



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**



Jovana Mrkić

**Indeks modulacija za poboljšanje performansi
bežičnih komunikacionih sistema sa višestrukim
nosiocima**

- magistarski rad -

Podgorica, 2021.



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**



Jovana Mrkić

**Indeks modulacija za poboljšanje performansi
bežičnih komunikacionih sistema sa višestrukim
nosiocima**

- magistarski rad -

Podgorica, 2021.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Jovana Mrkić

Datum i mjesto rođenja: 03.03.1994. Nikšić, Crna Gora

Prethodno završene studije:

Osnovne studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore,
smjer: Elektronika, telekomunikacije i računari, 180 ECTS kredita, 2015.godine
Specijalističke studije: Elektrotehnički fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore,
smjer: Telekomunikacije, 60 ECTS kredita, 2016.godine

INFORMACIJE O MAGISTARSKOM RADU

Elektrotehnički fakultet

Studijski program: Elektronika, telekomunikacije i računari - Telekomunikacije

Naslov rada: **Indeks modulacija za poboljšanje performansi bežičnih komunikacionih sistema sa višestrukim nosiocima**

UDK, OCJENA I ODBRANA MAGISTARSKOG RADA

Datum prijave magistarskog rada: 25.12.2018.

Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema: 28.05.2019. god.

Komisija za ocjenu teme i podobnosti magistranda:

1. Prof. dr Zoran Veljović
2. Doc. dr Enis Kočan
3. Prof. dr Milutin Radonjić

Mentor: Doc. dr Enis Kočan

Komisija za ocjenu rada:

1. Prof. dr Zoran Veljović
2. Doc. dr Enis Kočan
3. Prof. dr Milutin Radonjić

Komisija za odbranu rada:

1. Prof. dr Zoran Veljović
2. Doc. dr Enis Kočan
3. Prof. dr Milutin Radonjić

Datum odbrane: 19.11.2021.

Datum promocije:

Sadržaj

Sažetak	1
Abstract	2
1 Uvod.....	3
2 OFDM indeks modulacija.....	8
2.1 SIM OFDM.....	8
2.2 ESIM OFDM	14
2.3 OFDM-IM.....	17
2.3.1 Model sistema	17
2.3.2 Analiza rezultata	23
3 OFDM-IM relejni sistem	29
3.1 Predloženi model sistema	30
3.2 Analiza rezultata	33
4 Hibridni OFDM-IM sistem.....	38
4.1 Predloženi model sistema	39
4.2 Generalizovani OFDM-IM	41
4.3 Analiza rezultata	45
5 Hibridni OFDM-IM relejni sistem.....	48
5.1 Predloženi model sistema	49
5.2 Interliving grupisanje podnosilaca.....	53
5.3 Analiza rezultata	54
6 OFDM-IM: izazovi, otvorena pitanja i potencijalne primjene	56
7 Zaključak.....	60
Literatura.....	62
Lista skraćenica.....	66

Sažetak

Istraživačka zajednica i dalje pokazuje veliko interesovanje za unapređenje performansi modulacije zasnovane na ortogonalnom frekvencijskom multipleksiranju (OFDM), kako bi ona mogla zadovoljiti izazovne zahtjeve budućih bežičnih komunikacionih sistema. OFDM sa indeks modulacijom (OFDM-IM) je skorije predložena modulaciona tehnika, nastala kao proširenje originalnog principa prostorne modulacije (SM – *Spatial Modulation*). Osnovna ideja OFDM-IM šeme podrazumijeva slanje informacija do prijemnika ne samo putem standardnih M -arnih simbola, već i preko indeksa aktivnih OFDM podnosilaca, koji su odabrani za prenos tih konstelacionih simbola. Zahvaljujući dijelu podnosilaca koji ostaje neaktivan tokom prenosa, uvećana je energetska efikasnost sistema, ali potencijalno i spektralna, na račun dodatnih bita koji se emituju kroz princip indeksiranja, a sve bez korišćenja novih resursa. Pomenute prednosti čine indeks modulirani OFDM perspektivnim rješenjem za mobilne celularne mreže sljedeće generacije. U ovom istraživanju su ispitane performanse OFDM-IM sistema, sa stanovišta vjerovatnoće greške po bitu (BER – *Bit Error Rate*), kao i performanse relejnog OFDM „dekodiraj-i-prosljedi“ sistema sa primijenjenim IM i SM, u slučaju kanala sa frekvencijski selektivnim fadingom, uz pretpostavku Rayleigh-eve i Rice-ove statistike fadinga. Pokazalo se da su poboljšanja energetske i eventualno spektralne efikasnosti OFDM-IM sistema, postignuta po cijenu degradiranja BER performansi pri manjim vrijednostima odnosa signal-šum (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*), u poređenju sa klasičnim OFDM-om. Zarad minimizacije BER-a, predložen je model hibridnog OFDM-IM sistema, koji podrazumijeva implementaciju OFDM-IM modulacije pri visokim SNR vrijednostima, a klasične OFDM pri nižim SNR vrijednostima, a sve na osnovu poznatih karakteristika kanala. Uporedo je analiziran i hibridni sistem, koji prelazak sa jedne, na drugu modulacionu tehniku, vrši u zavisnosti od ulazne sekvence bita, sa ciljem dodatnog poboljšanja spektralne efikasnosti.

Ključne riječi: OFDM, indeks modulacija, BER, SNR, hibridni sistem

Abstract

Research community is still showing strong interest in performance improvement of OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) modulation, in order to enable it to satisfy challenging demands of future wireless communication systems. OFDM with Index Modulation (OFDM-IM) is a recently proposed technique, which emerged as an extension of Spatial Modulation (SM) principle. Main idea of OFDM-IM scheme assumes that information is conveyed to receiver not only through standard M -ary symbols, but also by means of indexes of active OFDM subcarriers, which are selected for transmission of M -ary constellation symbols. According to the fact that part of the system subcarriers remain inactive during transmission, energy efficiency is improved, and potentially spectral efficiency too, due to additional bits being transmitted by indexing principle, and without employing any new resources. Those mentioned benefits make index modulated OFDM a promising solution for next generation mobile cellular networks. In this research work, bit error rate (BER) performances of OFDM-IM system, as well as of the OFDM decode-and-forward relay system with IM and SM, are examined, in case of frequency selective fading channels, assuming both Rayleigh and Rice fading statistics. It has been shown that performance improvements of OFDM-IM system, in terms of energy efficiency and possibly spectral efficiency, are achieved at the cost of BER performance degradation at lower signal-to-noise ratio (SNR) values, when compared to classical OFDM. For BER minimization, hybrid OFDM-IM system model is proposed, which assumes implementation of OFDM-IM modulation at high SNR values, and classical OFDM modulation at lower SNR values, with switching based on the known channel characteristics. Comparatively, there has been conducted analysis of another hybrid system, with switching between those two modulation techniques based on incoming bit sequence, for further spectral efficiency enhancement.

Keywords: OFDM, index modulation, BER, SNR, hybrid system

1. Uvod

U savremenim širokopojasnim bežičnim komunikacionim sistemima, koji ispunjavaju zahtjeve različitih tipova komunikacionih servisa, gotovo nezaobilazno rješenje na fizičkom nivou predstavlja tehnika ortogonalnog frekvencijskog multipleksiranja (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), ili neka modifikacija ove tehnike prenosa. OFDM podrazumijeva prenos podataka preko više frekvencijskih podnosilaca, koji su međusobno ortogonalni. U okviru ovog sistema, ulazni tok bita (simbola) se dijeli na više paralelnih tokova, čime se povećava trajanje signalizacionog intervala, a svaki bit (simbol) se zatim mapira za prenos na odgovarajući podnosilac. Međusobni odnos učestanosti podnosilaca je definisan samim trajanjem signalizacionog intervala, čime se postiže njihova ortogonalnost, koja dozvoljava preklapanje susjednih podnosilaca u domenu učestanosti, na način da se ne javlja interferencija među podnosiocima (ICI – *Intercarrier Interference*). Zahvaljujući ortogonalnosti podnosilaca, koja se u praksi realizuje korišćenjem inverzne brze Furijeove transformacije (IFFT – *Inverse Fast Fourier Transform*) na strani predajnika, ostvaruje se značajna ušteda u spektru [1]. Osim što obezbjeđuje visoku spektralnu efikasnost, ova modulacija ima osobinu da uspješno umanjuje degradirajuće efekte *multipath* propagacije. Naime, OFDM pokazuje veliku otpornost na frekvencijsku selektivnost *multipath* fading kanala, zbog toga što u suštini pretvara ovakav kanal u set frekvencijski ravnih kanala, a korišćenjem zaštitnog vremenskog intervala (GI - *guard interval*), efikasno umanjuje mogućnost pojave intersimbolske interferencije (ISI – *Intersymbol Interference*). Na taj način, ova modulacija obezbjeđuje komunikacije velike brzine i pored veoma nepovoljnih uslova na kanalu, što je i razlog njene implementacije u mnogim današnjih širokopojasnim bežičnim komunikacionim sistemima.

