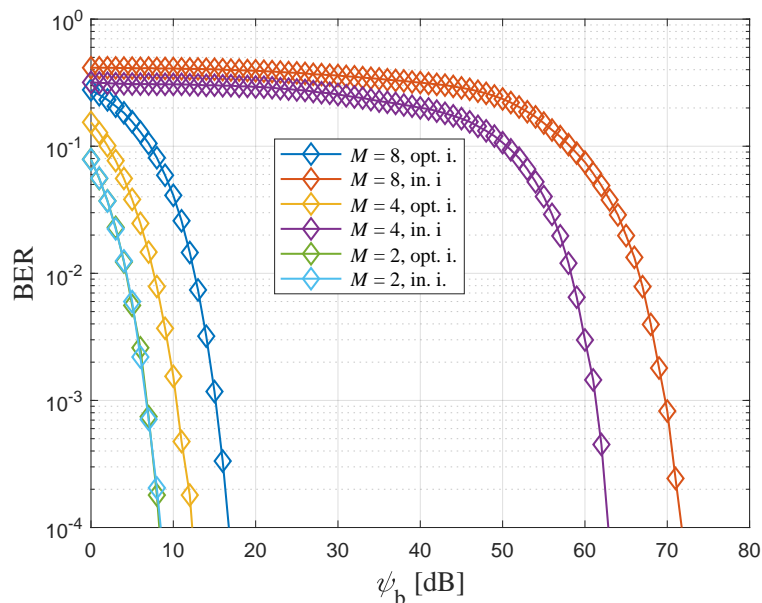
### 3.3.4. Utjecaj veličine elektroda i sučelja elektroda-koža na performanse IIM-CC-HBC

U ovom je dijelu prikazana analiza utjecaja sučelja elektroda-koža na performanse IIM-CC-HBC sustava. Kako je ranije navedeno, sučelje elektroda-koža modelira se kao paralelni RC član. Za većinu impedancije gornjeg sloja kože zaslužna je impedancija rožnatog sloja. Iako mu je debljina reda veličine nekoliko desetaka mikrometara, on ima najveću impedanciju među svim pod-slojevima gornjeg sloja kože [67]. Razlog takvoj pojavi njegova je građa. Sas-

toji se većinom od odumrlih stanica kože niske vlažnosti i nije hidrofilan [61]. Ispod gornjeg sloja kože nalazi se srednji sloj kože (lat. *dermis*) te donji sloj kože (lat. *subcutis*).

S obzirom na činjenicu kako se veličinom elektroda utječe na parametar  $C_{el}$ , ali i na sučelje elektroda-koža, tj.  $C_{ek}$  i  $R_{ek}$ , pretraživanjem literature su u radu [24] pronađene elektrode za koje su iznosi  $C_{ek}$  i  $R_{ek}$  navedeni. Dimenzije elektroda su 2 x 2 cm. Kapacitet takvih elektroda je, prema izrazu (3-1), 354,16 fF ukoliko je razmak između elektroda 1 cm. Za parametre  $C_{ek}$  i  $R_{ek}$  su prema radu [24] uzete vrijednosti od 5,5 pF i 250  $\Omega$ .

Parametri  $C_{el}$ ,  $C_{ek}$  i  $R_{ek}$  za manje elektrode iznose redom 354,16 fF, 5,5 pF i 250  $\Omega$ . Graf na slici 3.19 prikazuje BER za veličinu elektroda 2 x 2 cm.



**Slika 3.19:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC za veličinu elektroda 2 x 2 [cm]

Iz usporedbe grafa sa slike 3.19 s grafom sa slike 3.6 vidljivo je kako nema razlike u uspoređivanim slučajevima ukoliko se koriste optimalni induktiviteti. Razlog je što se za manje veličine elektroda mogu pronaći optimalni induktiviteti pomoću kojih će točke konstelacijskog dijagrama biti na gotovo istim mjestima kao i kod većih elektroda. Za iznos BER-a od  $10^{-4}$  potreban

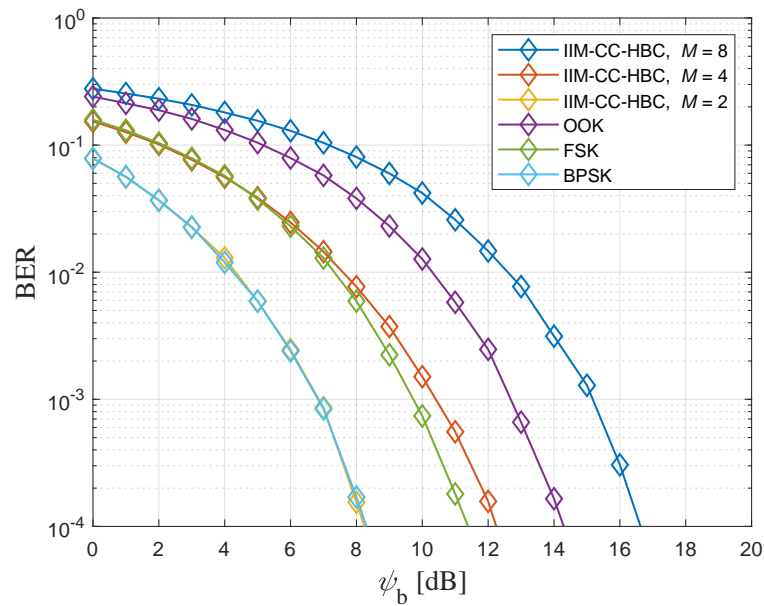
$\psi_b$  iznosi: 8,5 dB ( $M = 2$ ), oko 12 dB ( $M = 4$ , opt. i.), oko 63 dB ( $M = 4$ , in. i.), 17,5 dB ( $M = 8$ , opt. i.) i oko 72 dB ( $M = 8$ , in. i.). Iz navedenih je rezultata vidljivo kako kod IIM-CC-HBC sustava veličina elektroda ne utječe na BER samo kada je  $M = 2$ . Pri  $M = 4$  i  $M = 8$  veličina elektroda značajno utječe na BER ukoliko se koriste inicijalni induktiviteti. Razlog je relativno velika razlika u iznosima optimalnih induktiviteta u odnosu na inicijalne pa se, ukoliko se koriste inicijalni induktiviteti, sve točke konstelacijskog dijagrama, osim  $h_1$ , nalaze gotovo na istom mjestu, tj. Euklidova udaljenost između njih vrlo je mala.

### 3.3.5. Usporedba performansi IIM-CC-HBC s ostalim modulacijskim postupcima

U ovom je dijelu prikazana analiza vjerojatnosti pogreške pri detekciji bita ukoliko se IIM-CC-HBC usporedi s često korištenim modulacijskim postupcima kod CC-HBC-a. Grafom na slici 3.20 prikazana je usporedba BER-a kod IIM-CC-HBC za različite vrijednosti  $M$  s vrijednostima BER-a kod OOK, FSK te BPSK modulacijskih postupaka. U slučaju kada je  $M = 4$ , potreban  $\psi_b$  za isti BER je manji nego kod OOK modulacijskog postupka, dok se najmanji iznos potrebnog  $\psi_b$  za isti BER postiže kada je  $M = 2$ . Tada je krivulja BER-a vrlo bliska BPSK modulacijskom postupku (potreban  $\psi_b$  od oko 8 dB), a značajno manja nego kod OOK (potreban  $\psi_b$  od 14,5 dB) i FSK (potreban  $\psi_b$  od 11,5 dB) modulacijskih postupaka. Za realizaciju IIM-CC-HBC potrebna je niska razina sklopovske složenosti, a usporedba sklopovske složenosti s ostalim modulacijskim postupcima često korištenim u CC-HBC tablično je prikazana u 4.1. Treba napomenuti kako je moguća nekoherentna demodulacija signala ukoliko se koristi OOK modulacijski pos-

### 3. DISKRETNI MODULACIJSKI POSTUPAK ZASNOVAN NA PROMJENI INDEKSA INDUKTIVITETA

tupak. Kod IIM-CC-HBC, BPSK i FSK postupaka potrebna je estimacija kanala, no time se postiže pouzdanija komunikacija.



**Slika 3.20:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod različitih modulacijskih postupaka u usporedbi s IIM-CC-HBC

## 4. DISKRETNI MODULACIJSKI POSTUPAK ZASNOVAN NA PROMJENI IMPEDANCIJE

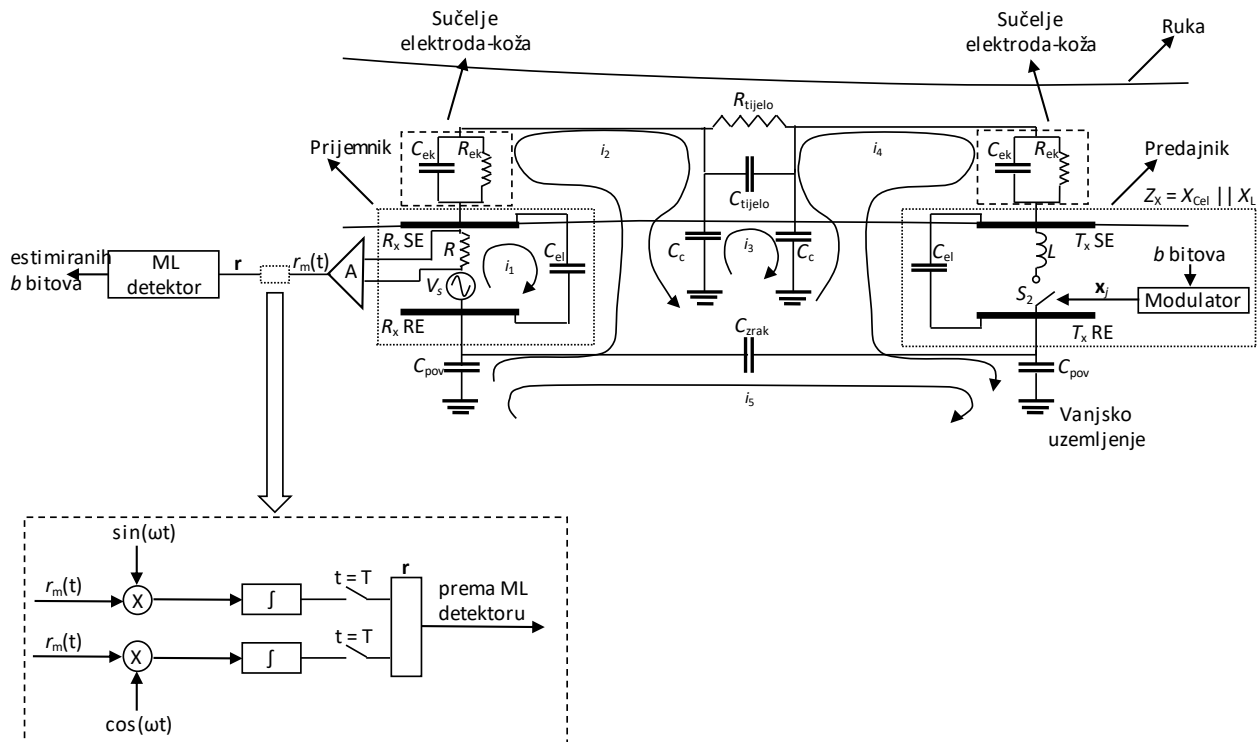
Drugi modulacijski postupak predložen u sklopu ove disertacije diskretni je modulacijski postupak zasnovan na promjeni impedancije (engl. *Impedance Shift Keying CC-HBC*, ISK-CC-HBC) [68].

Kod ISK-CC-HBC sustava informacija je mapirana pomoću promjene impedancije između signalne i referentne elektrode predajnika. Na prijemnoj je strani, preko suotpora (engl. *Shunt*), signalna elektroda spojena na izvor izmjeničnog napona te se promjenom impedancije između signalne i referentne elektrode predajnika događa fazni pomak napona na suotporu. Detekcijom navedenog faznog pomaka može se izvršiti demodulacija informacije. Prikaz ISK-CC-HBC komunikacijskog sustava nalazi se na slici 4.1.

### 4.1. Način rada ISK-CC-HBC sustava

Model kanala koji se upotrebljava kod ISK-CC-HBC sustava identičan je modelu kanala koji se upotrebljava kod IIM-CC-HBC sustava. Prema slici 4.1, koja prikazuje ISK-CC-HBC sustav, napon naponskog izvora, označen na slici 4.1 kao  $V_s$ , spojen je preko suotpora  $R$  na signalnu elektrodu prijemnika. Nadalje, na predajnoj strani podatkovni bitovi ulaze u modulator. Ovisno

#### 4. DISKRETNI MODULACIJSKI POSTUPAK ZASNOVAN NA PROMJENI IMPEDANCIJE



Slika 4.1: ISK-CC-HBC komunikacijski sustav

o tome je li podatkovni bit „0“ ili „1“, sklopka ( $S_2$ ) na predajnoj je strani otvorena tj. zatvorena. Ukoliko je sklopka zatvorena, signalna i referentna elektroda predajnika spojene su preko induktiviteta  $L$ , a ukoliko je sklopka otvorena, induktivitet  $L$  ostaje odspojen.

Otvaranjem i zatvaranjem sklopke mijenja se ukupna impedancija između signalne i referentne elektrode predajnika. Navedena će promjena impedancije uzrokovati promjenu amplitude i faze struje  $i_4$ , što posredno utječe i na promjenu amplitude i faze svih ostalih struja ( $i_1$ ,  $i_2$ ,  $i_3$  i  $i_5$ ). Promjenom struje  $i_1$  mijenja se i pad napona  $V_R$  na suotporu. Promatranjem promjena amplitude i faze na suotporu  $R$  može se detektirati je li s predajnika poslani bit „0“ ili „1“. Na navedeni se način ostvaruje diskretna promjena komunikacijskog kanala.

Impedancija  $Z_x$  sastavni je dio ukupne impedancije komunikacijskog sustava. Zatvaranjem ranije navedene sklopke ( $S_2$ ), ukoliko se šalje podatkovni

bit „1“, impedancija  $Z_x$  je paralelni spoj reaktancija elektroda predajnika ( $X_{\text{Cel}}$ ) i induktiviteta ( $X_L$ ), a izražava se kao:

$$Z_x = X_{\text{Cel}} \parallel X_L, \quad (4-1)$$

tj.

$$Z_x = \frac{X_{\text{Cel}} X_L}{X_{\text{Cel}} + X_L}. \quad (4-2)$$

Pri tome je

$$X_{\text{Cel}} = -\frac{1}{\omega C_{\text{el}}}, \quad (4-3)$$

a

$$X_L = \omega L, \quad (4-4)$$

dok je

$$\omega = 2\pi f L. \quad (4-5)$$

Napon  $V_R$  na suotporu  $R$  mijenjat će se kao posljedica promjene struje  $i_1$  koja je uzrokovana ranije navedenom promjenom ukupne impedancije. Taj napon može se zapisati kao:

$$V_R = i_1 \cdot R. \quad (4-6)$$

Kirchoffovi zakoni za napone za sve preostale petlje prikazane su izrazom (4-7):

$$\begin{bmatrix} V_S \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + Z_{el} & -Z_{el} & 0 & 0 & 0 \\ -Z_{el} & Z_{el} + Z_{ek} + Z_c + Z_{pov} & -Z_c & 0 & -Z_{pov} \\ 0 & 0 & -Z_c & 2Z_c + Z_{tijelo} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -Z_c & Z_c + Z_{ek} + Z_x + Z_{pov} \\ 0 & 0 & -Z_{pov} & 0 & -Z_{pov} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ i_4 \\ i_5 \end{bmatrix}. \quad (4-7)$$

Informacija o odaslanim bitovima s predajne strane sadržana je u poziciji sklopke:

$$\mathbf{c}_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}^T, m = 1, 2. \quad (4-8)$$

U navedenom je vektoru vrijednost 1 samo na  $m$ -toj poziciji, a  $(\cdot)^T$  označava transponiranje matrice.

#### 4.1.1. Detekcija primljene informacije kod ISK-CC-HBC

Općenito, neka je signal na prijemniku definiran kao:

$$r(t) = s_m(t) + n(t), \quad 1 \leq m \leq 2, \quad (4-9)$$

gdje je:

$s_m(t)$  - jedan od moguća 2 signala  $\{s_1(t), s_2(t)\}$ , gdje svaki ima pripadajuću vjerojatnost pojavljivanja  $P_m = \frac{1}{2}$ .

Prijelaz iz kontinuirane u diskretnu domenu vrši se na isti način kao kod IIM-CC-HBC. Signal na prijemniku može se izraziti kao:

$$r_m = s_m + n = \sqrt{\psi_b} \mathbf{h} \mathbf{c}_m + n. \quad (4-10)$$

Vektorom  $\mathbf{h}$  predstavljena su dva različita HBC komunikacijska kanala čija se razlika očituje u položaju sklopke predajne strane. Navedeni vektor



zapisuje se kao:

$$\mathbf{h} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \end{bmatrix}. \quad (4-11)$$

Elementi vektora  $\mathbf{h}$  određuju se pomoću prijenosne funkcije, tj. omjera napona na *shunt* otporu  $V_R$  i napona izvora  $V_S$ .

Kako je ranije navedeno, pomoću sklopke na predajnoj strani mijenja se ukupna impedancija, a posljedično amplituda i faza struje  $i_1$ , tj. komunikacijski kanal ima dva diskretna stanja. Za ispravnu demodulaciju neophodno je napraviti estimaciju kanala, tj. povezati omjer napona  $V_R$  i  $V_S$  s poslanim simbolom („0“ ili „1“). Elementi vektora  $\mathbf{h}$  odgovaraju omjerima napona  $V_R$  i  $V_S$  na sljedeći način:  $\frac{V_{R0}}{V_S}$  odgovara poslanom simbolu „0“ (otvorena sklopka), a  $\frac{V_{R1}}{V_S}$  (zatvorena sklopka) odgovara poslanom simbolu „1“. Pretpostavljeno je kako se simboli (bitovi) pojavljuju s jednakom vjerojatnošću.

Pripadajući vektorski oblik izraza (4-9) je:

$$\mathbf{r} = \mathbf{s}_m + \mathbf{n}, \quad 1 \leq m \leq 2. \quad (4-12)$$

Iz izraza (4-12) vidljivo je kako u slučaju ISK-CC-HBC modulacijskog postupka postoje dva diskretna stanja, tj. ISK-CC-HBC može biti promatran kao poseban slučaj IIM-CC-HBC modulacijskog postupka jer IIM-CC-HBC ima  $M$  mogućih diskretnih stanja komunikacijskog kanala. Shodno navedenome, estimacija indeksa  $\hat{j}$  vrši se na isti način kod oba predložena modulacijska postupka, a izraz (3-30) postaje:

$$\hat{j} = \arg \min_{1 \leq m \leq 2} \|\mathbf{r} - \mathbf{s}_m\|, \quad (4-13)$$

tj. ML detektor traži koji  $\mathbf{s}_m$  ima najmanju Euklidovu udaljenost u odnosu

na primljeni signal  $\mathbf{r}$ .

#### 4.1.2. Vjerojatnost pogreške pri detekciji bita kod ISK-CC-HBC

U slučaju ISK-CC-HBC modulacijskog postupka, za vjerojatnost pogreške pri detekciji bita može se primijeniti izraz (3-54) koji je korišten za izračunavanje PEP-a kod IIM-CC-HBC. Razlog je što ISK-CC-HBC ima samo dvije točke konstelacijskog dijagrama, tj. postoji samo jedna Euklidova udaljenost koja se koristi u argumentu  $Q$  funkcije. Stoga izraz (3-54), uz prosječni odnos signal-šum po bitu  $\psi_b$  postaje:

$$P_{b,ISK} = Q \left( \sqrt{\frac{\psi_b}{2} \|h_1 - h_2\|^2} \right). \quad (4-14)$$

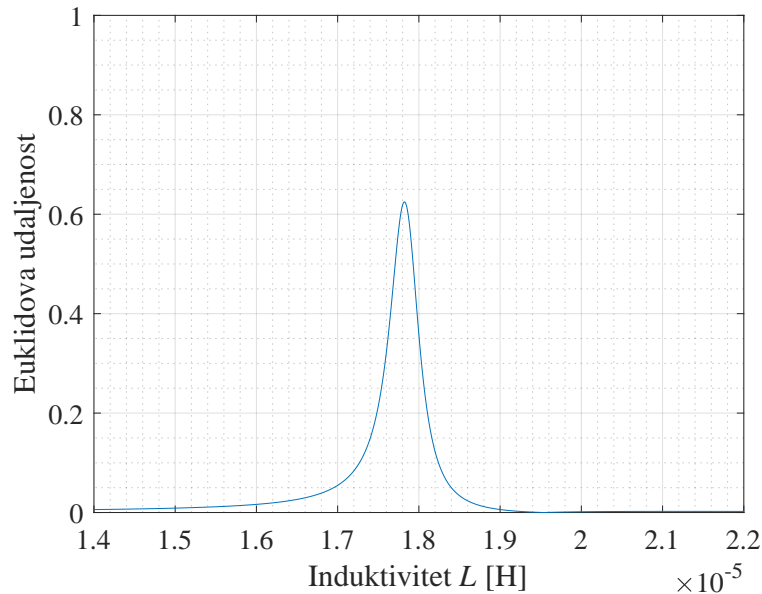
## 4.2. Evaluacija performansi ISK-CC-HBC modulacijskog postupka

U ovom potpoglavlju napravljena je evaluacija performansi ISK-CC-HBC modulacijskog postupka te je analiziran utjecaj već ranije spomenutih parametara (isti kao kod IIM-CC-HBC) na BER. Inicijalni parametri simulacije identični su kao kod IIM-CC-HBC i nalaze se u tablici 3.1. Iznos otpora  $R$  je  $50 \Omega$ .

Kako je vidljivo iz izraza (4-14), povećanjem Euklidove udaljenosti između točaka  $h_1$  i  $h_2$  se, uz nepromijenjen odnos signal/šum  $\psi_b$ , smanjuje vjerojatnost pogreške pri detekciji bita. Jedna od točaka, u ovom slučaju  $h_2$ , nepromjeniva je, a određena je prijenosnom funkcijom  $\frac{V_R}{V_S}$  kada je sklopka na predajniku isključena, tj. kada nije spojen induktivitet  $L$ .

Za određivanje najveće moguće Euklidove udaljenosti u odnosu na točku

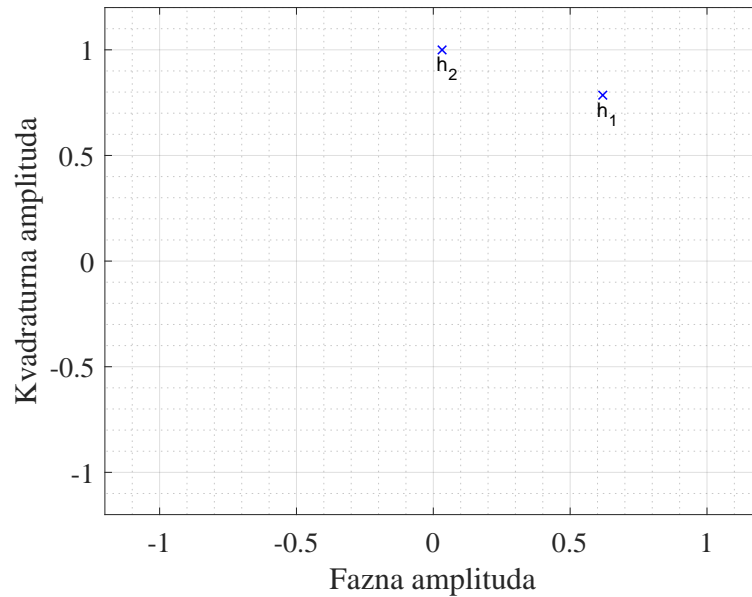
$h_2$ , čije su koordinate  $0.0320 + 0.9995i$ , neophodno je odrediti vrijednost induktiviteta  $L$  kojim se navedeno postiže. U tu je svrhu empirijskom metodom određen iznos induktiviteta kojim se postiže maksimalna Euklidova udaljenost. Navedena ovisnost prikazana je slikom 4.2.



Slika 4.2: Ovisnost Euklidove udaljenosti o induktivitetu  $L$

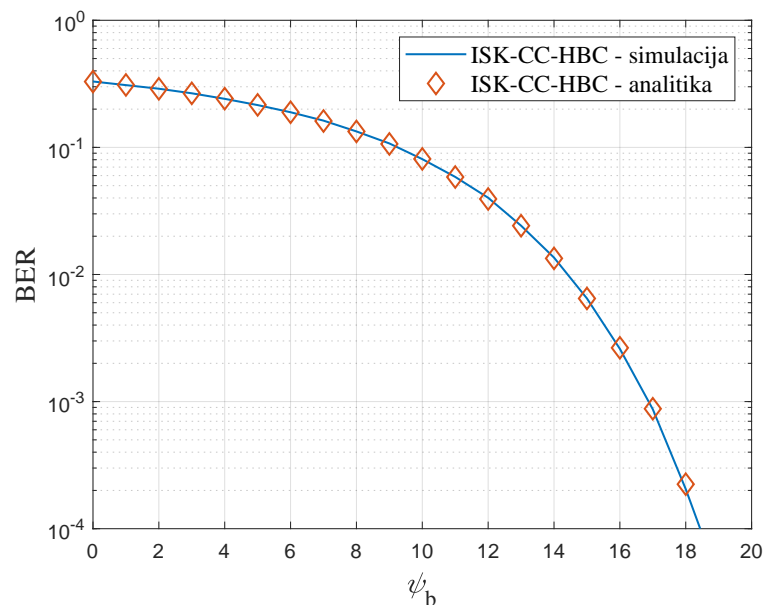
Iz slike 4.2 vidljivo je kako je optimalna vrijednost induktiviteta  $17,82 \mu\text{H}$ . Pripadajuća Euklidova udaljenost tada je  $0,625$ . Za sve ostale vrijednosti induktiviteta, koje su manje i veće od navedene, Euklidova udaljenost relativno brzo opada, tj. karakteristika ovisnosti Euklidove udaljenosti o induktivitetu  $L$  relativno je strma. Stoga je odabir optimalnog induktiviteta ključan za smanjenje vjerojatnosti pogreške pri detekciji bita.

Kada je sklopka na predajniku zatvorena i kada je na taj način spojen optimalni induktivitet  $L$ , točka konstelacijskog dijagrama  $h_1$  ima koordinate  $0,6191 + 0,7853i$ . Na slici 4.3 vidljive su obje točke konstelacijskog dijagrama. Provedene su dvije analize BER-a. BER kod ISK-CC-HBC sustava s inicijalnim vrijednostima parametara iz tablice 3.1 prikazan je grafom na slici 4.4. Analitički je određen prema izrazu (4-14), a simulacijski je potvrđen Monte



Slika 4.3: ISK-CC-HBC konstelacijski dijagram s inicijalnim parametrima

Carlo simulacijom. Sve daljnje analize BER-a kod ISK-CC-HBC dobivene su Monte Carlo simulacijom pri čemu su parametri prilagođeni vrsti analize.



Slika 4.4: Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC s inicijalnim parametrima

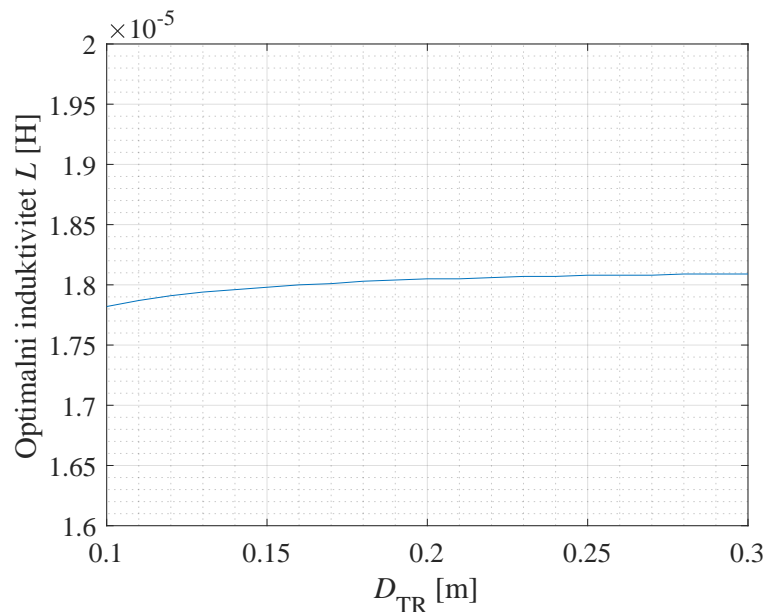
U sljedećim je dijelovima analiziran utjecaj parametara komunikacijskog kanala na ISK-CC-HBC sustav. Analiza se, kao i kod IIM-CC-HBC sustava, prvenstveno odnosi na BER. Prije analize utjecaja parametara ISK-CC-HBC sustava na BER, analiziran je utjecaj navedenih parametara na odabir opti-

malnog induktiviteta  $L$ . Optimalan induktivitet  $L$  je onaj uz koji se postiže najveća Euklidova udaljenost između točaka konstelacijskog dijagrama  $h_1$  i  $h_2$ .

#### 4.2.1. Utjecaj udaljenosti između predajnika i prijemnika na performanse ISK-CC-HBC

U daljnjem tekstu analiziran je utjecaj udaljenosti između predajnika i prijemnika na odabir optimalnog induktiviteta  $L$ . Kao i kod IIM-CC-HBC, ovaj parametar direktno utječe na četiri parametra:  $C_{\text{zrak}}$ ,  $R_{\text{tijelo}}$ ,  $C_c$  i  $C_{\text{tijelo}}$ .

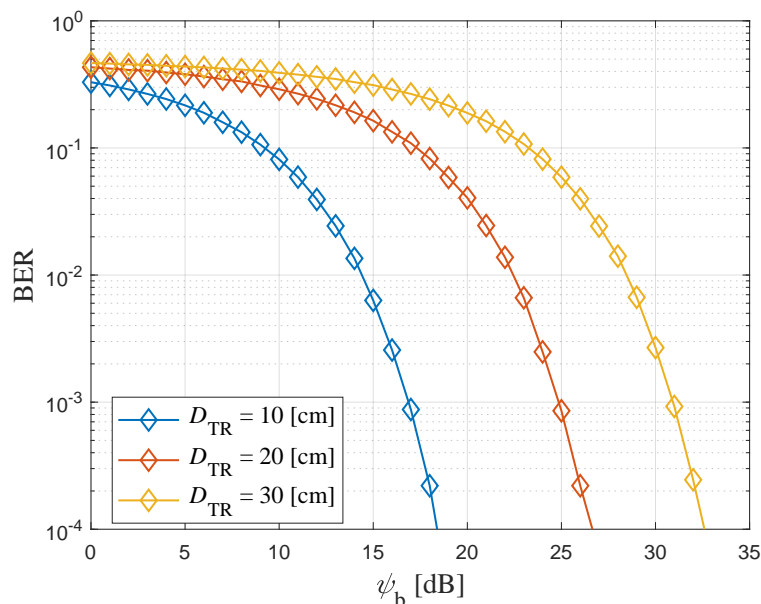
Simulacijom je analizirana ovisnost optimalnog induktiviteta za udaljenosti između predajnika i prijemnika od 10 cm do 30 cm. Ovisnost je prikazana slikom 4.5.