Iako je koncept OFDM modulacije bio poznat od sedamdesetih godina prošlog vijeka, zbog problema u realizaciji međusobno ortogonalnih podnosilaca u analognoj tehnici, kao i frekvencijskoj sinhronizaciji prijemnika i predajnika, OFDM nije dugo vremena našao značajniju primjenu, [2]. Tek sa razvojem VLSI (*Very Large Scale Integration*) tehnologije, i stvaranjem mogućnosti realizacije ortogonalnih podnosilaca primjenom inverzne diskretne Furijeove transformacije (IDFT - *Inverse Discrete Fourier Transform*), odnosno još efikasnije IFFT operacije, dolazi do ekspanzije primjene OFDM-a od kraja devedesetih godina prošlog vijeka. Prvu standardizovanu primjenu u bežičnim komunikacionim sistemima, OFDM je našao kod bežičnih lokalnih mreža (WLAN – *Wireless Local Area Networks*), sa pojavom

IEEE 802.11 a i g standarda 1999. godine. Nakon toga, OFDM modulacija se iskristalisala kao neizostavan dio WLAN standarda, ali i WiMAX sistema, kao i standarda za zemaljsko digitalno emitovanje radio i video signala (DAB, DVB-T, DVB-H) [1]. Počevši od LTE (3.9G) standarda za mobilne ceularne sisteme, OFDM nalazi primjenu i u mobilnim celularnim sistemima na *downlink*-u [3]. Zahvaljujući mogućnosti velikih brzina prenosa, jednostavne ekvalizacije, i otpornosti na ISI, više šema zasnovanih na optičkom OFDM, usvojene su kao rješenja i u komunikacionim sistemima prenosa podataka preko vidljive svjetlosti (VLC - *Visible Light Communications*) [4].

I pored brojnih dokazanih dobrih karakteristika OFDM-a, ova modulaciona tehnika je poznata i po osjetljivosti na frekvencijski ofset i fazni šum, što može dovesti do značajnih degradacija BER performansi ako se ne kompenzuje, kao i velikom odnosu vršne i srednje snage (PAPR – *Peak-to-Average Power Ratio*), što iziskuje primjenu jako efikasnih i skupih pojačavača snage na strani predajnika. Ovo je jedan od glavnih razloga zašto OFDM nije primijenjen za *uplink* komunikaciju kod LTE i LTE-*Advanced* sistema, već njegova modifikacija, označena kao DFT-spređovani OFDM. U cilju što boljeg iskorišćenja dokazano dobrih karakteristika ove modulacije, otklanjanja efekata poznatih nedostataka i omogućavanja njene implementacije u idućim generacijama bežičnih komunikacionih sistema, OFDM je i dalje predmet intenzivnih istraživanja, posvećenih daljem poboljšanju njenih performansi.

Jedno od predloženih rješenja, koje je pobudilo veliko interesovanje istraživačke zajednice predstavlja indeks modulacija (*Index Modulation* - IM). Princip na kome počiva indeks modulacija predstavlja označavanje određenih komunikacionih resursa odgovarajućim, jednoznačnim indeksima, koji na taj način postaju mehanizam za prenošenje dodatnih informacionih bita. Izvorno, indeks modulacija je predložena kao prostorna modulacija (*Spatial Modulation* - SM) primijenjena na višestruke predajne antene MIMO sistema [5]. Pomenuti komunikacioni resurs, u slučaju prostorne modulacije jesu predajne antene, kojima se dodjeljuju indeksi (oznake), pa se pored konstelacionih simbola, informacija prenosi i putem samog izbora aktivne antene, a proces izbora antene je upravljani dolaznim informacionim bitima. To znači da je prijemu izborom aktivne antene već prenešena određena informacija, i to bez klasičnog prenosa konstelacionih simbola. Više autora je u svojim radovima demonstriralo da prostorna modulacija ima potencijal da prevaziđe neke široko zastupljene MIMO tehnike, kao što je V-BLAST arhitektura, i to po pitanju vjerovatnoće greške i kompleksnosti sistema [6]. Nakon potvrde potencijala indeks modulacije, intenzivno je razmatrana njena primjena i na druge komunikacione sisteme, odnosno druge komunikacione resurse kao što su frekvencijski podnosioci, vremenski slotovi ili stanja kanala. Primjenom

indeks modulacije na frekvencijske podnosiocice ortogonalne frekvencijske modulacije, nastala je modulaciona tehnika OFDM-IM. OFDM-IM predstavlja modifikaciju standardne OFDM modulacije, koja je kao pouzdano rješenje prenosa preko više podnosilaca već usvojena u većini sadašnjih standarda bežičnih komunikacija. Pomenuta modifikacija predstavlja princip indeksiranja međusobno ortogonalnih frekvencijskih podnosilaca OFDM-a, sa ciljem prenosa dodatnih informacija, a bez upotrebe vremensko-frekvencijskih resursa. Naime, informacioni biti se prenose putem M -arnih konstelacija signala, kao i kod klasičnih OFDM sistema, ali i preko selekcije podnosilaca koji se aktiviraju za prenos tih simbola. Svakom podnosiocu se dodjeljuje jedinstveni indeks, i podnosioci se za prenos biraju preko ovih indeksa, a u zavisnosti od ulaznih informacionih bita [7]. Na taj način, OFDM-IM sistem ima potencijal za postizanje bolje spektralne efikasnosti u odnosu na standardni OFDM, jer se bez upotrebe novih frekvencijskih resursa, u istom vremenskom intervalu prenose dodatni informacioni biti. Pomenuta selekcija indeksa znači aktiviranje određenog broja dostupnih OFDM podnosilaca za prenos simbola, dok ostali podnosioci ostaju neaktivni, pa se u isto vrijeme, ovom tehnikom može postići unapređenje i energetske efikasnosti. Uzimajući u obzir sve navedeno, OFDM-IM se može smatrati interesantnim kandidatom za primjenu u bežičnim komunikacionim sistemima velikih brzina prenosa, ali i sistemima koji zahtijevaju manju potrošnju energije, poput *Machine-to-Machine* (M2M) komunikacija. Upravo se kod mMTC (*massive Machine-Type Communications*) sistema, OFDM-IM prepoznaje kao obećavajuće rješenje za nedostatke koje pokazuje OFDM [8]. Naime, usljed djelimičnog aktiviranja podnosilaca, OFDM-IM je izložen manjoj inter-kanalnoj interferenciji (ICI) u odnosu na OFDM, koja se javlja zbog sporadičnog saobraćaja između korisničkog uređaja i bazne stanice, što izaziva problem koordinacije, a zatim i narušavanje ortogonalnosti među podnosiocima [8]. Takođe, zahvaljujući većoj pouzdanosti u uslovima visoke mobilnosti na kanalu sa frekvencijski selektivnim fadingom, [7], OFDM-IM je razmatran za upotrebu i kod V2X (*Vehicle-to-Everything*) komunikacionih sistema [9]. Na tipičnom V2X kanalu, u prisustvu korelisanog frekvencijski selektivnog fedinga i Doplerovog efekta, OFDM-IM u kombinaciji sa interliving grupisanjem podnosilaca, prikazan je kao kandidat za unapređenje spektralne efikasnosti i BER karakteristika, i to zahvaljujući mogućnosti da iskoristi selektivnost kanala za poboljšanje performansi. Princip neaktivnih podnosilaca u procesu indeks modulacije je prepoznat kao mogućnost poboljšanja performansi i kod podvodnih akustičnih (*Underwater Acoustic – UWA*) komunikacionih sistema. Kod UWA kanala, koji se smatra jednim od najizazovnijih komunikacionih okruženja usljed male brzine propagacije zvuka u vodi, ograničenog protoka i vremenski-promjenljive *multipath* propagacije koja izaziva frekvencijski selektivni feding,

klasični OFDM je predložen za implementaciju zbog svoje robustnosti u uslovima velikih vremenskih širenja (*delay spread*) i frekvencijske selektivnosti. Međutim, Doplerov efekat koji se javlja u ovom okruženju zbog stalnog pokreta terminala i morskih talasa, za posljedicu ima ugrožavanje ortogonalnosti podnosilaca i indukovanje ICI, pa se karakteristike OFDM-IM sistema mogu iskoristiti za borbu protiv negativnih efekata ovog fenomena [10]. Posljednjih godina, predloženo je i više rješenja zasnovanih na OFDM-IM konceptu za upotrebu u VLC sistemima. Kod VLC-OFDM sistema se određenim modifikacijama od kompleksnih dobijaju realni OFDM signali nakon inverzne brze Furijeove transformacije, a zatim su primijenjene i različite metode da rezultujući signal ima isključivo pozitivnu vrijednost, neophodnu za realizaciju prenosa informacija putem modulacije intenziteta izvora svjetlosti. Ove metode su efikasne, ali funkcionišu po cijenu smanjenja spektralne ili energetske efikasnosti, pa je nastala ideja o prilagođavanju i OFDM-IM modulacije za primjenu u VLC sistemima, sa ciljem unapređenja njihovih performansi [11].

Upravo je ispitivanje primjenjivosti OFDM-IM modulacije u budućim komunikacionim sistemima, bilo motiv za ovo istraživanje. Analiziran je uticaj indeks modulacije na performanse OFDM sistema, poput spektralne efikasnosti, energetske efikasnosti i BER-a, koje su ključne za praktičnu implementaciju u konkretnim sistemima. Od komunikacionih tehnologija se između ostalog, očekuje da ostvare što veći domet, uz što manju potrošnju energije, zbog čega je u upotrebu uveden i princip relejnog prenosa. Zato su u okviru ovog istraživanja razmotrene i performanse OFDM-IM dekodiraj-i-proslijedi relejnog sistema, sa ciljem da se pokaže da bi ovaj sistem mogao zadovoljiti zahtjeve brojnih aplikacija za malom potrošnjom energije i velikim komunikacionim dometom. Pored toga, u okviru istraživanja je predložen originalni sistem, hibridni OFDM-IM, koji obezbjeđuje unapređenje BER performansi OFDM-IM-a za oblasti malih i srednjih vrijednosti odnosa signal/šum.

Struktura rada je organizovana na sljedeći način. U drugom poglavlju su opisane modulacije koje su prethodile OFDM-IM, a zatim predstavljen model samog OFDM-IM sistema. Simulacionim putem su ispitane BER performanse ovog sistema u različitim uslovima, i upoređene sa klasičnim OFDM sistemom. Treće poglavlje donosi predlog primjene IM na OFDM zasnovane relejne sisteme, uz kombinaciju sa SM modulacijom. Opis modela sistema praćen je analizom performansi po pitanju spektralne i energetske efikasnosti, kao i BER-a. Kroz četvrto poglavlje uveden je model predloženog hibridnog OFDM-IM sistema. Isto poglavlje obuhvata i prikaz tehnike indeks modulacije sa varijabilnim brojem podnosilaca, sa ciljem prenosa dodatnih bita i poboljšanja spektralne efikasnosti. Peto poglavlje kombinuje hibridni OFDM-IM model i primjenu na relejne sisteme, kroz analizu hibridnog OFDM-IM

relejnog sistema. Osim varijante koja je namijenjena optimizaciji BER performansi, razmatrana je i druga varijanta hibridnog sistema, realizovanog sa ciljem povećanja spektralne efikasnosti. Kroz dobijene simulacione rezultate, ispitane su i međusobno upoređene BER performanse obje pomenute varijante sistema. Šesto poglavlje upućuje na pravce budućih istraživanja na polju OFDM-IM, i navodi potencijalne primjene ove modulacije. U posljednjem, sedmom poglavlju, dat je rezime i osnovni zaključci rada.

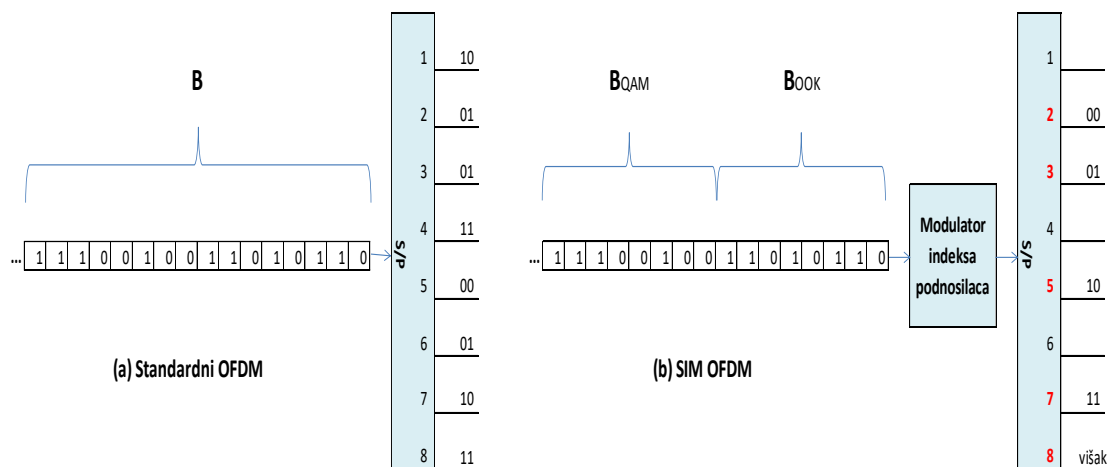
2. OFDM indeks modulacija

U literaturi su predložene brojne metode sa ciljem unapređenja performansi OFDM sistema, koji predstavlja jednu od najvažnijih tehnologija prenosa u bežičnim komunikacijama posljednje dvije decenije, i nezamjenjiv je dio savremenih bežičnih komunikacionih standarda za prenos podataka velikim brzinama. Prostorna modulacija, originalno predložena za MIMO sisteme, poslužila je kao inspiracija za ispitivanje rješenja modulacije sa indeksiranjem podnosilaca u OFDM sistemima. Na bazi različitih vidova implementacije same IM, predloženo je više realizacija indeks moduliranih OFDM sistema, koji rezultiraju i različitim uticajem na performanse standardnih OFDM sistema. U ovom poglavlju biće predstavljeni koncepti i osnovne performanse tri različite realizacije indeks modulacije kod OFDM sistema, onako kako su se hronološki razvijale.

2.1 SIM OFDM

Osnovna ideja SIM OFDM (*Subcarrier-Index Modulation*) sistema, prvog predloženog rješenja koje je povezal indeks modulaciju i OFDM, jeste uvođenje nove dimenzije prenosa informacionih bita, i to kroz korišćenje indeksa podnosilaca, u *On-Off Keying* (OOK) režimu [12]. Naime, ova tehnika funkcioniše na način što sekvencu bita B , koja se prenosi sistemom, dijeli na dvije pod-sekvence iste dužine. Prva podsekvenca, čija je dužina jednaka veličini FFT, svojim bitima u suštini određuje podskup podnosilaca, iz skupa ukupno dostupnih, a koji će služiti za prenos podataka. Selekcija podnosilaca za prenos odvija se u OOK režimu, tako što se svakom podnosiocu pridružuje jedan bit, koji određuje da li će podnosilac biti aktivan ili neaktivan u prenosu. Drugi dio informacione sekvence zatim moduliše odabrane aktivne podnosioce, dok ostali podnosioci ostaju neaktivni. Na slici 2.1 je prikazan primjer funkcionisanja SIM-OFDM sistema, i njegovo poređenje sa standardnim OFDM sistemom. Na dijelu slike 2.1.a), prikazan je OFDM sistem sa $N_{FFT}=8$ podnosilaca, i implementiranom 4-QAM kvadraturnom amplitudskom modulacijom. Ulazna sekvenca bita B , dužine $N_{FFT} * \log_2(M) = 16$ bita, nakon konverzije serije u paralelu, prenosi se uz korišćenje svih 8 OFDM podnosilaca. Nasuprot tome, na dijelu slike 2.1.b), prikazan je SIM-OFDM sistem, koji

razdvaja ulaznu sekvencu bita, B , na dva dijela iste dužine, B_{QAM} i B_{OOK} . Još jednu razliku u odnosu na OFDM pravi sklop označen kao modulator indeksa podnosilaca, koji suštinski obavlja sve funkcije indeks modulacije u ovom sistemu. Prvo, ovaj dio sistema određuje tzv. “većinski bit” (0 ili 1) u nizu B_{OOK} , odnosno onaj bit koji se pojavljuje na više od pola pozicija pomenutog niza [13]. Ovaj proces se izvodi formiranjem zasebnih podskupova nula i jedinica od skupa B_{OOK} , i određivanjem i poređenjem broja elemenata, ili kardinalnosti ovih podskupova. Kako se u konkretnom primjeru sa slike, B_{OOK} sastoji od 5 jedinica i 3 nule, tako modulator indeksa podnosilaca određuje jedinicu kao većinski bit. Zatim se lokacija svakog bita B_{OOK} niza pridružuje određenom indeksu podnosilaca, da bi se na kraju podnosioci kojima je pridružen većinski bit, jedinica u ovom slučaju, iz B_{OOK} sekvence, selektovali za modulaciju drugim dijelom informacionog niza B_{QAM} , dok se ostali podnosioci, kojima je pridružen nevećinski bit, nula, iz B_{OOK} sekvence, ostavljaju neaktivnim. Na ovaj način, podniz B_{OOK} se u stvari koristi u OOK režimu da aktivira za prenos one podnosice čiji indeksi odgovaraju većinskim bitima [12].



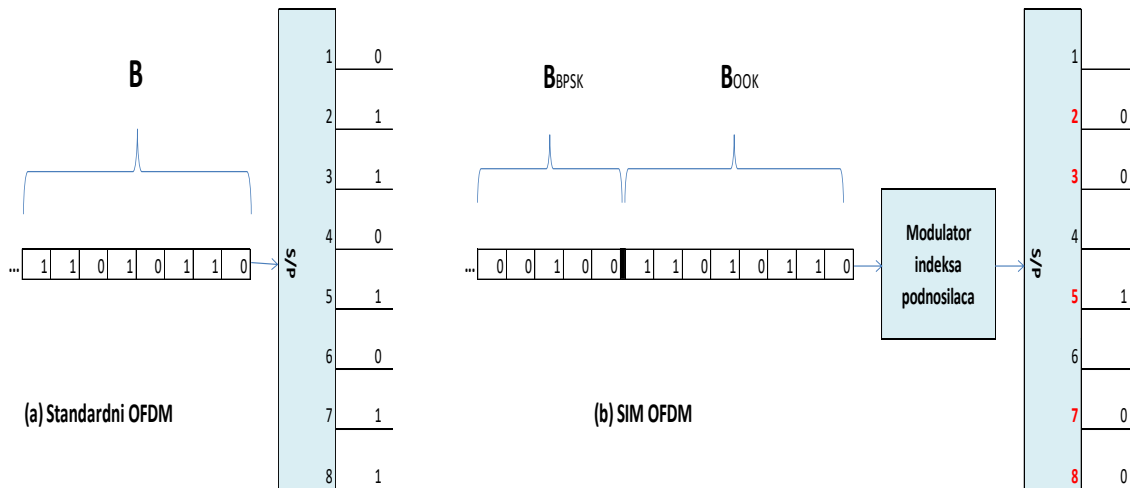
Slika 2.1. Šema aktiviranja podnosilaca za prenos kod 4-QAM moduliranih OFDM i SIM OFDM sistema

Važno je ponoviti da se za prenos aktiviraju podnosioci koji redosljedom odgovaraju većinskom bitu iz B_{OOK} sekvence, što znači da će aktivnih podnosilaca u svakoj iteraciji biti najmanje pola. Ako se za modulaciju podnosilaca koristi 4-QAM, dužina niza bita koji se prenose je $B = N_{FFT} * \log_2(M) = 2N_{FFT}$. U slučaju OFDM sistema, ovi biti se prenose preko svih N_{FFT} podnosilaca, dok se u slučaju SIM OFDM, podniz B_{QAM} dužine $B/2 = N_{FFT}$ bita, prenosi preko podnosilaca koji se određuju u zavisnosti od podniza B_{OOK} , dužine takođe