Slika 4.5: Ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o udaljenosti  $D_{\text{TR}}$

Vidljivo je kako se kod manjih udaljenosti predajnika i prijemnika optimalni induktivitet  $L$  mijenja za male promjene  $D_{\text{TR}}$ , dok povećanjem navedene udaljenosti optimalni induktivitet  $L$  teži ka konstantnoj vrijednosti, tj. utjecaj  $D_{\text{TR}}$  na odabir optimalnog induktiviteta  $L$  se gubi.

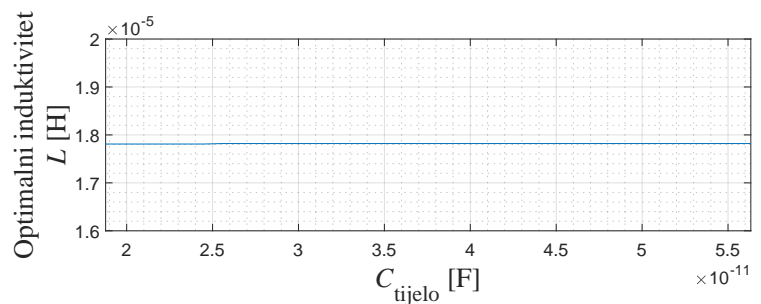
Grafom na slici 4.6 prikazan je utjecaj udaljenosti između predajnika i prijemnika na BER. Analizirane su udaljenosti od 10 cm, 20 cm i 30 cm. Očekivano, najniži se BER za jednak odnos  $\psi_b$  postiže kod najmanje udaljenosti između predajnika i prijemnika. Primjerice, za BER od  $10^{-4}$  pri udaljenosti od 10 cm potreban je  $\psi_b$  od oko 18 dB, a za udaljenosti od 20 cm i 30 cm potreban  $\psi_b$  iznosi oko 26 dB i 33 dB. Razlog takvog rezultata je variranje nekoliko parametara, a utjecaj svakoga od njih analiziran je dalje u ovom dijelu.



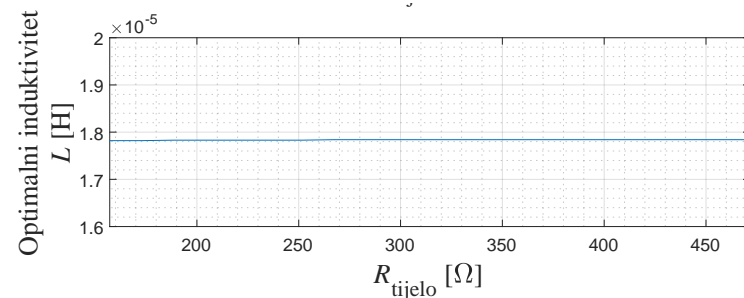
**Slika 4.6:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC za različite vrijednosti  $D_{TR}$

Na grafu koji se nalazi na slici 4.7a fiksirane su vrijednosti parametara  $C_{zrak}$ ,  $C_c$  i  $R_{tijelo}$  na inicijalne vrijednosti iz tablice 3.1. Promatran je utjecaj promjene parametra  $C_{tijelo}$  na odabir optimalnog induktiviteta  $L$ . Pri tome je raspon koji može poprimiti parametar  $C_{tijelo}$  podešen u skladu s pripadajućim vrijednostima raspona  $D_{TR}$ . Točnije,  $C_{tijelo}$  je u rasponu od 18,78 pF do 56,33 pF, a vrijednost optimalnog induktiviteta je u rasponu od 17,81  $\mu$ H do 17,82  $\mu$ H. Treba napomenuti kako je veća vrijednost parametra  $C_{tijelo}$  sukladna udaljenosti  $D_{TR}$  od 10 cm, dok je manja vrijednost parametra  $C_{tijelo}$

sukladna udaljenosti  $D_{TR}$  od 30 cm. Na grafu sa slike 4.7b prikazan je utjecaj promjene parametra  $R_{tjelo}$  na odabir optimalnog induktiviteta  $L$ , a fiksirane su vrijednosti parametara  $C_{zrak}$ ,  $C_c$  i  $C_{tjelo}$  na inicijalne vrijednosti iz tablice 3.1. Parametar  $R_{tjelo}$  u ovom se slučaju mijenja od 157,19  $\Omega$  do 471,57  $\Omega$  sukladno udaljenostima od 10 cm do 30 cm. Vrijednost optimalnog induktiviteta u ovom je slučaju u rasponu od 17,82  $\mu\text{H}$  do 17,84  $\mu\text{H}$ . Vidljivo je kako promjena parametara  $C_{tjelo}$  i  $R_{tjelo}$  dijela tijela osobe kod koje se vrši komunikacija ima vrlo malen utjecaj na odabir optimalnog induktiviteta  $L$  jer se faza i amplituda struje  $i_1$ , pod utjecajem promjene impedancije  $Z_{tjelo}$ , tj. faze i amplitude struje  $i_3$ , vrlo malo mijenjaju.



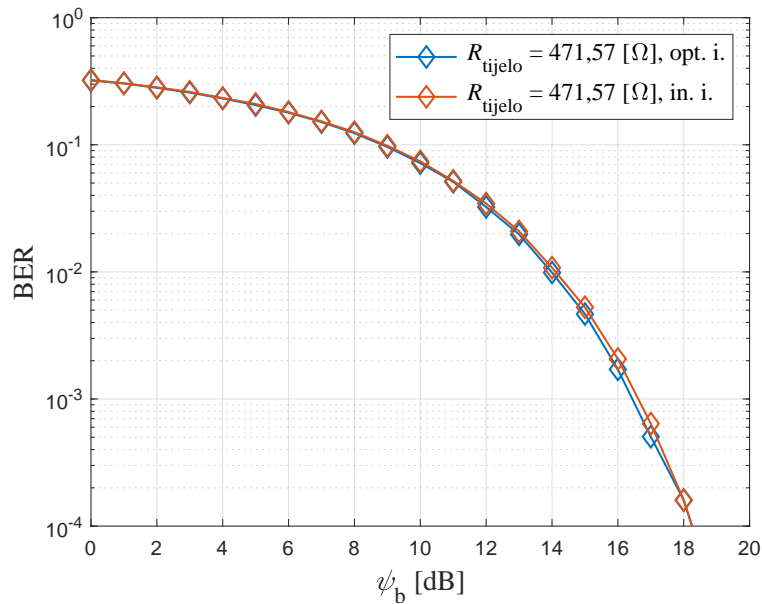
(a) Ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o parametru  $C_{tjelo}$



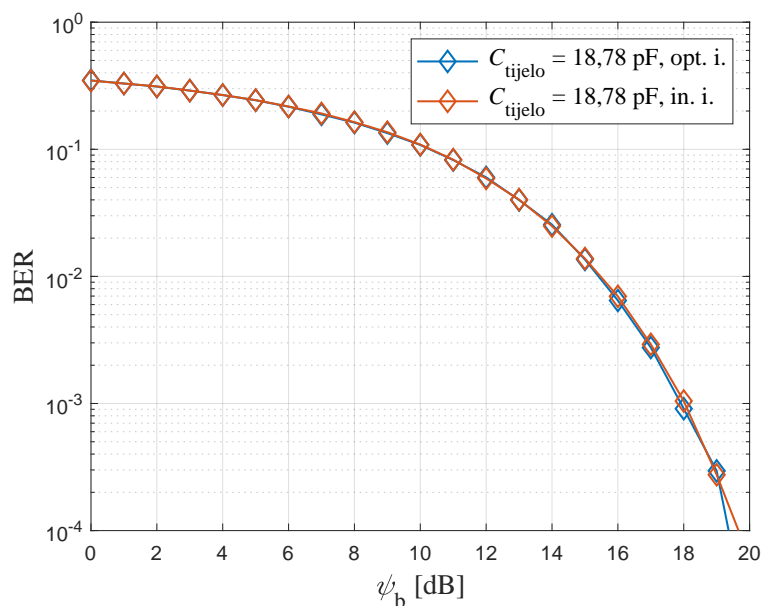
(b) Ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o parametru  $R_{tjelo}$

**Slika 4.7:** Ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o vrijednostima parametara  $R_{tjelo}$  i  $C_{tjelo}$

Grafovima na slikama 4.8 i 4.9 prikazan je rezultat analize utjecaja promjene ranije navedenih parametara  $R_{tjelo}$  i  $C_{tjelo}$  na BER. U obzir su uzete granične vrijednosti, tj. vrijednosti koje su dobivene za udaljenost između predajnika i prijemnika od 30 cm ( $C_{tjelo} = 18,78$  pF,  $R_{tjelo} = 471,57$   $\Omega$ ). Analiziran je BER za slučaj kada se koristi inicijalni induktivitet (oznaka in.



**Slika 4.8:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz  $R_{\text{tijelo}} = 471,57 \text{ } [\Omega]$



**Slika 4.9:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz  $C_{\text{tijelo}} = 18,78 \text{ } [\text{pF}]$

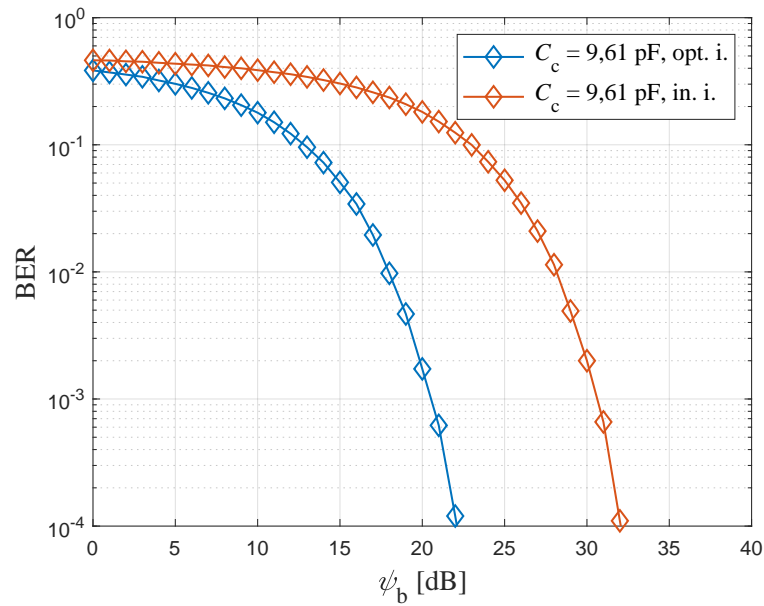
i.) od  $17,82 \text{ } \mu\text{H}$  te optimalni induktivitet (oznaka opt. i.) sukladan promjeni svakog od navedenih parametara. Za BER od  $10^{-4}$ , prema slici 4.8, potreban je  $\psi_b$  od 18,2 dB kod korištenja inicijalnog i optimalnog ( $17,84 \text{ } \mu\text{H}$ ) induktiviteta. Ukoliko se graf za slike 4.8 usporedi s grafom sa slike 4.4 vidljivo je kako su potrebne vrijednosti  $\psi_b$  za isti iznos BER-a gotovo identične. Za BER od



$10^{-4}$ , prema slici 4.9, potreban je  $\psi_b$  od 19,5 dB kod korištenja inicijalnog i optimalnog ( $17,81 \mu\text{H}$ ) induktiviteta. Ukoliko se graf za slike 4.9 usporedi s grafom sa slike 4.4 vidljivo je kako je, promjenom parametra  $C_{\text{tijelo}}$  potrebna vrijednost  $\psi_b$  za isti iznos BER-a veća za 1,3 dB što ukazuje na veći utjecaj promjene parametra  $C_{\text{tijelo}}$  u odnosu na promjenu parametra  $R_{\text{tijelo}}$ . Razlozi većega utjecaja  $C_{\text{tijelo}}$  na BER isti su kao i kod IIM-CC-HBC.

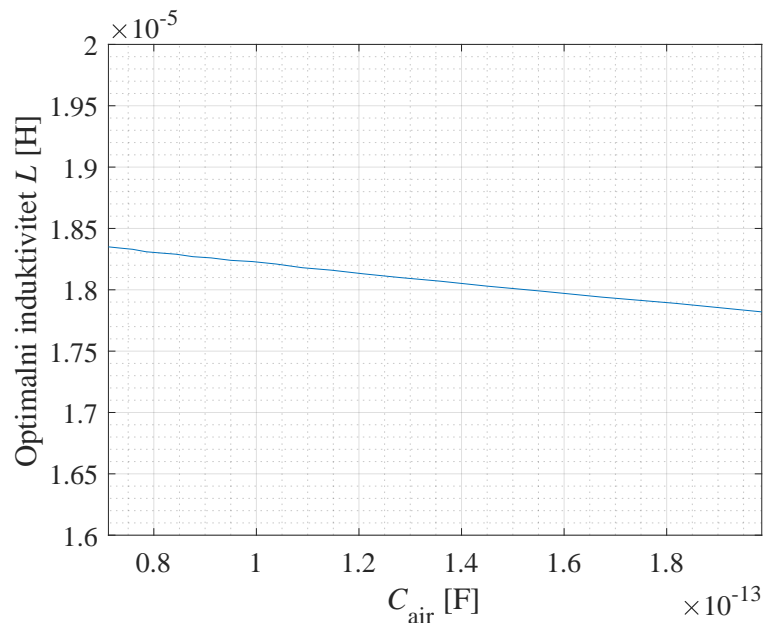
Grafom na slici 4.10 prikazan je utjecaj parametra  $C_c$  pri čemu su vrijednosti ranije analiziranih parametara  $R_{\text{tijelo}}$ ,  $C_{\text{tijelo}}$  i  $C_{\text{zrak}}$  fiksirane na inicijalne vrijednosti iz tablice 3.1. Vrijednost koju poprima  $C_c$  iznosi 9,61 pF ( $D_{\text{TR}} = 30 \text{ cm}$ ). Za BER od  $10^{-4}$ , prema slici 4.10, potreban  $\psi_b$  iznosi oko 32 dB kod korištenja inicijalnog induktiviteta i 22 dB kod korištenja optimalnog ( $17,54 \mu\text{H}$ ) induktiviteta. Navedeno ukazuje na velik utjecaj promjene parametra  $C_c$  na odabir optimalnog induktiviteta. Ukoliko se graf sa slike 4.10 usporedi s grafom sa slike 4.4, vidljivo je kako se potrebne vrijednosti  $\psi_b$  za BER od  $10^{-4}$  razlikuju za 3,8 dB ako se usporede slučajevi s optimalnim induktivitetima, a za 13,8 dB ukoliko je uz  $C_c = 9,61 \text{ pF}$  korišten inicijalni induktivitet. Iz navedene je analize vidljivo da  $C_c$  ima značajan utjecaj na performanse ISK-CC-HBC sustava za promatrani raspon udaljenosti  $D_{\text{TR}}$ . Naime, vrijednosti optimalnog induktiviteta  $L$  nalaze se u rasponu od  $17,54 \mu\text{H}$  ( $C_c = 9,61 \text{ pF}$ ) do  $17,82 \mu\text{H}$  ( $C_c = 5,49 \text{ pF}$ ). Uzrok takvog rezultata je, kao i kod IIM-CC-HBC, slabija kapacitivna sprega između ruke i tla ukoliko je veća udaljenost  $D_{\text{TR}}$ . Povećanje dijela tijela koji predstavlja komunikacijski kanal značajno utječe na kapacitivnu spregu između ruke i tla, a samim time i narušava kvalitetu komunikacije, tj. povećava se BER za isti iznos  $\psi_b$ .