$B_{OOK}=B/2=N_{FFT}$. U krajnjem slučaju, kada u B_{OOK} nizu postoji jednak broj nula i jedinica, za prenos se bira tačno pola podnosilaca OFDM bloka, pa se na njima može poslati $N_{FFT}/2 * \log_2(M) = N_{FFT}$ bita, odnosno svi biti B_{QAM} sekvence. U takvoj situaciji, oba poredena sistema po simbolu prenose jednak broj bita, pa su njihove spektralne efikasnosti jednake. Međutim, različit broj aktivnih podnosilaca u ova dva sistema uslovljava i različitu raspodjelu snage. Naime, u slučaju SIM OFDM sistema, dio snage koji je originalno „namijenjen“ podnosiocima koji u toku prenosa ostaju neaktivni, može se rasporediti na dva načina [12]. Prvi način podrazumijeva uniformnu raspodjelu tog dijela snage na aktivne podnosiocce, pa se svakom podnosiocu koji se moduliše dodjeljuje više snage u odnosu na klasični OFDM sistem, što na kraju omogućava unapređenje BER performansi sistema. U opisanom primjeru, emisiona snaga po podnosiocu SIM OFDM sistema bi bila duplo veća u odnosu na OFDM, pa bi vjerovatnoća greške u ovom sistemu bila značajno manja. Druga mogućnost za upravljanje emisionom snagom jeste potiskivanje snage koja je originalno dodijeljena neaktivnim podnosiocima, što bi SIM OFDM sistemu omogućilo bolju energetska efikasnost. Dakle, u slučaju kada B_{OOK} dio informacione sekvence sadrži jednak broj jedinica i nula, SIM OFDM sistem sa 4-QAM modulacijom ima istu spektralnu efikasnost, ali omogućava unapređenje BER performansi, ili uštedu po pitanju energije, u odnosu na klasični OFDM sistem sa 4-QAM modulacijom. Ako se pak, u B_{OOK} sekvenci većinski bit javlja na više od pola pozicija, i aktivnih podnosilaca za prenos će biti više od pola. Kako je već pokazano da biti B_{QAM} sekvence modulišu tačno pola dostupnih OFDM podnosilaca, to znači da će više aktivnih podnosilaca teorijski značiti i prostor za prenos dodatnih informacionih bita, odnosno za povećanje spektralne efikasnosti sistema. U isto vrijeme, sve dok B_{OOK} sekvencu ne čini ponavljanje jednog istog bita (nule ili jedinice), za prenos neće biti uposleni svi podnosioci sistema, pa će ušteda ili preraspodjela snage neaktivnih podnosilaca i u ovom slučaju donositi benefite po pitanju performansi SIM OFDM sistema. U slučaju druge krajnosti, kada B_{OOK} čini niz samo nula, ili samo jedinica, za prenos se aktiviraju svi podnosioci bloka, tj. N_{FFT} podnosilaca. To znači da sistem ima kapacitet da po simbolu prenese $N_{FFT} * \log_2(M) = 2N_{FFT}$ bita kroz konstelacije signala, što uz bite B_{OOK} niza, daje mogućnost prenosa $3N_{FFT}$ bita po simbolu. Na taj način, postiglo bi se unapređenje spektralne efikasnosti od 50%, u odnosu na standardni OFDM prenos.

Kod sistema koji za modulaciju OFDM podnosilaca koriste mapiranje nižeg reda, kao što je binarna fazna modulacije (BPSK - *Binary Phase Shift Keying*), poboljšanja performansi koja se mogu postići sa primijenjenom indeks modulacijom, još su značajnija, nego u slučaju

4-QAM. Na slici 2.2 je prikazan princip prenosa OFDM i SIM OFDM sistema, sa BPSK modulacijom.

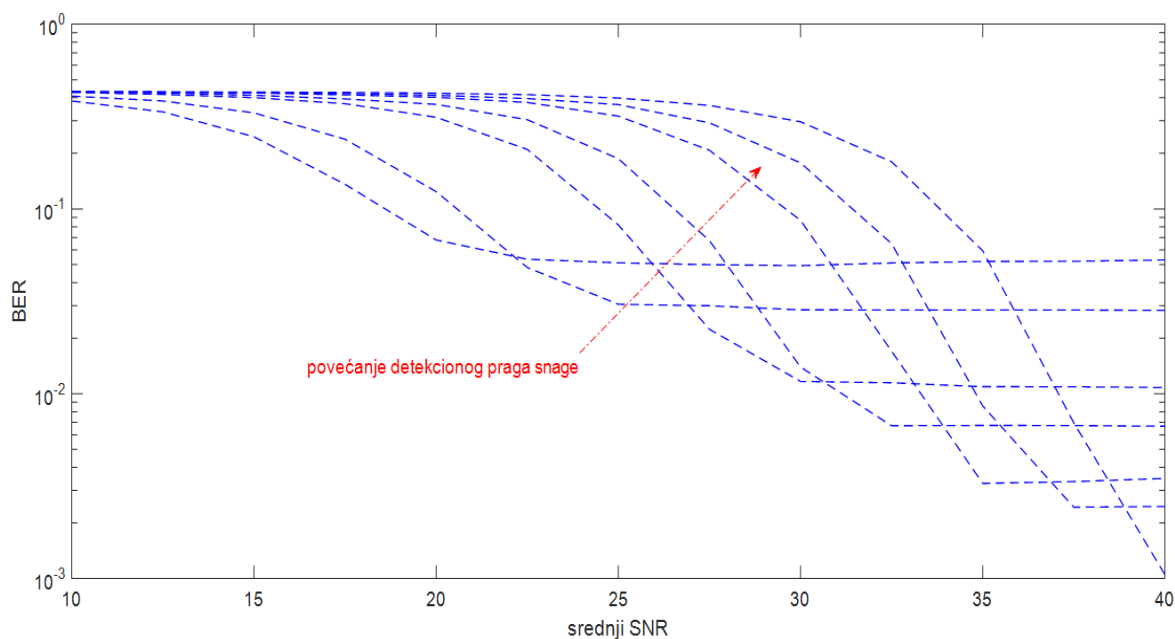


Slika 2.2. Šema aktiviranja podnosilaca za prenos kod BPSK moduliranih OFDM i SIM OFDM sistema

Oba poređena sistema imaju $N_{FFT}=8$ podnosilaca, i koriste BPSK ($M=2$) modulaciju. Standardni OFDM sistem, po svakom simbolu ima kapacitet prenosa $N_{FFT} \cdot \log_2(M) = 8$ bita. Nasuprot tome, SIM OFDM koristi $B_{OOK} = N_{FFT} = 8$ bita samo za selekciju aktivnih podnosilaca. Kako su aktivni podnosioci određeni većinskim bitom B_{OOK} niza od 8 bita, to znači da ovaj sistem ima mogućnost prenosa još od 4 do 8 bita. U primjeru sa slike, većinski bit je jedinica, i ona određuje $k=5$ aktivnih OFDM podnosilaca za prenos dodatnih $B_{BPSK} = k \cdot \log_2(M) = 5$ bita. To znači da je spektralna efikanosti SIM OFDM sistema u odnosu na standardni OFDM veća za 62.5% u konkretnom, a u opštem slučaju od 50% do 100%. Pored toga, ako pretpostavimo da je emisiona snaga po simbolu 1W, svakom podnosiocu OFDM sistema se dodjeljuje $1/N_{FFT} = 1/8$ W. Sa druge strane, ako je snaga od 1W uniformno raspodijeljena između aktivnih podnosilaca u slučaju SIM OFDM, njima će biti dodijeljeno $1/k = 1/5$ W u konkretnom, a u opštem slučaju, od 1/8 do 1/4 W. To znači da, pored bolje spektralne efikasnosti, SIM OFDM sa BPSK modulacijom postiže i bolje BER performanse, u odnosu na standardni OFDM [12]. Alternativno, umjesto povećanja emisione snage dodijeljene svakom aktivnom podnosiocu, dio snage se na račun neaktivnih podnosilaca može potisnuti, i tako postići bolja energetska efikasnost sistema.

SIM OFDM sistem predložen u [12], koristi “višak” aktivnih podnosilaca za eksplicitno signaliziranje tipa većinskog bita od predajnika do prijemnika, u cilju lakše detekcije, umjesto za povećanje spektralne efikasnosti sistema. Ipak, signaliziranje većinskog bita preko posebnih podnosilaca može biti izbjegnuto, pa se svi podnosioci mogu iskoristiti za prenos. U tom slučaju, detektor određuje aktivne podnosiocce, demoduliše signale na njima, pa formira dvije moguće rekonstrukcije poslatog signala, i to sa 1 na mjestu aktivnih podnosilaca, i sa 0 na mjestu aktivnih podnosilaca. Na kraju, tehnike za kontrolu greške (FEC - *Forward Error Correction*) bi za pomenute dvije opcije demodulisane sekvence B , odredile i odabrale onu sa manjim brojem grešaka.

Na strani prijema, signal se transformiše korišćenjem brze Furijeove transformacije (FFT), kao i za klasični OFDM. Nakon toga se ispituje stanje svakog frekvencijskog podnosioca, i to tako da se oni čija je snaga veća od određenog praga smatraju aktivnim, a ostali se označavaju kao neaktivni. Prvi dio informacije koja se detektuje, B_{OOK} , se rekonstruiše preko određivanja stanja podnosilaca, i poznatog tipa većinskog bita. Nakon toga se aktivni podnosioci demodulišu, u skladu sa primijenjenom modulacijom, da bi se rekonstruisao i drugi dio informacije, B_{QAM} , na primjer. Da bi se informacija pravilo rekonstruisala, veoma je važno da vrijednost praga sa kojim se porede snage svih podnosilaca bude pravilno određena. U situacijama sa nepovoljnim uslovima na kanalu, podnosioci mogu biti deformisani do te mjere, da se oni koji su tokom prenosa bili neaktivni, usljed niske vrijednosti praga detekcije procijene kao aktivni, a oni podnosioci na kojima su emitovani konstelacioni simboli, u slučaju nešto veće vrijednosti praga detekcije, budu kategorisani kao neaktivni. Greške u procjeni aktivnih i neaktivnih podnosilaca neminovno vode pogrešnoj demodulaciji velikog dijela poslate informacije.



Slika 2.3. Zavisnost BER performansi od vrijednosti nivoa praga za detekciju snage kod SIM OFDM sistema

Na slici 2.3 je prikazana zavisnost performansi SIM OFDM sistema, sa stanovišta vjerovatnoće greške po bitu (BER), od vrijednosti odabranog praga detekcije. Sa slike se lako uočava da se za manje vrijednosti srednjeg SNR-a, pravi manje grešaka pri demodulaciji onda kada je vrijednost praga detekcije podešena na manju vrijednost. Sa povećanjem vrijednosti srednjeg SNR-a, veća preciznost na prijemu se postiže sa proporcionalnim povećanjem vrijednosti praga detekcije.

Analitički izraz za vjerovatnoću greške po bitu pri estimaciji sekvence B , izveden je u [14]:

$$P_e^{PRP} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_s}{1+\bar{\gamma}_s}} \right) \right] + \frac{1}{2} \left[-\frac{1}{8} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\bar{\gamma}_s}{2+2\bar{\gamma}_s}} + \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2\bar{\gamma}_s}{2+2\bar{\gamma}_s}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{2+2\bar{\gamma}_s}{2\bar{\gamma}_s}} \right] \quad (2.1)$$

$$P_e^{PSP} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{0.5\bar{\gamma}_s}{1+0.5\bar{\gamma}_s}} \right) \right] + \frac{1}{2} \left[-\frac{1}{8} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_s}{2+\bar{\gamma}_s}} + \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\bar{\gamma}_s}{2+\bar{\gamma}_s}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{2+\bar{\gamma}_s}{\bar{\gamma}_s}} \right] \quad (2.2)$$

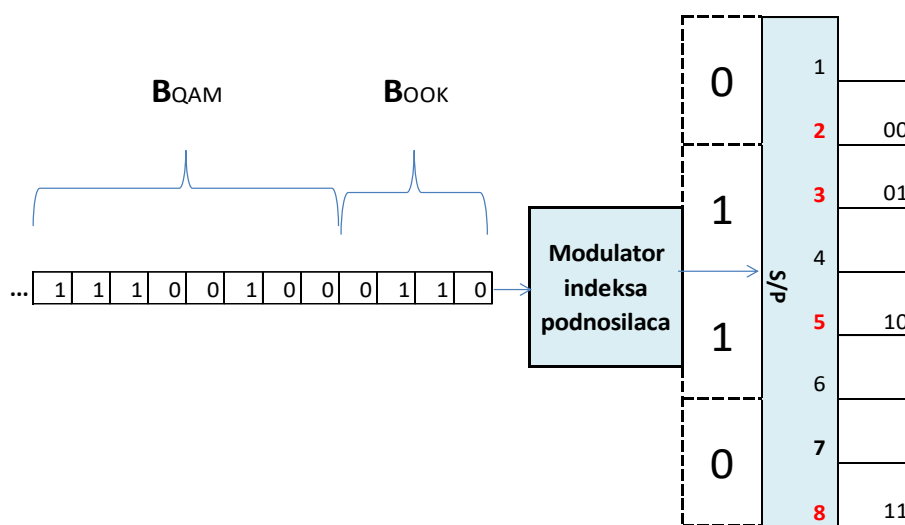
gdje $\bar{\gamma}_s$ predstavlja prosječnu vrijednost odnosa signal-šum (SNR) po simbolu, a PRP i PSP oznake se odnose na metode realokacije snage, i metode uštede snage, respektivno. Analitički rezultati dobijeni na ovaj način, pokazali su da u slučaju kada je primijenjena metoda realokacije snage, SIM OFDM sistem koji koristi preostale aktivne podnosioce (kada ih ima) za signaliziranje većinskog bita, ima bolje BER performanse u odnosu na OFDM sistem za sve

vrijednosti SNR-a. Nivo poboljšanja performansi sa stanovišta SNR dobitka, za vrijednosti SNR-a veće od 10 dB, iznosi konstantno 4 dB. Za SIM OFDM sistem, koji ne koristi dostupne podnosiocice za signaliziranje većinskog bita, BER karakteristika prevazilazi klasični OFDM za vrijednosti SNR-a veće od 8 dB, i ta razlika približno konstantno iznosi 2 dB. Kada je primijenjena metoda uštede snage, SIM OFDM sa signaliziranjem većinskog bita pokazuje bolje BER performanse u odnosu na OFDM za SNR vrijednosti preko 10 dB, a unapređenje performansi sa stanovišta SNR dobitka iznosi 1 dB. U isto vrijeme, SIM OFDM sistem bez signaliziranja većinskog bita ima lošije BER karakteristike u odnosu na OFDM, međutim ta razlika za veće vrijednosti SNR-a (preko 12 dB) iznosi konstantno 1 dB. Ipak, u ovom slučaju, SIM OFDM sistemi dostižu i do 3 dB bolju energetska efikasnost, kako je uložena snaga manja i do 50% u odnosu na klasični OFDM sistem [12].

2.2 ESIM OFDM

Jedan od nedostataka predloženog SIM OFDM sistema je to što je neophodno korišćenje praga za detekciju snage na prijemu. Naime, postavljena vrijednost praga za određivanje stanja podnosilaca mora biti na nižem nivou od nivoa snage koji nosi signal kada je emitovan konstelacioni simbol sa najnižom energijom, jer inače prijemnik ne bi mogao detektovati sve simbole [13]. Ova činjenica pokazuje ograničenja po pitanju primjene OOK za modulacije višeg reda, zbog otežane detekcije stanja podnosilaca, u uslovima kada emitovani signal za simbole sa najmanjom energijom, može biti na nivou snage veoma bliskom pragu detekcije. Osim toga, problem na prijemu predstavljaju i pogrešne odluke pri određivanju stanja podnosilaca, koje vode ne samo greškama u demodulaciji konkretnog simbola koji se prenosi na pomenutom podnosiocu, već i pogrešnoj demodulaciji svih sljedećih prenesenih simbola [13]. Ovo se dešava zato što se u slučaju preskakanja aktivnog podnosioca, ili određivanja neaktivnog kao aktivnog, remeti redosljed u sekvenci bita koji su predstavljeni konstelacionim simbolima, pa se u tom dijelu neminovno dešavaju greške na svakom preostalom bitu. U cilju limitiranja ovih negativnih efekata OOK detekcije kod SIM OFDM, predložena je i modifikacija ovog sistema, u vidu unaprijeđenog SIM OFDM (ESIM OFDM - *Enhanced SIM OFDM*) sistema [14]. Ova modifikacija je sadržana u načinu na koji biti iz B_{OOK} niza određuju stanja podnosilaca za prenos. Naime, umjesto da svaki bit određuje stanje jednog

OFDM podnosioca, predloženo je da jedan bit B_{OOK} niza određuje stanje jednog para podnosilaca, odnosno dva uzastopna podnosioca. Konkretno, za svaku jedinicu (bit 1) iz niza B_{OOK} , prvi podnosilac odgovarajućeg para je aktivan za prenos, dok je drugi neaktivan. Na isti način, za svaku nulu (bit 0) iz B_{OOK} , prvi podnosilac odgovarajućeg para je neaktivan, dok je drugi aktivan za prenos [13]. Princip funkcionisanja ovog sistema je prikazan na slici 2.4. U ovom slučaju, kroz indeksiranje podnosilaca i njihova stanja (aktivni ili neaktivni) može se predstaviti B_{OOK} informacioni niz dužine $N_{FFT}/2$, što je duplo manje u odnosu na prvobitnu SIM OFDM šemu.



Slika 2.4. Šema aktiviranja podnosilaca za prenos kod ESIM OFDM sistema

Ipak, prednost ove modifikacije predstavlja činjenica da je u svakom paru tačno jedan podnosilac aktivan. Na taj način, potpuno se izbjegava remećenje redosljeda B_{QAM} simbola pri pogrešnoj odluci o stanju određenog podnosioca, i potencijalna greška se limitira samo na konkretni par podnosilaca. Osim toga, prestaje potreba za signaliziranjem većinskog bita, i broj aktivnih podnosilaca je uvijek isti, $N_{FFT}/2$. Nije potrebno ni korišćenje praga detekcije snage u ovom slučaju za detekciju stanja podnosilaca, jer je poznato da je za svaka dva uzastopna podnosioca, jedan aktivan. Dakle, dovoljno je međusobno poređenje njihove snage, za određivanje aktivnog. Sve ovo dovodi do značajnog smanjenja grešaka pri određivanju stanja podnosilaca na prijemu.

Dodatna prednost OFDM sistema sa indeksiranjem podnosilaca, u odnosu na klasični OFDM sistem prenosa, ogleda se u redukciji odnosa vršne i srednje snage (PAPR – *Peak to Average Power Ratio*) [13], [14]. Kako se maksimalni nivo snage signala u OFDM sistemu

postiče u trenutku kada se svaki podnosilac u sistemu moduliše istim simbolom, sa najvećom snagom, modifikovani SIM OFDM sistem, koji u svakom trenutku ima tačno pola aktivnih podnosilaca, samim tim smanjuje PAPR dva puta, u odnosu na standardni OFDM. Ovako modifikovani SIM OFDM sistem predstavlja potencijalnu tehniku za primjenu u sistemima koji nemaju potrebu za veoma velikim brzinama prenosa, odnosno visokom spektralnom efikasnošću, a mogu imati velike koristi od redukovanog odnosa maksimalnog i prosječnog nivoa snage koji on obezbjeđuje, kao što su optičke bežične komunikacije. Pored toga, moguće polje primjene su i *uplink* kanali, kod kojih je prioritet na energetske, u odnosu na spektralnu efikasnost.