Posljednji parametar koji u izrazu za izračunavanje sadrži parametar  $D_{\text{TR}}$ , a čiji je utjecaj na odabir optimalnog induktiviteta  $L$  analiziran i prikazan



**Slika 4.10:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz  $C_c = 9,61$  [pF]

grafom na slici 4.11 je  $C_{zrak}$ . Pri analizi su fiksirane vrijednosti parametara  $R_{tijelo}$ ,  $C_{tijelo}$  i  $C_c$  na inicijalne vrijednosti iz tablice 3.1. U navedenom je slučaju parametar  $C_{zrak}$  u rasponu od 71,15 fF ( $D_{TR} = 30$  cm) do 198,54 fF ( $D_{TR} = 10$  cm).

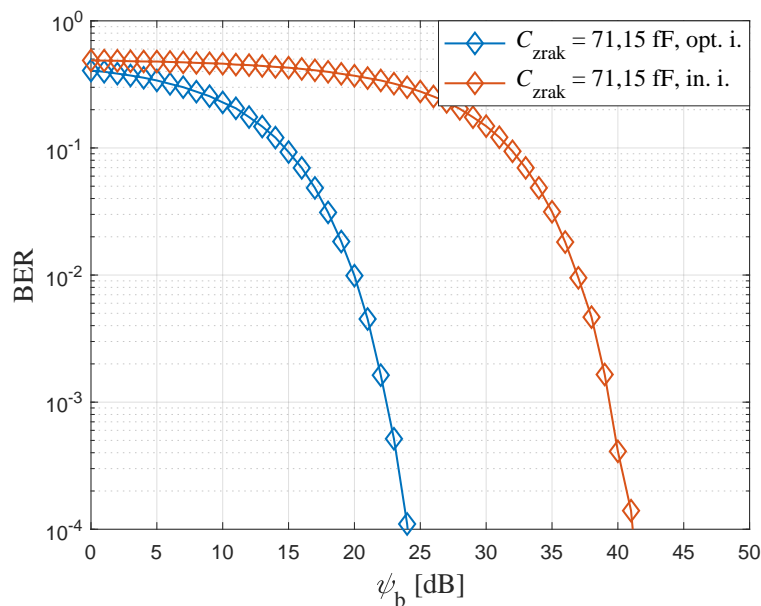


**Slika 4.11:** Ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o kapacitetu  $C_{zrak}$

Prema slici 4.11, na odabir optimalnog induktiviteta  $L$  najviše utječe pa-

parametar  $C_{\text{zrak}}$  s fiksnim vrijednostima parametara  $R_{\text{tijelo}}$ ,  $C_{\text{tijelo}}$  i  $C_c$ . Iznos optimalnog induktiviteta kreće se u rasponu od  $17,82 \mu\text{H}$  ( $C_{\text{zrak}} = 71,15 \text{ fF}$ ) do  $18,35 \mu\text{H}$  ( $C_{\text{zrak}} = 198,57 \text{ fF}$ ). Razlog ovakve pojave isti je kao kod IIM-CC-HBC, tj. udaljavanjem predajnika i prijemnika sprega između njihovih referentnih elektroda slabi. Prema tome je promjena vrijednosti optimalnog induktiviteta, za udaljenost  $D_{\text{TR}}$  koja je veća od 20 cm, vrlo mala ukoliko u obzir uzmemo realan slučaj (nije fiksiran nijedan parametar) prikazan slikom 4.5. Ukoliko se graf sa slike 4.12 usporedi s grafom sa slike 4.4, vidljivo je kako se potrebne vrijednosti  $\psi_b$  za BER od  $10^{-4}$  razlikuju za oko 5,8 dB ukoliko se usporede slučajevi s optimalnim induktivitetima, a za oko 22,8 dB ukoliko je uz  $C_{\text{zrak}} = 71,15 \text{ fF}$  korišten inicijalni induktivitet.

S obzirom na činjenicu kako parametar  $C_{\text{zrak}}$  ima najveći utjecaj na odabir optimalnog induktiviteta  $L$  od svih četiriju analiziranih parametara u ovom dijelu, može se očekivati kako će i njegov utjecaj na BER biti najveći. Navedeno potvrđuje i analiza čiji su rezultati prikazani grafom na slici 4.12. Iz



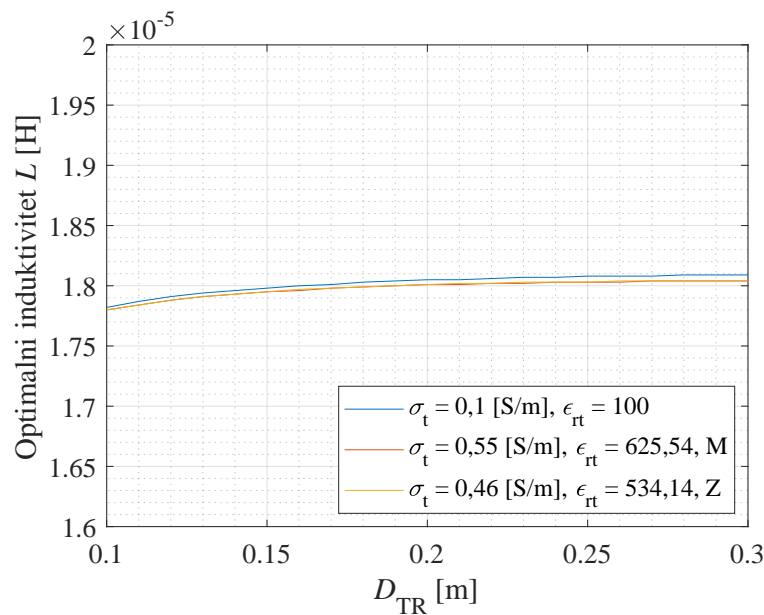
**Slika 4.12:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz  $C_{\text{zrak}} = 71,15 \text{ [fF]}$

navedenog je grafa vidljivo da za BER od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  iznosi oko 41 dB kod korištenja inicijalnog induktiviteta i 24 dB kod korištenja optimalnog ( $18,35 \mu\text{H}$ ) induktiviteta.

#### 4.2.2. Utjecaj spola i konstitucije osobe na performanse

##### ISK-CC-HBC

Kako je navedeno u prethodnom dijelu, parametri  $R_{\text{tijelo}}$  i  $C_{\text{tijelo}}$  imaju relativno malen utjecaj na performanse ISK-CC-HBC. Navedeno potkrepljuje i analiza ovisnosti optimalnog induktiviteta  $L$  o promjeni udaljenosti  $D_{\text{TR}}$  za različite vrijednosti  $\epsilon_{\text{rt}}$  i  $\sigma_t$  prikazana slikom 4.13.

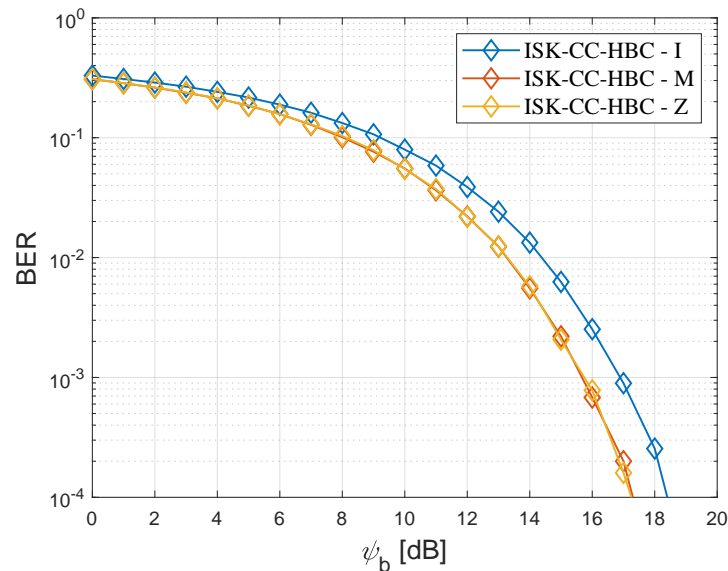


Slika 4.13: Ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o udaljenosti  $D_{\text{TR}}$

Na slici 4.13 plava krivulja predstavlja vrijednosti optimalnog induktiviteta  $L$  uz vrijednosti  $\epsilon_{\text{rt}} = 100$  i  $\sigma_t = 0,1 \text{ S/m}$ . Vrijednosti navedenih parametara već su ranije spomenute kao inicijalne, a uzete su kao srednje vrijednosti sa slike 3.2 bez obzira na udio tkiva. Crvena krivulja predstavlja vrijednosti navedenih parametara kod muškaraca (oznaka „M“), a žuta krivulja vrijednosti navedenih parametara kod žena (oznaka „Z“). Vidljivo je kako

su krivulje gotovo identične. Primjerice, uz  $D_{TR} = 0,1$  m, optimalni induktivitet kod obaju spolova je  $17,80 \mu\text{H}$  (iznosi se razlikuju tek na 5. decimali). Može se zaključiti kako na ISK-CC-HBC modulacijski postupak gotovo ne utječe spol osobe putem koje se vrši komunikacija.

Grafom na slici 4.14 prikazane su tri krivulje koje prikazuju ovisnost BER-a o  $\psi_b$  za tri različita slučaja. Plavom je bojom označen slučaj s inicijalnim parametrima (oznaka „I“). Crvenom je bojom označen slučaj kada su u obzir uzeti  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$  za muški spol (oznaka „M“) dok je žutom bojom označen slučaj kada su u obzir uzeti  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$  za ženski spol (oznaka „Z“).

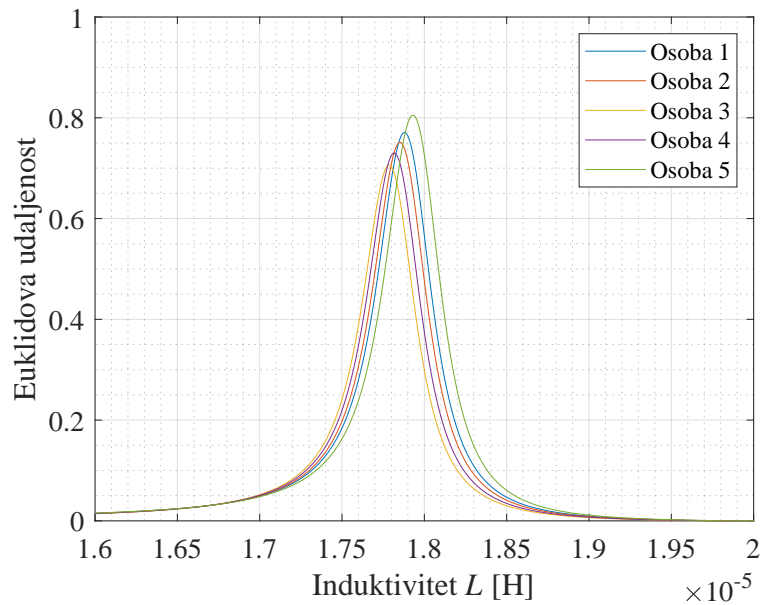


**Slika 4.14:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC za različite vrijednosti  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$

Kod obaju spolova je, za BER od  $10^{-4}$ , potreban  $\psi_b$  od oko 17 dB. Nešto viši BER je u inicijalnom slučaju, tj. za isti je BER potreban nešto veći  $\psi_b$  u iznosu od 18,5 dB. Uzrok takvog rezultata je što se povećanjem  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$  smanjuje kapacitivna reaktancija, tj. smanjuje se ukupna impedancija dijela tijela koji predstavlja komunikacijski kanal.

Nadalje, za istih je pet osoba, kao kod IIM-CC-HBC modulacijskog postupka, određen iznos optimalnog induktiviteta  $L$ . Različite vrijednosti op-

timalnog induktiviteta  $L$  posljedica su utjecaja polumjera podlaktice na  $C_c$ , a u obzir su uzete i vrijednosti parametara  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$ , tj. svakoj je osobi iz tablice 3.5, sukladno spolu, dodijeljen udio tkiva prema spolu iz tablice 3.4. Promjena parametara  $\varepsilon_{rt}$  i  $\sigma_t$  utječu na promjenu parametara  $C_{tjelo}$  i  $R_{tjelo}$ , a posljedično i na odabir optimalnog induktiviteta  $L$ . Analiza je prikazana grafom na slici 4.15.

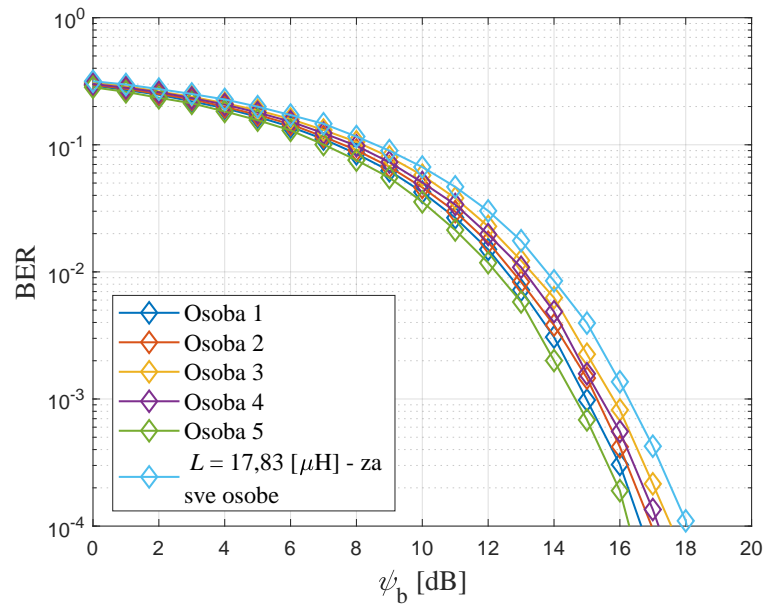


**Slika 4.15:** Ovisnost Euklidove udaljenosti o induktivitetu  $L$  za različite osobe

Očitanjem s grafa na slici 4.15 vidljivo je kako za iznos induktiviteta  $L$  od  $17,83 \mu\text{H}$  najmanja Euklidova udaljenost između točaka konstelacijskog dijagrama ni za jednu osobu neće biti manja od  $0,67$ . Zanimljivo je kako je navedena vrijednost induktiviteta vrlo bliska vrijednosti optimalnog induktiviteta  $L$  za inicijalni slučaj gdje je proračunato  $17,82 \mu\text{H}$ .

Graf na slici 4.16 prikazuje BER za svih pet osoba. Prikazana je i krivulja koja predstavlja najviši BER ukoliko se kod svih pet osoba koristi jednak induktivitet ( $17,83 \mu\text{H}$ ). Očekivano, taj je BER za jednak odnos  $\psi_b$  nešto viši od ostalih.