Nakon inicijalne implementacije indeks modulacije u OFDM sistemima, u vidu SIM OFDM i unaprijeđenog SIM OFDM-a, predložen je sistem OFDM sa indeks modulacijom (OFDM-IM) [7]. U odnosu na pomenuti SIM OFDM sistem, OFDM-IM nema potrebu za poređenjima sa pragom za detekciju snage, niti za idealnom *feedforward* signalizacijom od predajnika do prijemnika, preko viška podnosilaca. Takođe, OFDM-IM prevazilazi problem redukovane spektralne efikasnosti, koja karakteriše modifikovani SIM OFDM, odnosno ESIM OFDM sistem. Ova šema podrazumijeva transfer informacija putem standardnih M -arnih signalnih konstelacija, a i putem kombinacije podnosilaca koji se aktiviraju za prenos. Novina koju OFDM-IM uvodi je način mapiranja informacionih bita u kombinaciju aktivnih podnosilaca, a on se ogleda u dvije osnovne metode. Prvu metodu predstavlja upotreba jednostavne *look-up* tabele, u kombinaciji sa *Maximum Likelihood* (ML) detektorom na prijemu. Kako bi za sisteme sa velikim brojem podnosilaca, *look-up* tabela trebalo da sadrži ogroman broj zapisa, rad sa ovakvom tabelom bi u tom slučaju bio nepraktičan. Iz tog razloga, predložena je i druga metoda, zasnovana na teoriji kombinatorike brojeva, koja na prijemu koristi *Log-Likelihood Ratio* (LLR) detektor. Ova šema indeks modulacije omogućava poboljšanje spektralne efikasnosti sistema u poređenju sa klasičnim OFDM sistemom, zahvaljujući dodatnim bitima koji se prenose samo preko šablona selekcije podnosilaca. Istovremeno se unapređuje i energetska efikasnost, zbog činjenice da određeni broj podnosilaca tokom prenosa ostaje neaktivan. Pored toga, ovakav način prenosa koji koristi indekse podnosilaca kao dodatni izvor informacija, pretvara u svojevrsnu prednost frekvencijsku selektivnost samog kanala [7].

2.3 OFDM-IM

2.3.1 Model sistema

Na strani OFDM-IM predajnika, ukupan broj od N OFDM podnosilaca podijeljen je na g grupa, tako da svaka grupa sadrži $n=N/g$ podnosilaca [6]. Informacija od m bita sa ulaza sistema se na taj način dijeli na g grupa od po p bita, u sklopu za razdvajanje bita, tako da je $m=p \cdot g$. Nakon razdvajanja bita, u svakoj od g grana, p bita se dalje dijeli na dvije grupe od po p_1 i p_2 bita, tako da je $p=p_1+p_2$. Kao što je već pomenuto, informacija se u ovom sistemu prenosi do prijemnika ne samo putem konstelacionih simbola, već i preko selekcije odgovarajućih podnosilaca koji se koriste za prenos simbola, na način što svaki podnosilac ima svoj indeks [7]. Prateći ovaj šablon, p_2 informacionih bita iz svake grane se mapira u M -arne simbole, dok se p_1 bita dovodi do bloka za selekciju indeksa. Ovaj blok, na osnovu bita p_1 , selektuje aktivne podnosioce, koji će biti iskorišćeni za prenos M -arnih simbola, od ukupnog broja od n podnosilaca koji su na raspolaganju, u svakoj od g grupa. Ako je k broj aktivnih podnosilaca koji se bira u svakoj grani, onda se broj bita p_1 koji se koristi za selekciju indeksa može predstaviti kao:

$$p_1 = \log_2(C(n, k)), \quad (2.3)$$

gdje je $C(n, k)$ binomni koeficijent, tako da postoji $c = 2^{p_1}$ mogućih kombinacija aktivnih indeksa. Preostalih p_2 bita se mapira u M -arne simbole, koji se prenose preko odabranih k aktivnih podnosilaca. Na taj način je:

$$p_2 = k \cdot \log_2 M. \quad (2.4)$$

Na nivou cijelog OFDM bloka,

$$g \cdot p_1 = g \cdot \log_2(C(n, k)) \quad (2.5)$$

bita se prenosi preko selekcije indeksa, a

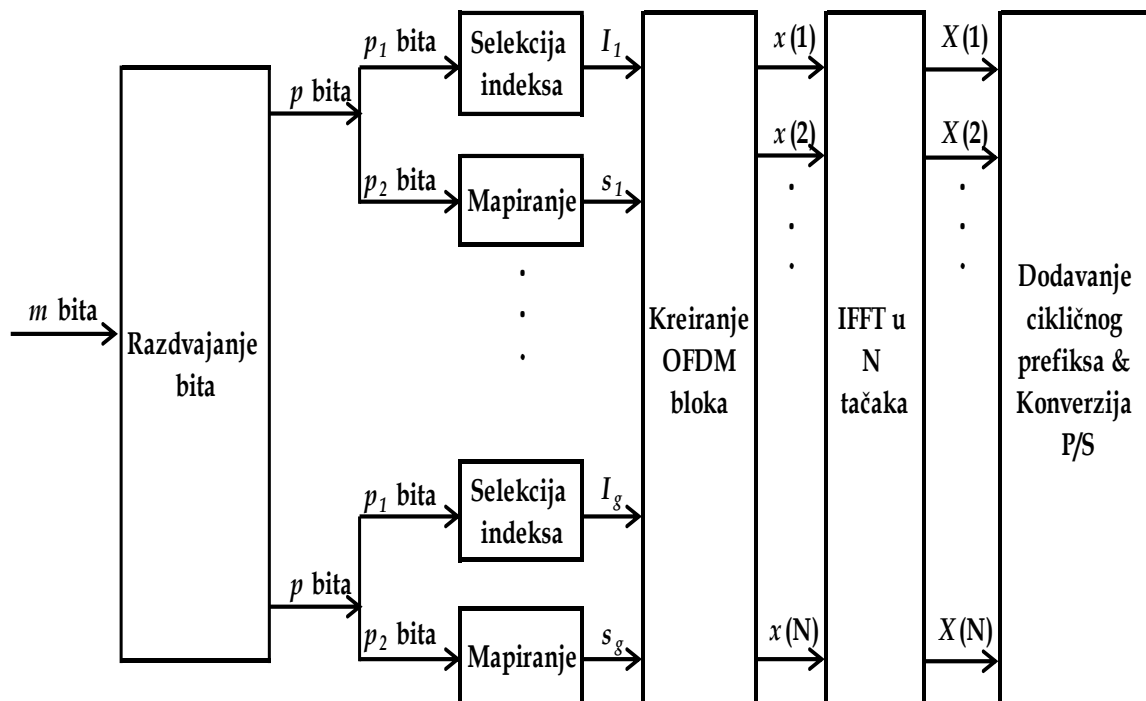
$$g \cdot p_2 = g \cdot k \cdot \log_2 M \quad (2.6)$$

bita se prenosi putem M -arnih simbola.

Na slici 2.5 je prikazana blok šema OFDM-IM predajnika. U svakoj grani β , p_1 bita sa ulaza se prosljeđuje na selektor indeksa, koji vrši izbor k aktivnih indeksa od ukupno n dostupnih, tako da se aktivni indeksi mogu prikazati kao:

$$I_\beta = \{i_{\beta,1}, \dots, i_{\beta,k}\} \quad (2.7)$$

gdje je $i_{\beta,\gamma} \in [1, \dots, n]$, za $\beta = 1, \dots, g$ a $\gamma = 1, \dots, k$.



Slika 2.5. Blok šema OFDM-IM predajnika

Istovremeno, na izlazu bloka za mapiranje, odnosno modulaciju, vektor moduliranih simbola, koji koriste p_2 bita, može se zapisati kao:

$$s_\beta = [s_\beta(1) \dots s_\beta(k)] \quad (2.8)$$

gdje $s_\beta(\gamma) \in S$ skupu kompleksnih konstelacionih simbola reda M , a $\beta = 1, \dots, g$ i $\gamma = 1, \dots, k$. Sklop za kreiranje OFDM bloka prvo formira sve podblokove na osnovu I_β i s_β za svako β , a zatim kreira glavni $N \times 1$ OFDM blok

$$\mathbf{x}_F = [x(1) \ x(2) \ \dots \ x(N)]^T \quad (2.9)$$

gdje je $x(\alpha) \in \{0, S\}$, $\alpha = 1, \dots, N$, povezivanjem svih g podblokova. Za razliku od klasičnog OFDM-a, x_F kreirano na ovaj način sadrži nulte članove, čije pozicije nose informaciju.