Primjerice, za BER od  $10^{-4}$  potreban je  $\psi_b$  od  $18 \text{ dB}$ . Za isti BER kod



**Slika 4.16:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC za različite osobe

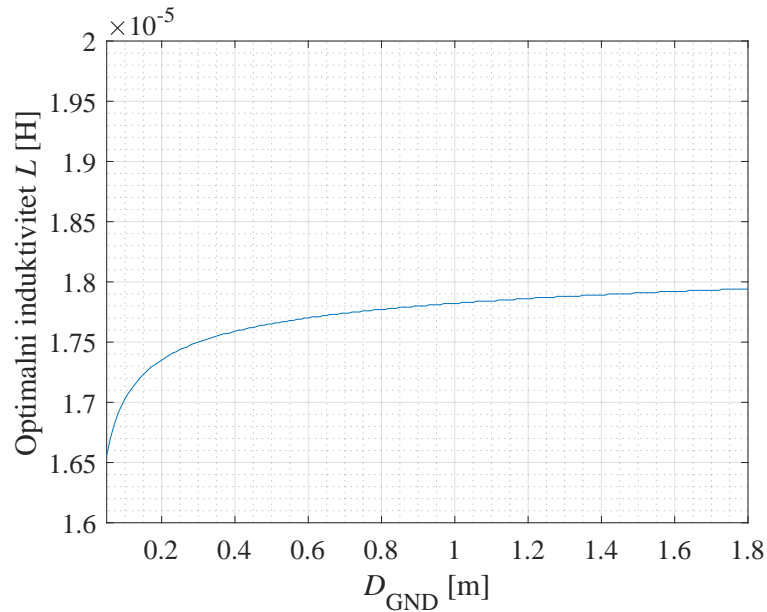
Osobe 5 potreban je iznos  $\psi_b$  od 16,2 dB. Potreban  $\psi_b$  za isti iznos BER-a kod svih je ostalih osoba između navedenih vrijednosti. Osoba 5 ima najmanji polumjer podlaktice koji rezultira najmanjom vrijednošću parametra  $C_c$ .  $C_c$  je, prema izrazu (3-4), proporcionalan polumjeru podlaktice, a već ranije je, grafom sa slike 4.10, prikazano kako je za niži BER potreban manji  $C_c$ .

#### 4.2.3. Utjecaj udaljenosti od tla na performanse ISK-CC-HBC

Daljnijim je simulacijama analizirana ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o udaljenosti između referentnih elektroda predajnika i prijemnika od tla, tj. ruke od tla. Kao i kod IIM-CC-HBC, pretpostavljeno je kako su vrijednosti parametara  $D_{\text{GND}}$  i  $GND_{\text{earth}}$  identične.

Grafom na slici 4.17 prikazan je utjecaj udaljenosti na odabir optimalnog induktiviteta  $L$ . Analiza je provedena u rasponu od 5 cm (optimalan induktivitet  $L$  iznosi 16,56  $\mu\text{H}$ ) do 1,8 m (optimalan induktivitet  $L$  iznosi 17,94  $\mu\text{H}$ ).

Vidljivo je kako je promjena optimalnog induktiviteta  $L$  kod malih udalje-

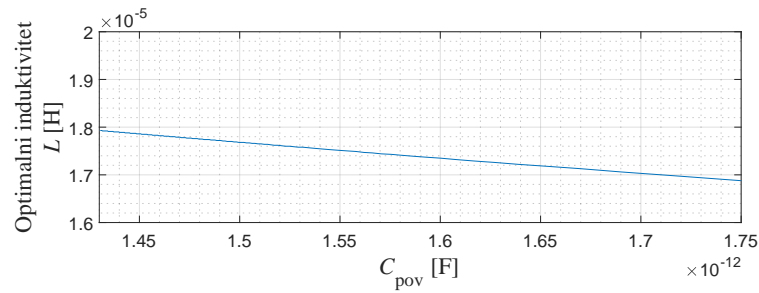


**Slika 4.17:** Ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o udaljenosti  $D_{\text{GND}}$

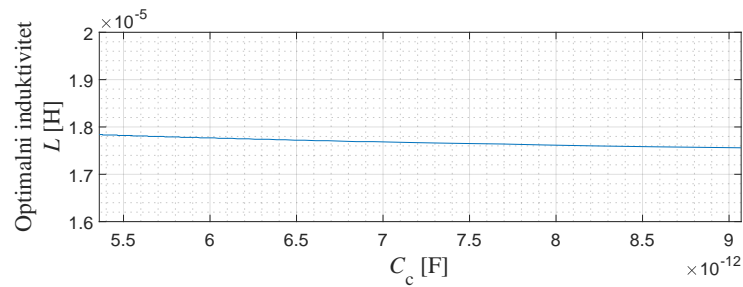
nosti značajna, dok povećanjem udaljenosti teži ka konstantnoj vrijednosti. Razlog je takve pojave smanjenje utjecaja parametara  $C_c$  i  $C_{\text{pov}}$  povećanjem udaljenosti  $D_{\text{GND}}$ . S praktičnog aspekta promatrano, vrijednost optimalnog induktiviteta  $L$  neće se značajnije mijenjati ukoliko osoba sjedi ili stoji te pri tim radnjama čini pokrete rukom.

Promjena parametra  $D_{\text{GND}}$  utječe na  $C_{\text{pov}}$  i  $C_c$ . Analiza utjecaja tih parametara na odabir optimalnog induktiviteta  $L$  vidljiva je na slikama 4.18a i 4.18b.  $C_{\text{pov}}$  poprima vrijednosti od 1,43 pF ( $D_{\text{GND}} = 1,8$  m), pri čemu optimalni  $L$  iznosi 17,93  $\mu\text{H}$ , do 1,75 pF ( $D_{\text{GND}} = 5$  cm), a tada optimalni  $L$  iznosi 16,88  $\mu\text{H}$ .  $C_c$  poprima vrijednosti od 5,36 pF ( $D_{\text{GND}} = 1,8$  m), pri čemu optimalni  $L$  iznosi 17,56  $\mu\text{H}$ , do 9,07 pF ( $D_{\text{GND}} = 5$  cm), a tada optimalni  $L$  iznosi 17,84  $\mu\text{H}$ . Treba napomenuti kako je na gornjem grafu fiksirana vrijednost parametra  $C_c$ , dok je na donjem grafu fiksirana vrijednost parametra  $C_{\text{pov}}$ . Uz navedene, fiksirani su i ostali parametri prema tablici 3.1. Može se zaključiti kako nijedan od parametara nema zanemariv utjecaj na odabir optimalnog induktiviteta.





(a) Ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o parametru  $C_{\text{pov}}$

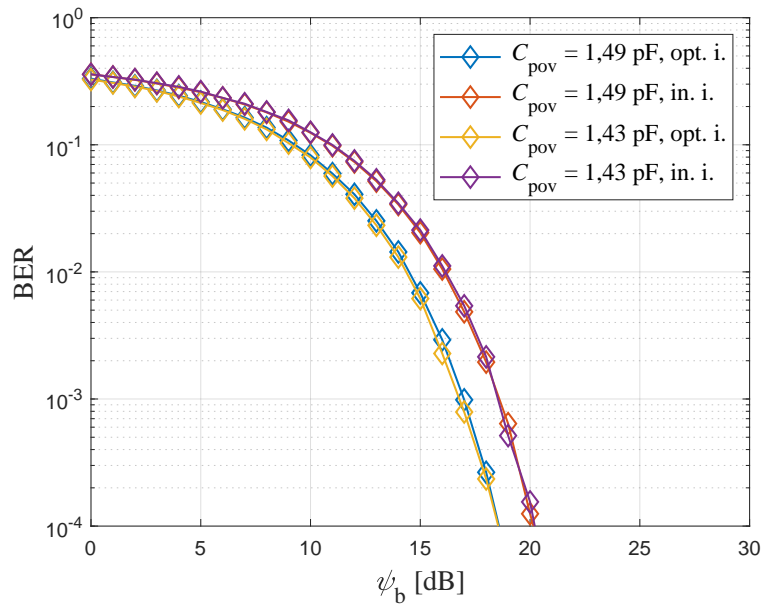


(b) Ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o parametru  $C_c$

**Slika 4.18:** Ovisnost optimalnog induktiviteta  $L$  o vrijednostima parametara  $C_{\text{pov}}$  i  $C_c$  uz fiksiranu vrijednost parametra  $D_{\text{TR}}$

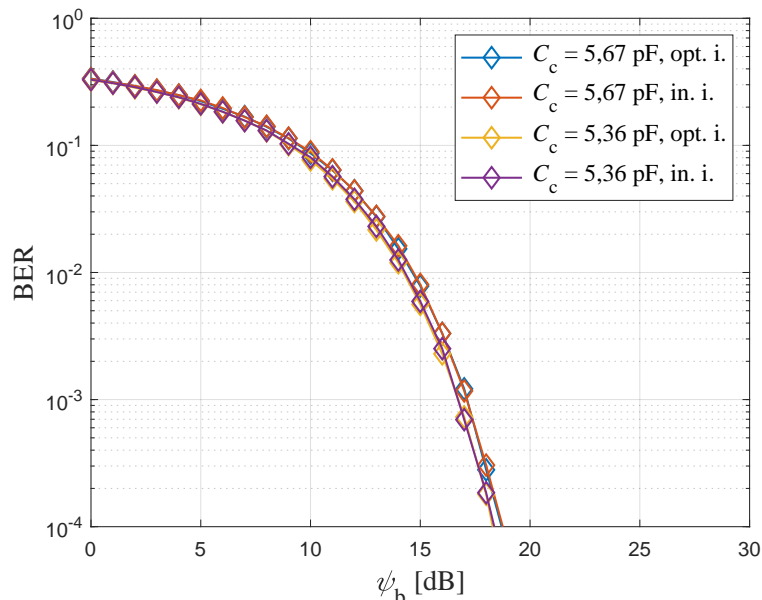
Graf na slici 4.19 prikazuje utjecaj parametra  $C_{\text{pov}}$  na BER uz fiksiranu vrijednost parametra  $C_c$  na vrijednost iz tablice 3.1. Za analizu su odabrane vrijednosti koje  $C_{\text{pov}}$  poprima kada je udaljenost od tla  $D_{\text{GND}}$  jednaka 0,6 metra ( $C_{\text{pov}} = 1,49$  pF) te 1,8 metra ( $C_{\text{pov}} = 1,43$  pF). Vidljivo je kako BER gotovo ne ovisi o  $C_{\text{pov}}$  ukoliko se koriste optimalni induktiviteti. Za BER od  $10^{-4}$  potreban je  $\psi_b$  od 18,2 dB za obje vrijednosti  $C_{\text{pov}}$ . Potreban  $\psi_b$  je za 1,8 dB veći ukoliko se koriste inicijalni induktiviteti. Pokazano je da promjena parametra  $C_{\text{pov}}$  ne utječe značajno na BER ukoliko osoba sjedi ili stoji jer se vrijednosti parametra  $C_{\text{pov}}$  razlikuje za 0,06 pF za  $D_{\text{GND}}$  u iznosu od 0,6 metra do 1,8 metra. Razlika između vrijednosti parametra  $C_{\text{pov}}$  za  $D_{\text{GND}}$  u iznosu od 0,05 centimetra do 1,8 metra značajno je veća i iznosi 0,26 pF.

Grafom na slici 4.20 prikazan je utjecaj parametra  $C_c$  na BER uz fiksiranu vrijednost parametra  $C_{\text{pov}}$  na vrijednost iz tablice 3.1. Opet su promatrani



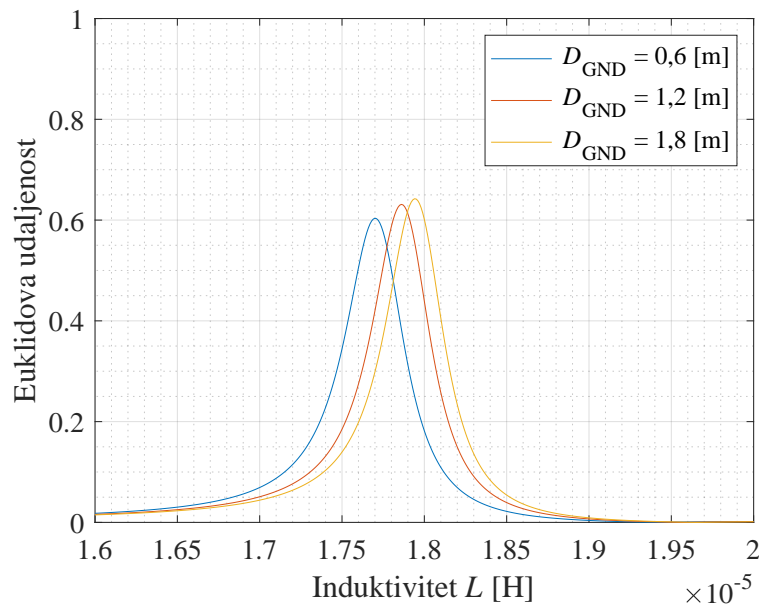
**Slika 4.19:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz  $C_{pov} = 1,49$  [pF] i  $C_{pov} = 1,43$  [pF]

iznosi parametra za visine 0,6 metra ( $C_c = 5,67$  pF) te 1,8 metra ( $C_c = 5,36$  pF) uz korištenje optimalnih i inicijalnih induktiviteta. Parametar  $C_c$  ima neznatan utjecaj na BER jer je za sva četiri promatrana slučaja potreban gotovo identičan  $\psi_b$ .



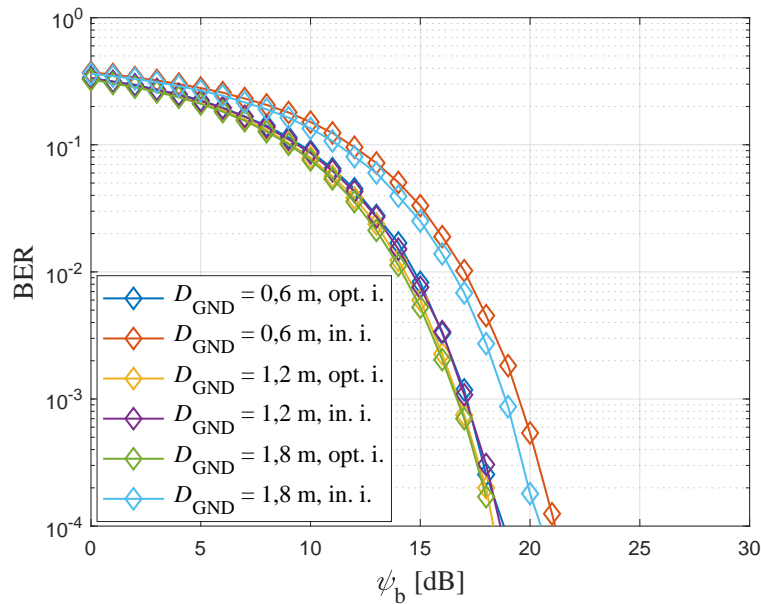
**Slika 4.20:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz  $C_c = 5,67$  [pF] i  $C_c = 5,36$  [pF]

Kako bi se testirao realan slučaj u kojemu se induktivitet ne mijenja, a udaljenost  $D_{\text{GND}}$  je promjenjiva, izrađena je analiza za tri različite udaljenosti, a rezultati analize prikazani su grafom na slici 4.21. Iznosi udaljenosti su 0,6 metra, 1,2 metra te 1,8 metra. Iz grafa se može vidjeti kako Euklidova udaljenost između točaka konstelacijskog dijagrama neće biti manja od 0,463 ukoliko se u bilo kojemu od triju slučajeva odabere induktivitet od  $17,82 \mu\text{H}$ . Upravo taj iznos induktiviteta dobiven je i analizom s inicijalnim parametrima.