U nastavku, izvodi se poznata procedura OFDM modulacije. OFDM blok se procesuiru algoritmom inverzne FFT (IFFT):

$$\mathbf{x}_T = \frac{N}{\sqrt{K}} \text{IFFT}\{\mathbf{x}_F\} = \frac{1}{\sqrt{K}} \mathbf{W}_N^H \mathbf{x}_F \quad (2.10)$$

gdje je x_T OFDM signal u vremenskom domenu, a \mathbf{W}_N je matrica diskretne Furijeove transformacije (DFT). Nakon IFFT, na početak OFDM bloka se dodaje ciklični prefiks (CP). Slijedi konverzija paralelnih signala u jedan serijski signal, i njegovo slanje kroz frekvencijski selektivni fading kanal. Ekvivalentna veza ulaznog i izlaznog signala OFDM sistema, u frekvencijskom domenu, je:

$$y_F(\alpha) = x(\alpha)h_F(\alpha) + w_F(\alpha), \quad \alpha = 1, \dots, N \quad (2.11)$$

gdje su $y_F(\alpha)$ primljeni signali, $h_F(\alpha)$ fading koeficijenti kanala, a $w_F(\alpha)$ odbirci šuma u frekvencijskom domenu. Raspodjela $h_F(\alpha)$ i $w_F(\alpha)$ je Gausova, srednje vrijednosti 0, sa varijansom 1 i $N_{0,F}$, respektivno, gdje je $N_{0,F}$ varijansa šuma u frekvencijskom domenu, koja je sa varijansom šuma u vremenskom domenu povezana relacijom:

$$N_{0,F} = \left(\frac{K}{N}\right) N_{0,T}. \quad (2.12)$$

Odnos signal-šum (SNR) se u ovom slučaju definiše kao $\rho = E_b/N_{0,T}$, gdje je $E_b = (N+L)/m$ prosječna energija po bitu, a L dužina cikličnog prefiksa [7].

Na strani prijema se obavlja detekcija indeksa aktivnih podnosilaca i odgovarajućih informacionih simbola, i to procesuiranjem $y_F(\alpha)$, $\alpha = 1, \dots, N$. Za razliku od klasičnog OFDM sistema, prosta odluka o poslatom simbolu $x(\alpha)$ zasnovana na primljenom $y_F(\alpha)$ nije dovoljna, zbog informacija o indeksima koje su sadržane u OFDM podblokovima. Zato su predložena dva tipa detekcionog algoritma za OFDM-IM šemu. Prvi je detektor maksimalne vjerovatnoće (*Maximum Likelihood* - ML), koji razmatra sve moguće realizacije podblokova, tako što pretražuje sve moguće kombinacije aktivnih podnosilaca i konstelacionih simbola, sa ciljem

da donese združenu odluku o aktivnim indeksima i prenesenim simbolima, za svaki podblok. Drugi tip detektora za OFDM-IM šemu je detektor logaritamskog odnosa vjerovatnoća (*Log-likelihood Ratio* – LLR), koji proračunava logaritamske odnose a-posteriori vjerovatnoća da je na odgovarajućem podnosiocu emitovan simbol ili nula.

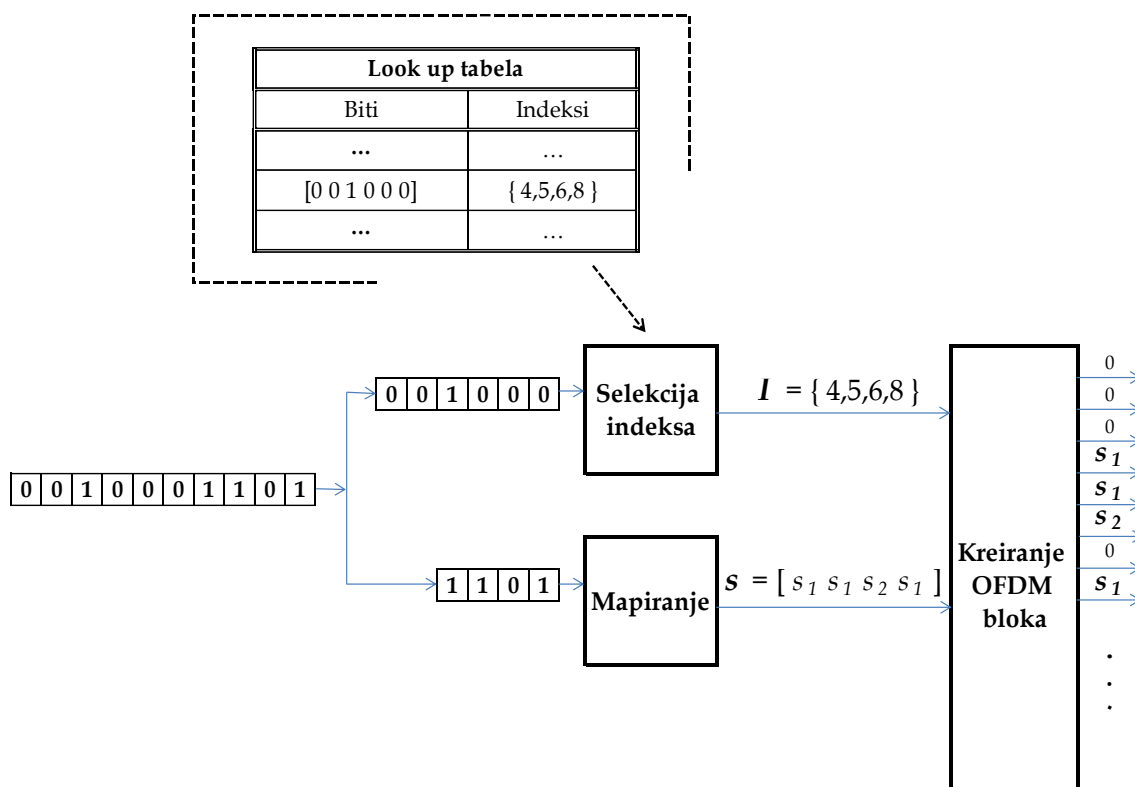
Selekcija indeksa se na predaji može realizovati na 2 načina [7]. Prvi način predstavlja upotrebu jednostavne *look-up* tabele, koja se koristi i na predaji i na prijemu. Na strani predajnika, u zavisnosti od p_1 bita na ulazu, iz tabele se čitaju aktivni indeksi, dok se na strani prijemnika obavlja suprotna akcija. U tabeli 1 je prikazan primjer *look-up* tabele za slučaj kada su svi dostupni OFDM podnosioci podijeljeni na podbloke sa po $n=8$ podnosilaca, od kojih se za prenos biraju $k=4$ aktivna.

Tabela 1. Primjer *look-up* tabele za OFDM-IM sistem sa $n=8$ i $k=4$

Biti	Indeksi	Podblok
[000000]	{1,2,3,4}	[s(1) s(2) s(3) s(4) 0 0 0 0]
[000001]	{2,3,4,5}	[0 s(1) s(2) s(3) s(4) 0 0 0]
[000010]	{3,4,5,6}	[0 0 s(1) s(2) s(3) s(4) 0 0]
[000011]	{4,5,6,7}	[0 0 0 s(1) s(2) s(3) s(4) 0]
[000100]	{5,6,7,8}	[0 0 0 0 s(1) s(2) s(3) s(4)]
[000101]	{1,2,3,5}	[s(1) s(2) s(3) 0 s(4) 0 0 0]
[000110]	{2,3,4,6}	[0 s(1) s(2) s(3) 0 s(4) 0 0]
[000111]	{3,4,5,7}	[0 0 s(1) s(2) s(3) 0 s(4) 0]
[001000]	{4,5,6,8}	[0 0 0 s(1) s(2) s(3) 0 s(4)]
...
[111110]	{1,3,5,7}	[0 s(1) 0 s(2) 0 s(3) 0 s(4)]
[111111]	{2,4,6,8}	[s(1) 0 s(2) 0 s(3) 0 s(4) 0]

Kako se 4 podnosioca, od dostupnih 8, može izabrati na $C(8,4)=70$ načina, to se $p_1=6$ bita ($2^6=64$) može iskoristiti za selekciju podnosilaca za prenos simbola, i na taj način prenijeti do prijemnika. U ovom slučaju, $70-64=6$ preostalih kombinacija indeksa se ne koristi. Ako se za modulaciju simbola koristi BPSK ($M=2$), preko 4 aktivna podnosioca će se emitovati 4 konstelaciona simbola, odnosno $p_2=4*\log_2(M)=4$ bita. Dakle, u ovom primjeru je broj bita koji se prenese svakom od g grana OFDM-IM sistema jednak $p_1+p_2=10$ bita. Konkretno, ako je sekvenca bita na ulazu prve grane OFDM-IM predajnika, na primjer [0 0 1 0 0 0 1 1 0 1], na osnovu prvih $p_1=6$ bita odnosno niza [0 0 1 0 0 0] i zapisa iz Tabele 1, odabiraće se kombinacija podnosilaca {4,5,6,8}. Preostala $p_2=4$ bita će se u vidu BPSK simbola emitovati na odabranim podnosiocima (Slika 2.6.). Iako veoma efikasan i jednostavan, ovaj metod

postaje nepraktičan za velike vrijednosti n i k , zbog veličine same tabele. *Look-up* tabela se implementira sa ML detektorom na prijemu, iz razloga što prijemnik treba da posjeduje znanje o svim mogućim indeksima za ML dekodiranje, dakle treba da posjeduje *look-up* tabelu. Sa druge strane, na strani prijema ne može biti LLR detektor, zbog toga što prijemnik ne može donijeti odluku o aktivnim indeksima, ako detektovani indeksi ne postoje u tabeli.



Slika 2.6. Princip funkcionisanja selektora indeksa na bazi *look-up* tabele

ML detektor, koji je primijenjen na prijemu, koristi zapise iz *look-up* tabele da kreira sve moguće realizacije podbloka, da bi donio odluku o poslatim bitima, i to minimizovanjem sljedeće metrike:

$$(\hat{I}_\beta, \hat{s}_\beta) = \arg \min_{I_\beta, s_\beta} \sum_{\gamma=1}^k \left| y_F^\beta(i_{\beta,\gamma}) - h_F^\beta(i_{\beta,\gamma}) s_\beta(\gamma) \right|^2, \quad (2.13)$$

gdje su $y_F^\beta(\xi)$ i $h_F^\beta(\xi)$ za $\xi = 1, \dots, n$ primljeni signali i odgovarajući fading koeficijenti za podblok β , znači da je $y_F^\beta(\xi) = y_F(n(\beta - 1) + \xi)$, $h_F^\beta(\xi) = h_F(n(\beta - 1) + \xi)$, respektivno. Može se pokazati da je ukupna računaska kompleksnost ML detektora po pitanju množenja reda (cM^k) po podbloku, imajući u vidu da I_β i s_β imaju c i M^k različitih realizacija, respektivno [15]. Dakle,

ovakav ML detektor postaje nepraktičan za veće vrijednosti c i k , zbog njegove eksponencijalno rastuće kompleksnosti dekodiranja.