Slika 4.21: Ovisnost Euklidove udaljenosti o induktivitetu  $L$  za različite udaljenosti  $D_{\text{GND}}$

Rezultati analize utjecaja parametra  $D_{\text{GND}}$  na BER prikazana je grafom na slici 4.22. Odabrane su sljedeće tri vrijednosti parametra  $D_{\text{GND}}$ : 0,6 metra, 1,2 metra i 1,8 metra. Vidljivo je kako se BER ne mijenja značajno ukoliko je uvijek odabran optimalni induktivitet  $L$  te je za BER od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  od 18,5 dB. Navedena vrijednost potrebnog  $\psi_b$  uključuje i slučaj kada je  $D_{\text{GND}} = 1,2$  metra uz korištenje inicijalnog induktiviteta. Razlog takvom rezultatu je bliska vrijednost parametra  $D_{\text{GND}}$  inicijalnom slučaju ( $D_{\text{GND}} = 1$  metar). U slučajevima kada vrijednost parametra  $D_{\text{GND}}$  iznosi 0,6 metra



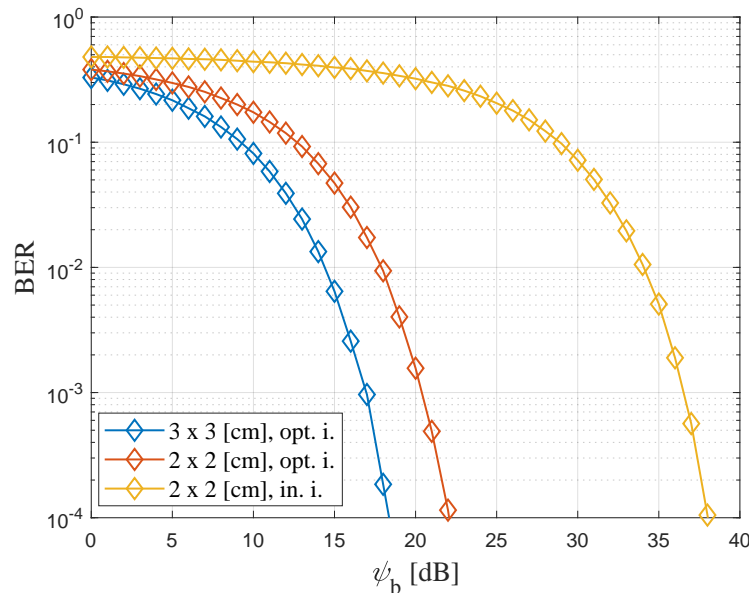
**Slika 4.22:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC za različite vrijednosti parametra  $D_{GND}$

te 1,8 metra, a koristi se inicijalna vrijednost induktiviteta, za BER od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  iznosi 20,5 dB te oko 21 dB. Može se zaključiti kako utjecaj parametra  $D_{GND}$  slabi povećanjem udaljenosti ISK-CC-HBC sustava od tla zbog slabljenja kapacitivne sprege između sustava i vanjskog uzemljenja.

#### 4.2.4. Utjecaj veličine elektroda i sučelja elektroda-koža na performanse ISK-CC-HBC

U ovom dijelu analiziran je utjecaj sučelja elektroda-koža na performanse ISK-CC-HBC. Kao i kod IIM-CC-HBC sustava, analizirane su dvije veličine elektroda: 2 x 2 cm i 3 x 3 cm. Grafom 4.23 prikazana je ovisnost BER-a za različite veličine elektroda uz korištenje optimalnih induktiviteta, ali je prikazan i slučaj kada se uz veličinu elektrode 2 x 2 cm koristi inicijalni induktivitet. Promjena veličine elektroda direktno utječe na parametre  $C_{es}$ ,  $R_{es}$  i  $C_{pov}$ . Vidljivo je kako je za veću površinu elektroda moguće postići nešto manji BER. Primjerice, za BER od  $10^{-4}$ , ukoliko je površina elektroda 2,25 puta manja, potreban je veći  $\psi_b$  za oko 4 dB. Navedeno vrijedi ako se kod

obaju veličina elektroda koristi optimalan induktivitet. No, ako se za veličinu elektrode 2 x 2 cm koristi inicijalni induktivitet, za BER od  $10^{-4}$  potreban  $\psi_b$  iznosi oko 38 dB. Iz opisane se analize može zaključiti kako je za niži BER bolje koristiti veće elektrode, ali i kako je za svaku veličinu elektroda nužno koristiti optimalni induktivitet. Većom površinom elektroda postiže se veća kapacitivna sprega na predajnoj, tj. prijemnoj strani. No, promatrajući praktičnu primjenu, veličina elektroda treba biti projektirana kako bi korisnik mogao neometano nositi uređaj na kojemu se nalaze predajnik i prijemnik, što donekle ograničava dimenzije elektroda.

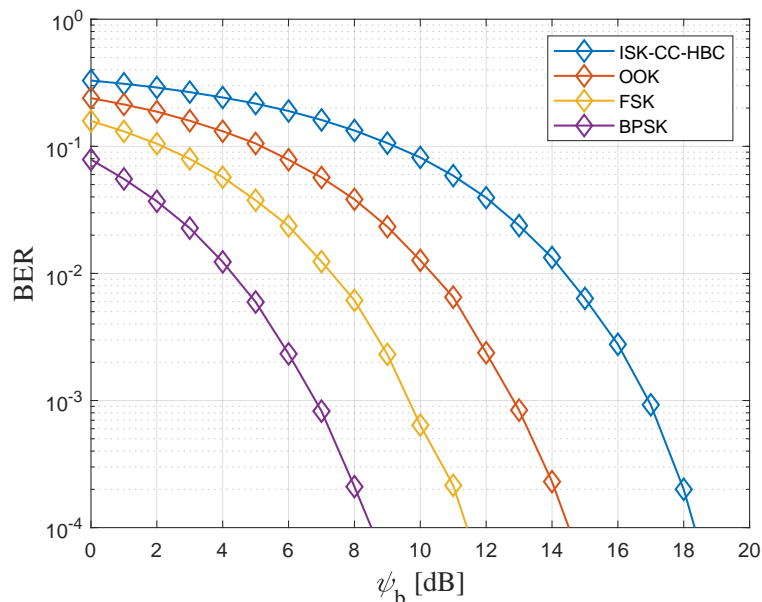


**Slika 4.23:** Vjerojatnost pogreške pri detekciji bita (BER) kod ISK-CC-HBC za različite veličine elektroda

#### 4.2.5. Usporedba performansi ISK-CC-HBC s ostalim modulacijskim postupcima

U ovom je dijelu analizirana vjerojatnost pogreške pri detekciji bita ukoliko se ISK-CC-HBC uspoređi s često korištenim modulacijskim postupcima kod CC-HBC-a. Slika 4.24 prikazuje graf koji uspoređuje BER kod ISK-CC-HBC s vrijednostima BER-a kod OOK, FSK te BPSK modulacijskih postupaka.

S obzirom na položaj točaka konstelacijskog dijagrama kod ISK-CC-HBC modulacijskog postupka, moglo se i pretpostaviti kako će za jednak odnos signal/šum ovaj modulacijski postupak imati najveći BER. Naime, kod ISK-CC-HBC Euklidova je udaljenost najmanja u usporedbi s navedenim modulacijskim postupcima. No, prednost ISK-CC-HBC nad ostalim modulacijskim postupcima je mala sklopovska složenost. Za realizaciju predajne strane potrebni su analogna sklopka i induktivitet, tj. nije potreban lokalni oscilator. Na taj se način osigurava značajna energetska učinkovitost.



**Slika 4.24:** Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod različitih modulacijskih postupaka u usporedbi s ISK-CC-HBC

#### 4.2.6. Usporedba različitih modulacijskih postupaka kod kapacitivno spregnutih HBC sustava

Tablicom 4.1 obuhvaćena su sva spomenuta rješenja zajedno s novim modulacijskim postupcima predstavljenima u trećem i četvrtom poglavlju. Uz svaku je referencu naveden korišteni modulacijski postupak. Uz radnu frekvenciju predloženih sklopovskih rješenja, navedena je sklopovska složenost predajnika kao i primjena. Tablični pregled uključuje i radne frekvencije koje

#### 4. DISKRETNI MODULACIJSKI POSTUPAK ZASNOVAN NA PROMJENI IMPEDANCIJE

nisu u skladu s 802.15.6 standardom.

**Tablica 4.1:** *CC-HBC modulacijski postupci*

Referenca	Modulacijski postupak	Frekvencija	Sklopovska složenost	Primjena
[1]	OOK	333 kHz	Mikroupravljački sklop, LC rezonantni električni krug	Opća HBC namjena
[34]	OOK	21 MHz	oscilator, mješać, pojačalo snage	Opća HBC namjena
[35]	OOK	500 kHz	DDS, oscilator, mikroupravljački sklop, PRBS generator	Autentikacija, zdravstveni nadzor na daljinu
[36]	OOK	10 MHz	FPGA	Prijenos audiosadržaja, opća HBC namjena
[37]	OOK	od 0,5 MHz do 2 MHz	Oscilator, pojačalo, korektor faktora ispunje	Žetva energije, opća HBC namjena
[38]	OOK	21 MHz	Mikroupravljač, oscilator	Nadzor otkucaja srca
[39]	FSK	140 kHz/180 kHz	Modulator, filteri, pojačala	Opća HBC namjena
[41]	FSK	od 30 MHz do 120 MHz	Oscilator, upravljački sklop	Opća HBC namjena
[42]	DPFSK	80 MHz	Digitalni frekvencijski interpolatori, oscilatori, multiplexeri	Opća HBC namjena
[43]	BFSK	4,45 MHz	Nije primjenjivo (nije klasični HBC sustav)	Prijenos audiosadržaja
[46]	PWM	250 kHz	Mikroupravljački sklop	Nadzor bioloških signala
[44]	OOK/BPSK	40 MHz/160 MHz (ET) 13,56 MHz (HC)	Oscilator, sintetizator frekvencija, PFD, komparator, operacijska pojačala, upravljački sklop	Zdravstvene svrhe, zabavni sadržaj
[45]	QPSK/BPSK	42 MHz (ET) 21 MHz (Standardni)	Dva predajnika, sintetizator frekvencija, detektor frekvencije/faze	Zabavni sadržaj, nadzor bioloških signala
[48]	NRZ	Nije navedeno	Integrator, sklop za uzorkovanje, sklop za prilagodbu faktora ispunje	Prijenos fotografija
[49]	NRZ/PAM4/OOK	5 MHz	Programirajući digitalni A/D pretvarač	Opća HBC namjena
[68]	ISK-CC-HBC	21 MHz	Analogna sklopka, zavojnica	Opća HBC namjena
[51]	IIM-CC-HBC	21 MHz	Birač induktiviteta, zavojnice, oscilator	Opća HBC namjena

Uz sve je modulacijske postupke iz tablice 4.1, osim modulacijskih postupaka predloženih u sklopu ove disertacije, realizirano i sklopovsko rješenje. Stoga izravna usporedba s postojećim rješenjima nije u potpunosti moguća. No, ipak se može ukazati na prednosti koje imaju dva novopredložena modulacijska postupka, tj. prednosti koje će imati potencijalna buduća realizacija

*4. DISKRETNi MODULACIJSKI POSTUPAK ZASNOVAN NA PROMJENI  
IMPEDANCIJE*

---

sklopova koji će navedene modulacijske postupke koristiti.



## 5. ZAKLJUČAK

Komunikacija putem ljudskog tijela (HBC) aktualna je tema kojom se mnogi znanstvenici bave u sklopu svojih istraživanja. HBC se može podijeliti na tri skupine koje se razlikuju prema vrsti sprege koja se koristi. Te skupine su: galvanski, kapacitivni i magnetski HBC.

S obzirom na činjenicu da se HBC sustav nalazi na ljudskom tijelu, zahtjevi kao što su niska sklopovska složenost, smanjenje energetske potrošnje te male dimenzije visoko su na listi prioriteta. U svrhu smanjenja sklopovske složenosti, u ovoj su disertaciji predstavljena dva nova modulacijska postupka: IIM-CC-HBC i ISK-CC-HBC.

IIM-CC-HBC modulacijski postupak zasnovan je na uključivanju  $M = 2^b$  induktiviteta kojima se mijenja stanje komunikacijskog kanala između predajnika i prijemnika. Predajna strana sadrži  $M$  induktiviteta te njihov birač. Na prijemnoj se strani, između elektroda prijemnika, detektira fazna promjena napona uzrokovana promjenom induktiviteta na predajnoj strani. Za demodulaciju signala nužno je detektirati navedenu promjenu faze napona.

ISK-CC-HBC modulacijski postupak zasnovan je na mapiranju informacije pomoću promjene impedancije između signalne i referentne elektrode predajnika. Na navedenu impedanciju utječe induktivitet spojen između elektroda predajnika. Ovisno o tome šalje li se binarna „0“ ili „1“, analogna sklopka je otvorena, tj. zatvorena. Zatvorena sklopka, uklapanjem induktiviteta,

mijenja ukupnu impedanciju predajnika, a i cijelog sustava. Na prijemnoj se strani, na suotporu detektira fazna promjena napona uzrokovana promjenom impedancije. Detekcijom takve promjene može se izvršiti demodulacija signala.

Nakon predstavljanja matematičkog modela svakog od modulacijskih postupaka, određeni su izrazi za vjerojatnost pogreške pri detekciji bita. Pogrešaka u prijenosu informacija, uslijed šuma, uvijek će biti. No, postoje i parametri koji u većoj ili manjoj mjeri također mogu utjecati na kvalitetu komunikacije. U slučaju promatranog HBC-a analizirani su utjecaji sljedećih parametara na vjerojatnost pojave pogreške pri detekciji bita: udaljenost između predajnika i prijemnika, spol i konstitucija osobe, udaljenost sustava od tla, veličina elektroda i sučelje elektroda-koža.

Udaljenost između predajnika i prijemnika utječe na vjerojatnost pojave pogreške pri detekciji bita kod IIM-CC-HBC i ISK-CC-HBC sustava. Većina navedenog utjecaja uzrokovana je promjenom parametara  $C_c$  i  $C_{zrak}$  na koje utječe udaljenost između predajnika i prijemnika. Puno manji utjecaj na performanse oba sustava imaju parametri  $R_{tijelo}$  i  $C_{tijelo}$ . Parametri  $R_{tijelo}$  i  $C_{tijelo}$  ovise o spolu i konstituciji osobe. Analizom je utvrđeno kako puno veći utjecaj ima fizička udaljenost između predajnika i prijemnika nego osoba na kojoj se IIM-CC-HBC ili ISK-CC-HBC sustav nalazi. Utjecaj udaljenosti sustava od tla na performanse, kod IIM-CC-HBC sustava, ima značajnu ulogu ukoliko se pri svim udaljenostima koriste inicijalni induktiviteti umjesto optimalnih (tada utjecaja gotovo i nema). No, kod  $M = 2$ , nije važno koriste li se inicijalni ili optimalni induktiviteti. Kod ISK-CC-HBC sustava, utjecaj udaljenosti sustava od tla na performanse veći je ukoliko se ne koristi induktivitet optimalnog iznosa. Ukoliko se za sve analizirane udaljenosti od tla koristi in-

duktivitet optimalnog iznosa, utjecaj udaljenosti sustava od tla značajno je manji. Što se utjecaja veličine elektroda na sustave tiče, kod IIM-CC-HBC sustava veličina elektroda nema značajan utjecaj ako se odaberu optimalni induktiviteti, dok su kod ISK-CC-HBC, uz odabir optimalnih induktiviteta, bolje performanse pokazale veće elektrode.

Uz navedeno, ISK-CC-HBC i IIM-CC-HBC modulacijski postupci uspoređeni su s modulacijskim postupcima korištenima kod kapacitivnog HBC-a. ISK-CC-HBC ostvaruje nešto lošije performanse po pitanju vjerojatnosti pojave pogreške pri detekciji bita, ali mu je prednost mala sklopovska složenost. IIM-CC-HBC ima nešto složenije sklopovlje, ali i bolje performanse pa je kod  $M = 2$  gotovo identičan BPSK modulacijskom postupku po pitanju vjerojatnosti pojave pogreške pri detekciji bita. Za  $M = 2$  nadmašuje OOK te FSK modulacijske postupke.

## Literatura

- [1] T. G. Zimmerman. Personal Area Networks(PAN): Near-Field Intra-Body Communication. Master's thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [2] 802.15 WG Wireless Specialty Networks (WSN) Working Group. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - part 15.6: Wireless Body Area Networks. *IEEE Std 802.15.6-2012*, 2012.
- [3] J. F. Zhao, X. M. Chen, Liang B. D., and Chen Q. X. A Review on Human Body Communication: Signal Propagation Model, Communication Performance, and Experimental Issues. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017.
- [4] S. Maity, M. He, M. Nath, D. Das, B. Chatterjee, and S. Sen. Bio-Physical Modeling, Characterization, and Optimization of Electro-Quasistatic Human Body Communication. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 66(6):1791–1802, 2019.
- [5] M. Seyedi, B. Kibret, D. T. H. Lai, and M. Faulkner. A Survey on Intrabody Communications for Body Area Network Applications. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60(8):2067–2079, 2013.
- [6] M. A. Callejón, D. Naranjo-Hernández, J. Reina-Tosina, and L. M. Roa. A Comprehensive Study Into Intrabody Communication Measurements.

- IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 62(9):2446–2455, 2013.
- [7] J. Park and P. P. Mercier. Magnetic human body communication. In *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pages 1841–1844, 2015.
- [8] M. A. Callejón, J. Reina-Tosina, D. Naranjo-Hernández, and L. M. Roa. Galvanic Coupling Transmission in Intrabody Communication: A Finite Element Approach. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 61(3):775–783, 2014.
- [9] D. Naranjo-Hernandez, A. Callejon-Leblic, Ž. Lučev-Vasić, M. H. Seyedi, and Y. M. Gao. Past Results, Present Trends, and Future Challenges in Intrabody Communication. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018(2), 2018.
- [10] J. Mao. Investigating on the Interferences on Human Body Communication System Induced by Other Wearable Devices. In *2019 41st Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pages 4044–4047, 2019.
- [11] R. A. B. Mefteh, R. Vauche, N. Dehaese, J. Gaubert, and H. Barthelemy. Design of a Battery-powered Emitter dedicated to the Characterization of Human Body Communications. In *2020 15th Design & Technology of Integrated Systems in Nanoscale Era (DTIS)*, pages 1–5, 2020.
- [12] W. Wang, Z. Nie, F. Guan, T. Leng, and L. Wang. Experimental Studies on Human Body Communication Characteristics Based Upon Capacitive

- Coupling. In *2011 International Conference on Body Sensor Networks*, 2011.
- [13] J.-H. Hwang, T.-W. Kang, Y.-T. Kim, and S.-O. Park. Measurement of Transmission Properties of HBC Channel and Its Impulse Response Model. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(1):177–188, 2016.
- [14] J. Bae, H. Cho, K. Song, H. Lee, and H.-J. Yoo. The Signal Transmission Mechanism on the Surface of Human Body for Body Channel Communication. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(3):582–593, 2012.
- [15] J. Bae and H.-J. Yoo. The Effects of Electrode Configuration on Body Channel Communication Based on Analysis of Vertical and Horizontal Electric Dipoles. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 63(4):1409–1420, 2015.
- [16] C. Tang, Y. Song, Y. Chen, Y. Zhou, X. Zhang, and Y. Ma. Dynamic Channel Modeling and Characteristic Analysis of Wearable Human Body Communication System. In *2023 4th Information Communication Technologies Conference (ICTC)*, 2023.
- [17] R. Xu, H. Zhu, and J. Yuan. Circuit-coupled fem analysis of the electric-field type intra-body communication channel. In *2009 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference*, 2009.
- [18] R. Xu, H. Zhu, and J. Yuan. Electric-Field Intrabody Communication Channel Modeling With Finite-Element Method. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 58(3):705 – 712, 2011.

- [19] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel. The dielectric properties of biological tissues: Iii. parametric models for the dielectric spectrum of tissues. *Physics in Medicine and Biology*, 41(11):2271–2293, 1996.
- [20] R. Xu, W. C. Ng, H. Zhu, H. Shan, and J. Yuan. Equation Environment Coupling and Interference on the Electric-Field Intrabody Communication Channel. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59(7):2051–2059, 2012.
- [21] J. Mao, H. Yang, and B. Zhao. An Investigation on Ground Electrodes of Capacitive Coupling Human Body Communication. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 11(4):910 – 919, 2017.
- [22] N. Cho, J. Yoo, S.-J. Song, J. Lee, S. Jeon, and H.-J. Yoo. The Human Body Characteristics as a Signal Transmission Medium for Intrabody Communication. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55(5):1080–1086, 2007.
- [23] J. Mao, H. Yang, Y. Lian, and B. Zhao. A Five-Tissue-Layer Human Body Communication Circuit Model Tunable to Individual Characteristics. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 12(2):303–312, 2018.
- [24] M. D. Pereira, G. A. Alvarez-Botero, and F. R. Sousa. Characterization and Modeling of the Capacitive HBC Channel. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(10):2626–2635, 2015.
- [25] M. A. Callejon, L. M. Roa, J. Reina-Tosina, and D. Naranjo-Hernandez. Study of Attenuation and Dispersion Through the Skin in Intrabody

- Communications Systems. *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, 16(1):159–165, 2012.
- [26] Y.-T. Lin, Y.-S. Lin, C.-H. Chen, H.-C. Chen, Y.-C. Yang, and S.-S. Lu. A 0.5-V Biomedical System-on-a-Chip for Intrabody Communication System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(2):690–699, 2011.
- [27] J. A. Ruiz and S. Shimamoto. Experimental evaluation of body channel response and digital modulation schemes for intra-body communications. In *2006 IEEE International Conference on Communications*, volume 1, pages 349–354, 2006.
- [28] M. A. Callejón, D. Naranjo-Hernandez, J. Reina-Tosina, and L. M. Roa. Distributed Circuit Modeling of Galvanic and Capacitive Coupling for Intrabody Communication. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59(11):3263–3269, 2012.
- [29] J. Park, H. Garudadri, and P. P. Mercier. Channel Modeling of Miniaturized Battery-Powered Capacitive Human Body Communication Systems. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 64(2):452–462, 2017.
- [30] A. E. Khorshid, I. N. Alquaydheb, A. M. Eltawil, and F. J. Kurdahi. Physical Multi-Layer Phantoms for Intra-Body Communications. *IEEE Access*, 6:42812–42821, 2018.
- [31] A. E. Khorshid, I. N. Alquaydheb, A. M. Eltawil, and F. J. Kurdahi. IB-CFAP: Intra-Body Communications Five-Layers Arm Phantom Model. *IEEE Access*, 7:93701–93710, 2019.



- [32] M. W. Groch, J. A. Urbon, W. D. Erwin, and S. al Doohan. An MRI tissue equivalent lesion phantom using a novel polysaccharide material. *Magnetic resonance imaging*, 9(3):417–421, 1991.
- [33] <https://www.technologyuk.net/telecommunications/telecom-principles/digital-modulation-part-one.shtml>, pristup: 1.3.2024.
- [34] J. Zhao, J. Mao, W. Sun, Y. Huang, Y. Yang, H. Yang, and Y. Liu. A 4-Mbps 41-pJ/bit On-off Keying Transceiver for Body-channel Communication with Enhanced Auto Loss Compensation Technique. In *2019 IEEE Asian Solid-State Circuits Conference (A-SSCC)*, pages 173–176, 2019.
- [35] S. Maity, N. Modak, D. Yang, S. Avlani, M. Nath, J. Danial, D. Das, P. Mehrotra, and S. Sen. A 415 nW Physically and Mathematically Secure Electro-Quasistatic HBC Node in 65nm CMOS for Authentication and Medical Applications. In *2020 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, pages 1–4, 2020.
- [36] W. Zhu, T. Zhou, Y. Zhou, M. Li, Y. Chen, Y. Zhao, and Y. Song. An audio transmission system based on capacitive coupling intra-body communication. In *2021 International Conference on Communications, Information System and Computer Engineering (CISCE)*, pages 183–187, 2021.
- [37] N. Modak, D. Das, M. Nath, B. Chatterjee, K. K. Gaurav, S. Maity, and S. Sen. EQS Res-HBC: A 65-nm Electro-Quasistatic Resonant 5–240  $\mu$ W Human Whole-Body Powering and 2.19  $\mu$ W Communication SoC With Automatic Maximum Resonant Power Tracking. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 57(3):831–844, 2022.

- [38] Huang Q., Alkhayer W., Fouda, M. E., Celik A., and Eltawil A. M. Wearable Vital Signal Monitoring Prototype Based on Capacitive Body Channel Communication. In *2022 IEEE-EMBS International Conference on Wearable and Implantable Body Sensor Networks (BSN)*, 2022.
- [39] K. Partridge, B. Dahlquist, A. Veiseh, A. Cain, A. Foreman, J. Goldberg, and G. Borriello. Empirical Measurements of Intrabody Communication Performance under Varied Physical Configurations. In *Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '01, page 183–190, New York, NY, USA, 2001. Association for Computing Machinery.
- [40] K. Hachisuka, A. Nakata, T. Takeda, Y. Terauchi, K. Shiba, K. Sasaki, H. Hosaka, and K. Itao. Development and performance analysis of an intra-body communication device. In *TRANSDUCERS '03. 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Digest of Technical Papers (Cat. No.03TH8664)*, volume 2, pages 1722–1725 vol.2, 2003.
- [41] L. Yile, G. W. Ling, and V. V. Kulkarni. A 29pJ/bit FSK transmitter for WBAN applications. In *2015 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC)*, pages 182–185, 2015.
- [42] H.-Y. Shih, Y.-C. Chang, C.-W. Yang, and C.-C. Chen. A Low-Power and Small Chip-Area Multi-Rate Human Body Communication DPFASK Transceiver for Wearable Devices. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(7):1234–1238, 2020.
- [43] R. Cobden, M. Zeeshan, D. Roggen, R. J. Prance, and A. Pouryazdan. Characterisation of Wearable Electric-Field Communication Link

- for BAN Multimedia Applications. In *2023 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom)*, pages 262–269, 2023.
- [44] H. Cho, H. Kim, M. Kim, J. Jang, Y. Lee, K. J. Lee, J. Bae, and H.-J. Yoo. A 79 pJ/b 80 Mb/s Full-Duplex Transceiver and a 42.5  $\mu$ W 100 kb/s Super-Regenerative Transceiver for Body Channel Communication. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 51(1):310–317, 2016.
- [45] J. Jang, H. Cho, and H.-J. Yoo. An 802.15.6 HBC Standard Compatible Transceiver and 90 pJ/b Full-Duplex Transceiver for Body Channel Communication. In *2019 IEEE Biomedical Circuits and Systems Conference (BioCAS)*, pages 1–4, 2019.
- [46] F. Wolling, P. M. Scholl, L. M. Reindl, and K. Van Laerhoven. Combining Capacitive Coupling with Conductive Clothes: Towards Resource-Efficient Wearable Communication. In *Proceedings of the 2017 ACM International Symposium on Wearable Computers, ISWC '17*, page 146–149, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.
- [47] <https://electronicspost.com/generation-and-detection-of-a-pwm-signal/>, pristup: 1.3.2024.
- [48] S. Maity, B. Chatterjee, G. Chang, and S. Sen. BodyWire: A 6.3-pJ/b 30-Mb/s -30-dB SIR-Tolerant Broadband Interference-Robust Human Body Communication Transceiver Using Time Domain Interference Rejection. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 54(10):2892–2906, 2019.

- [49] T. He, J. Luo, Z. Kong, X. Liang, L. Lin, B. Zhao, L. Qi, Y. Li, G. Wang, and J. Zhao. A Re-Configurable Body Channel Transceiver Towards Wearable and Flexible Biomedical Sensor Networks. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 17(5):1022–1034, 2023.
- [50] <https://www.technologyuk.net/telecommunications/telecom-principles/line-coding-techniques.shtml>, pristup: 1.3.2024.
- [51] M. Herceg, L. Filipović, T. Matić, and G. Kaddoum. Inductance Index Modulation for Human Body Communication Systems. *IEEE Wireless Communications Letters*, 8(3):937–940, 2019.
- [52] Ertugrul Basar. Index modulation techniques for 5g wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, 54(7):168–175, 2016.
- [53] M. C. Gursoy, E. Basar, A. E. Pusane, and T. Tugcu. Index Modulation for Molecular Communication via Diffusion Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 67(5):3337–3350, 2019.
- [54] E. Başar, Ü. Aygözü, E. Panayırıcı, and H. V. Poor. Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 61(22):5536–5549, 2013.
- [55] G. Kaddoum, M. F. A. Ahmed, and Y. Nijssure. Code Index Modulation: A High Data Rate and Energy Efficient Communication System. *IEEE Communications Letters*, 19(2):175–178, 2015.
- [56] M. Herceg, G. Kaddoum, D. Vranješ, and E. Soujeri. Permutation Index DCSK Modulation Technique for Secure Multiuser High-Data-Rate Communication Systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(4):2997–3011, 2018.

- [57] R. Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun. Spatial Modulation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 57(4):2228–2241, 2008.
- [58] J. Jeganathan, A. Ghrayeb, L. Szczecinski, and A. Ceron. Space shift keying modulation for MIMO channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 8(7):3692–3703, 2009.
- [59] K. Zhang, Q. Hao, Y. Song, J. Wang, R. Huang, and Y. Liu. Modeling and Characterization of the Implant Intra-Body Communication Based on Capacitive Coupling Using a Transfer Function Method. *Sensors(Basel)*, 14(1):1740–1756, 2014.
- [60] S. Huclova, D. Erni, and J. Fröhlich. Modelling and validation of dielectric properties of human skin in the MHz region focusing on skin layer morphology and material composition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45(2), 2012.
- [61] G. S. Anderson and C. G. Sodini. Body coupled communication: The channel and implantable sensors. In *2013 IEEE International Conference on Body Sensor Networks*, 2013.
- [62] M. Swaminathan, F. S. Cabrera, J. S. Pujol, U. Muncuk, G. Schirner, and K. R. Chowdhury. Multi-Path Model and Sensitivity Analysis for Galvanic Coupled Intra-Body Communication Through Layered Tissue. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, 10(2):339–351, 2016.
- [63] J. G. Proakis and M. Salehi. *Digital Communications*. McGraw-Hill, New York, SAD, 2008.

- [64] A. Ananth and M. D. Selvaraj. Error Analysis of SSK With Euclidean Distance Based Selection Combining. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 67(4):3195–3204, 2018.
- [65] R. J. Maughan, J. S. Watson, and J. Weir. The relative proportions of fat, muscle and bone in the normal human forearm as determined by computed tomography. *Clinical Science*, 66(6):683–689, 1984.
- [66] W. Groenendaal, G. von Basum, K. A. Schmidt, P. A. J. Hilbers, and N. A. W. van Riel. Quantifying the Composition of Human Skin for Glucose Sensor Development. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 4(5):1032–1040, 2010.
- [67] F. Lu, C. Wang, R. Zhao, L. Du, Z. Fang, X. Guo, and Z. Zhao. Review of Stratum Corneum Impedance Measurement in Non-Invasive Penetration Application. *Biosensors (Basel)*, 8:2(31), 2018.
- [68] L. Filipović, M. Herceg, J. Vlaović, and E. Basar. Energy-Efficient Data Transmission for Capacitive-Coupled Human Body Communication Systems. *IEEE Sensors Letters*, 5(12), 2021.

## Popis slika

2.1. Prvi HBC sustav [1] . . . . .	4
2.2. HBC vrste: a)galvanski, b)kapacitivni, c) magnetski [7] . . . . .	5
2.3. Model ljudske ruke prema radu [17] . . . . .	12
2.4. Model ljudskog tijela korišten u radovima [18] i [20]. Presjek modela ruke (dolje lijevo), pogled modela tijela sprijeda (sredina), pogled modela tijela sa strane (desno) . . . . .	13
2.5. Model ljudskog tijela prema radu [22]: (a) model prikazan valjcima s pripadajućim kapacitivnim spregama, (b) konačni model prikazan $RC$ članovima . . . . .	15
2.6. Model ljudskog tijela prema radu [23] . . . . .	16
2.7. Model ljudskog tijela prema radu [24] . . . . .	17
2.8. Model ljudske kože prema radu [25] . . . . .	18
2.9. Model ljudske kože prema radu [28] . . . . .	19
2.10. Hibridni model ljudskog tijela prema radu [29] . . . . .	20
2.11. Fantom modeli: (a) Različite smjese korištene za model prema radu [30]: 1-smjesa s udjelom prve i druge recepture 60%/40%, 2-smjesa s udjelom prve i druge recepture 20%/80%, 3-sučelje između dvije smjese, (b) Model predstavljen u radu [31] u procesu testiranja . . . . .	22
2.12. OOK modulacijski postupak [33] . . . . .	24

2.13. FSK modulacijski postupak [33] . . . . .	26
2.14. BPSK modulacijski postupak [33] . . . . .	28
2.15. PWM modulacijski postupak [47] . . . . .	30
2.16. NRZ linijsko kodiranje [50] . . . . .	30
3.1. IIM-CC-HBC komunikacijski sustav . . . . .	32
3.2. Relativna permitivnost i vodljivost tkiva u ovisnosti o frekvenciji [9] . . . . .	36
3.3. Područja odluke kod binarnih signala jednake vjerojatnosti [63] . . . . .	48
3.4. Gaussova PDF i prikaz Q funkcije . . . . .	50
3.5. IIM-CC-HBC konstelacijski dijagram s inicijalnim parametrima	54
3.6. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC s inicijalnim parametrima . . . . .	55
3.7. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC pri $D_{TR} = 0,2$ [m] . . . . .	57
3.8. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC pri $D_{TR} = 0,3$ [m] . . . . .	58
3.9. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC uz $R_{tijelo} = 471,57$ [ $\Omega$ ] . . . . .	59
3.10. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC uz $C_{tijelo} = 18,78$ [pF] . . . . .	60
3.11. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC uz $C_c = 9,61$ [pF] i fiksiranu vrijednost parametra $D_{GND}$ . . . . .	61
3.12. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC uz $C_{zrak} = 71,15$ [fF] . . . . .	62



3.13. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC ( $M = 8$ ) za različite vrijednosti $\varepsilon_r$ i $\sigma$ . . . . .	64
3.14. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC ( $M = 8$ ) za različite osobe . . . . .	65
3.15. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC ( $M = 8$ ) za različite osobe uz inicijalne iznose induktiviteta . . . . .	66
3.16. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC pri $D_{\text{GND}} = 0,6$ [m] . . . . .	67
3.17. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC pri $D_{\text{GND}} = 1,2$ [m] . . . . .	68
3.18. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC pri $D_{\text{GND}} = 1,8$ [m] . . . . .	68
3.19. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod IIM-CC-HBC za veličinu elektroda $2 \times 2$ [cm] . . . . .	70
3.20. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod različitih modulacijskih postupaka u usporedbi s IIM-CC-HBC . . . . .	72
4.1. ISK-CC-HBC komunikacijski sustav . . . . .	74
4.2. Ovisnost Euklidove udaljenosti o induktivitetu $L$ . . . . .	79
4.3. ISK-CC-HBC konstelacijski dijagram s inicijalnim parametrima	80
4.4. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC s inicijalnim parametrima . . . . .	80
4.5. Ovisnost optimalnog induktiviteta $L$ o udaljenosti $D_{\text{TR}}$ . . . . .	81
4.6. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC za različite vrijednosti $D_{\text{TR}}$ . . . . .	82

4.7. Ovisnost optimalnog induktiviteta $L$ o vrijednostima parametara $R_{\text{tijelo}}$ i $C_{\text{tijelo}}$ . . . . .	83
4.8. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz $R_{\text{tijelo}} = 471,57 [\Omega]$ . . . . .	84
4.9. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz $C_{\text{tijelo}} = 18,78 [\text{pF}]$ . . . . .	84
4.10. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz $C_c = 9,61 [\text{pF}]$ . . . . .	86
4.11. Ovisnost optimalnog induktiviteta $L$ o kapacitetu $C_{\text{zrak}}$ . . . . .	86
4.12. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz $C_{\text{zrak}} = 71,15 [\text{fF}]$ . . . . .	87
4.13. Ovisnost optimalnog induktiviteta $L$ o udaljenosti $D_{\text{TR}}$ . . . . .	88
4.14. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC za različite vrijednosti $\varepsilon_{\text{rt}}$ i $\sigma_{\text{t}}$ . . . . .	89
4.15. Ovisnost Euklidove udaljenosti o induktivitetu $L$ za različite osobe . . . . .	90
4.16. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC za različite osobe . . . . .	91
4.17. Ovisnost optimalnog induktiviteta $L$ o udaljenosti $D_{\text{GND}}$ . . . . .	92
4.18. Ovisnost optimalnog induktiviteta $L$ o vrijednostima parametara $C_{\text{pov}}$ i $C_c$ uz fiksiranu vrijednost parametra $D_{\text{TR}}$ . . . . .	93
4.19. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz $C_{\text{pov}} = 1,49 [\text{pF}]$ i $C_{\text{pov}} = 1,43 [\text{pF}]$ . . . . .	94
4.20. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC uz $C_c = 5,67 [\text{pF}]$ i $C_c = 5,36 [\text{pF}]$ . . . . .	94

4.21. Ovisnost Euklidove udaljenosti o induktivitetu $L$ za različite udaljenosti $D_{\text{GND}}$ . . . . .	95
4.22. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod ISK-CC-HBC za različite vrijednosti parametra $D_{\text{GND}}$ . . . . .	96
4.23. Vjerojatnost pogreške pri detekciji bita (BER) kod ISK-CC-HBC za različite veličine elektroda . . . . .	97
4.24. Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (BER) kod različitih modulacijskih postupaka u usporedbi s ISK-CC-HBC . . . . .	98

# Popis tablica

2.1. CC-HBC modeli . . . . .	23
3.1. CC-HBC inicijalni parametri korišteni za simulacije . . . . .	53
3.2. Induktiviteti s pripadajućim točkama konstelacijskog dijagrama kod IIM-CC-HBC za $M=8$ . . . . .	54
3.3. Udio tkiva prema spolu i pripadajuća relativna permitivnost $\epsilon_{rt}$ i vodljivost tkiva $\sigma_t$ pri frekvenciji 21 MHz . . . . .	63
3.4. Prosječna vrijednosti relativne permitivnosti $\epsilon_{rt}$ i vodljivosti $\sigma_t$ prema spolu (M - muškarci, Ž - žene) pri frekvenciji 21 MHz	63
3.5. Osobe odabrane za testiranje novih modulacijskih postupaka	65
4.1. CC-HBC modulacijski postupci . . . . .	99

## Popis kratica

- **8 - PSK** - Modulacije faze s 8 diskretnih stanja
- **16 - PSK** - Modulacije faze sa 16 diskretnih stanja
- **32 - PSK** - Modulacije faze s 32 diskretna stanja
- **A/D** - Analogno digitalni (engl. *Analog to Digital*)
- **AWGN** - Aditivni bijeli Gaussov šum (engl. *Additive White Gaussian Noise*)
- **BAN** - Komunikacijska mreža na ljudskom tijelu (engl. *Body Area Network*)
- **BEP** - Vjerojatnost pogreške kod prijenosa jednog bita (engl. *Bit Error Probability*)
- **BER** - Učestalost pogreške prilikom detekcije bita (engl. *Bit Error Rate*)
- **BFSK** - Binarna diskretna modulacija frekvencije (engl. *Binary Frequency Shift Keying*)
- **BPSK** - Binarna diskretna modulacija faze (engl. *Biphase Shift Keying*)
- **DDS** - Direktni digitalni sintetizator (engl. *Direct Digital Synthesizer*)

- **CC-HBC** - Kapacitivno spregnuta komunikacija putem ljudskog tijela (engl. *Human Body Communication*)
- **DPFSK** - Diskretna modulacija frekvencije s faznim diskontinuitetima (engl. *Discontinuous-Phase Frequency Shift Keying*)
- **EC** - Električni krug (engl. *Electric circuit*)
- **EM** - Elektromagnetski (engl. *Electromagnetic*)
- **ET** - Zabavni sadržaj (engl. *Entertainment*)
- **FEM** - Metoda konačnog broja elemenata (engl. *Finite Element Method*)
- **FPGA** - Nizovi polja programirljivih vrata (engl. *Field Programmable Gate Array*)
- **FSK** - Diskretna modulacija frekvencije (engl. *Frequency Shift Keying*)
- **HBC** - Komunikacija putem ljudskog tijela (engl. *Human Body Communication*)
- **HC** - Zdravstvena skrb (engl. *Healthcare*)
- **IIM** - Diskretni modulacijski postupak zasnovan na promjeni indeksa induktiviteta (engl. *Human Body Communication*)
- **IM** - Indeksna modulacija (engl. *Index Modulation*)
- **ISK** - Diskretni modulacijski postupak zasnovan na promjeni impedancije (engl. *Human Body Communication*)
- **MIMO** - Višestruki ulaz-višestruki izlaz (engl. *Multiple-Input-Multiple-Output*)

- **ML** - Najveća sličnost (engl. *Maximum Likelihood*)
- **NRZ** - Linijsko binarno kodiranje bez međustanja (engl. *Non-return-to-zero*)
- **OOK** - Diskretna modulacija amplitude s dva diskretna stanja (engl. *On-Off Keying*)
- **PAM4** - Pulsno amplitudni modulacijski postupak razine 4 (engl. *Pulse Amplitude Modulation 4-level*)
- **PDF** - Funkcija gustoće vjerojatnosti (engl. *Probability Density Function*)
- **PEP** - Vjerojatnost pogreške između parova signala (engl. *Pairwise Error Probability*)
- **PFD** - Detektor faze/frekvencije (engl. *Phase/Frequency Detector*)
- **PSK** - Diskretna modulacija faze (engl. *Phase Shift Keying*)
- **PWM** - Pulsno-širinski modulacijski postupak (engl. *Pulse Width Modulation*)
- **QPSK** - Kvadratura diskretna modulacija faze (engl. *Quadrature Phase Shift Keying*)
- **SER** - Učestalost pogreške prilikom detekcije simbola (engl. *Symbol Error Rate*)
- **SSK** - Diskretna prostorna modulacija (engl. *Space Shift Keying*)
- **VNA** - Vektorski mrežni analizator (engl. *Vector Network Analyzer*)

- **WBAN** - Bežična komunikacijska mreža na ljudskom tijelu (engl. *Wireless Body Area Network*)
- **WHO** - Svjetska zdravstvena organizacija (engl. *World Health Organization*)



## Sažetak

Rastući broj kroničnih oboljenja te potreba za stalnim nadzorom bioloških parametara kao i povećanje kvalitete življenja doveli su do razvoja novih tehnologija za navedene namjene. Tehnologija koja je primjenjiva u navedenim uvjetima je komunikacijska mreža na ljudskom tijelu (engl. *Body Area Network*, BAN). Podskup unutar BAN tehnologije je i komunikacija putem ljudskog tijela (engl. *Human Body Communication*, HBC). U ovom su radu predstavljena dva nova modulacijska postupka za kapacitivno spregnuti HBC. Prvi od njih je diskretni modulacijski postupak zasnovan na promjeni indeksa induktiviteta za kapacitivno spregnutu komunikaciju putem ljudskog tijela (engl. *Inductance Index Modulation CC-HBC*, IIM-CC-HBC), a drugi je diskretni modulacijski postupak zasnovan na promjeni impedancije (engl. *Impedance Shift Keying CC-HBC*, ISK-CC-HBC). S obzirom na činjenicu kako kod HBC sustava postoje parametri koji mogu biti promjenjivi (udaljenost između predajnika i prijemnika, promjena osobe koja koristi HBC sustav, udaljenost sustava od tla, promjena korištenih elektroda), analiziran je utjecaj navedenih parametara na svaki od sustava. Na kraju je predstavljena usporedba novopredloženih s postojećim modulacijskim postupcima kod HBC-a.

**Ključne riječi:** komunikacija putem ljudskog tijela, IIM-CC-HBC, ISK-CC-HBC, učestalost pogreške prilikom detekcije bita

## Abstract

The growing number of chronic diseases and the need for constant monitoring of biological parameters as well as the increase in the quality of life have led to the development of new technologies for the above-mentioned purposes. The technology that can be used under these conditions is called Body Area Network i.e. BAN. One part of BAN technology is the human body communication i.e. HBC. In this paper, two new modulation methods for capacitively coupled HBC are presented. The first of them is Inductance Index Modulation i.e. IIM-CC-HBC. The second system is Impedance Shift Keying i.e. ISK-CC-HBC. Considering that the HBC system has parameters that can be changed (distance between transmitter and receiver, change of the person using the HBC system, distance of the system from the ground, change of the electrodes used), the influence of the mentioned parameters on each of the systems has been analyzed. At the end, a comparison of the newly proposed and existing modulation methods in HBC is presented.

**Keywords:** human body communication, IIM-CC-HBC, ISK-CC-HBC, bit error rate

# Biografija

Luka Filipović rođen je 29. studenoga 1990. godine u Osijeku. Nakon završetka osnovnoškolskog obrazovanja upisuje se u Elektrotehničku i prometnu školu Osijek gdje stječe zanimanje elektrotehničar. Nakon završetka srednjoškolskog obrazovanja 2009. godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. 2012. godine, nakon završetka preddiplomskog studija, upisuje diplomski studij elektrotehnike-smjer Komunikacije i informatika, koji završava 2015. godine. Od 2018. godine asistent je na Zavodu za komunikacije Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, a iste godine upisuje poslijediplomski sveučilišni studij elektrotehnike. Kao asistent održava nastavu iz kolegija Elektronika 1, Osnove elektronike, Osnove elektrotehnike i elektronike te nastavu iz kolegija Napredno programiranje. Suautor je sedam znanstvenih publikacija te jednog priručnika za laboratorijske vježbe.