Drugi način realizacije selekcije indeksa je metod kombinatorike brojeva, koji podrazumijeva mapiranje prirodnih brojeva u striktno opadajuću sekvencu aktivnih indeksa [9]. Biti na ulazu selektora indeksa se prvo konvertuju u decimalan broj Z , uz pomoć konvertora binarnih u decimalne brojeve. Sekvenca aktivnih indeksa $J(c_k, c_{k-1}, \dots, c_1)$, $c_k \geq c_{k-1} \geq \dots \geq c_1$, $c \in [0, \dots, n-1]$, može se odrediti preko jednačine:

$$Z = C(c_k, k) + C(c_{k-1}, k-1) + \dots + C(c_1, 1) . \quad (2.14)$$

U navedenoj jednačini, c_k vrijednosti se računaju traženjem maksimalne vrijednosti c_k koja zadovoljava uslov: $C(c_k, k) \leq Z$, zatim traženjem maksimalnog c_{k-1} , za koje je zadovoljeno $C(c_{k-1}, k-1) \leq Z - C(c_k, k)$, i tako dalje. Stvarni indeksi podnosilaca koji se koriste za prenos se konačno dobijaju dodavanjem jedinice dobijenim c_k vrijednostima, zato što podnosioci uzimaju indekse iz skupa $[1, \dots, n]$. Isti algoritam se primjenjuje na strani prijemnika, za određivanje decimalnog broja Z od aktivnih indeksa, a zatim pretvaranje tog broja u sekvencu bita, korišćenjem konvertora decimalnih u binarne brojeve. Primjera radi, kombinacije od $k=4$ aktivnih indeksa podbloka β sa ukupno $n=8$ podnosilaca, I_β , kojih ukupno ima $C(8,4)=70$, mogu se jednoznačno povezati sa decimalnim brojem Z dobijenim konverzijom bita na ulazu, na sljedeći način:

$$\begin{aligned} 69 &= C(7,4) + C(6,3) + C(5,2) + C(4,1) \rightarrow J = \{7,6,5,4\} \rightarrow I_\beta = \{8,7,6,5\} \\ 68 &= C(7,4) + C(6,3) + C(5,2) + C(3,1) \rightarrow J = \{7,6,5,3\} \rightarrow I_\beta = \{8,7,6,4\} \\ 67 &= C(7,4) + C(6,3) + C(5,2) + C(2,1) \rightarrow J = \{7,6,5,2\} \rightarrow I_\beta = \{8,7,6,3\} \\ &\vdots \\ 35 &= C(7,4) + C(2,3) + C(1,2) + C(0,1) \rightarrow J = \{7,2,1,0\} \rightarrow I_\beta = \{8,3,2,1\} \\ 34 &= C(6,4) + C(5,3) + C(4,2) + C(3,1) \rightarrow J = \{6,5,4,3\} \rightarrow I_\beta = \{7,6,5,4\} \\ &\vdots \\ 1 &= C(4,4) + C(2,3) + C(1,2) + C(0,1) \rightarrow J = \{4,2,1,0\} \rightarrow I_\beta = \{5,3,2,1\} \\ 0 &= C(3,4) + C(2,3) + C(1,2) + C(0,1) \rightarrow J = \{3,2,1,0\} \rightarrow I_\beta = \{4,3,2,1\} \end{aligned}$$

Na osnovu jednačine (2.3), $p_1=6$ bita se koristi u svakoj grani za odabir kombinacije 4 aktivna podnosioca od dostupnih 8. U slučaju kada je na aktivne podnosiocce primijenjena BPSK, tada je broj bita $p_2=4$, što daje da se na nivou cijelog OFDM simbola do prijemnika prenese $g^*(6+4)$

bita. Ako je na ulazu u jednu od grana OFDM-IM sistema sekvenca bita [0 0 1 0 1 0 1 1 0 1], prvih p_1 bita (0 0 1 0 1 0) se prosljeđuje do selektora indeksa i služe za selekciju aktivnih indeksa, dok se preostalih p_2 bita (1 1 0 1) mapira u BPSK simbole. Prema objašnjenom principu selekcije indeksa, biti (0 0 1 0 1 0) se prvo pretvaraju u decimalan broj 10. Kako u ovom primjeru sistem ima $k=4$ aktivna podnosioca, sljedeći korak je pronalaženje maksimalnog $C(c_4,4)$, pa zatim $C(c_3,3)$, $C(c_2,2)$ i $C(c_1,1)$, koji zadovoljavaju uslov (2.14) za $Z=10$. Maksimalno c_4 , koje zadovoljava ovaj uslov je $c_4=5$, kako je $C(5,4)=5 \leq 10$. Nakon toga se na isti način dobija $c_3=4$ (kako je $C(4,3)=4 \leq 10-5=5$), $c_2=2$ (kako je $C(2,2)=1 \leq 5-4=1$) i $c_1=0$ (jer je $C(0,1)=0 \leq 1-1=0$). Na kraju, dodavanjem jedinice skupu dobijenih c_k (5,4,2,0), dobija se kombinacija aktivnih podnosilaca $I_\beta=(6,5,3,1)$. Preostalih p_2 bita se zatim, u vidu BPSK simbola, emituje preko podnosilaca sa indeksima 6, 5, 3 i 1.

Kod opisanog metoda se na prijemu koristi detektor logaritamske vjerovatnoće (LLR). LLR detektor određuje logaritamski odnos vjerovatnoća da je na određenom podnosiocu emitovan simbol ili nula [7]. Ako y_f predstavlja primljeni signal, a x poslati signal u frekvencijskom domenu, a s_i , $i \in [1, \dots, M]$ je alfabet modulacije, tada se za svaki podnosilac α , vrijednost $\lambda(\alpha)$ može izračunati kao:

$$\lambda(\alpha) = \ln \frac{\sum_{i=1}^M P(x(\alpha)=s_i|y_f(\alpha))}{P(x(\alpha)=0|y_f(\alpha))} \quad (2.15)$$

Veća vrijednost $\lambda(\alpha)$ iz (2.15) označava veću vjerovatnoću da je dati podnosilac α bio aktivan tokom prenosa. U svakom od OFDM podblokova, najvećih k vrijednosti $\lambda(\alpha)$ u skupu od n podnosilaca, označava k podnosilaca koji su bili odabrani za prenos na strani predaje. Nakon toga, rekonstrukcija prvih p_1 informacionih bita se dobija iz procijenjenih aktivnih indeksa, preko algoritma koji je suprotan onom koji je primijenjen na strani predajnika. Preostalih p_2 informacionih bita se otkriva kroz demodulaciju konstelacionih simbola na aktivnim podnosiocima.

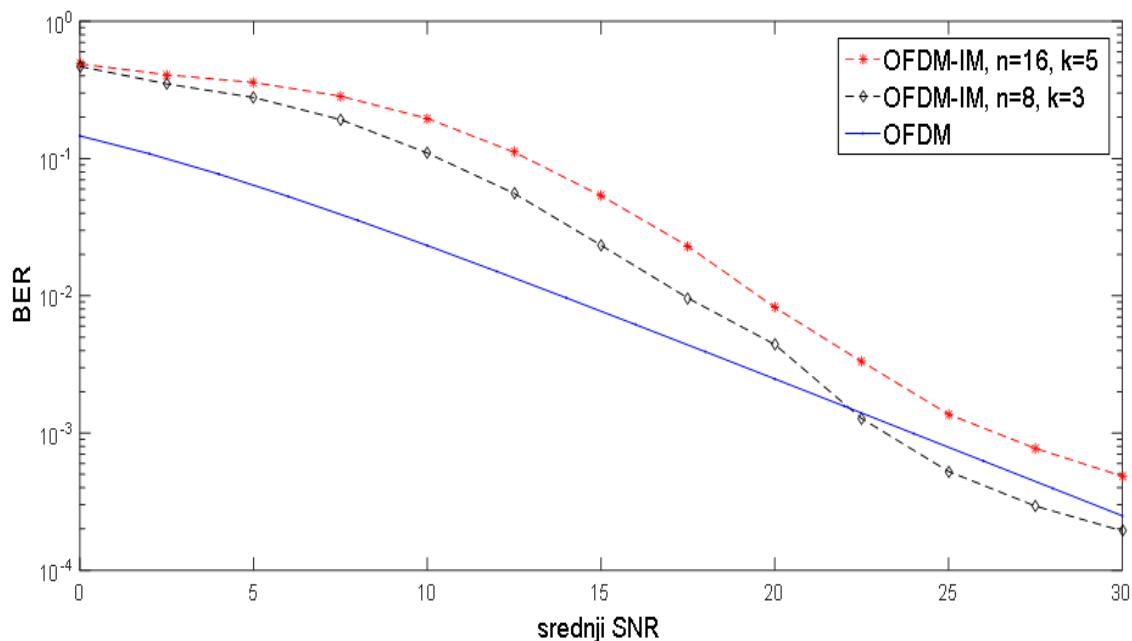
2.3.2 Analiza rezultata

U ovom poglavlju, data je ocjena performansi OFDM-IM sistema, po pitanju BER-a, dobijenih kroz kreirani simulacioni model. Aktivni podnosioci su modulirani BPSK modulacijom, uz različite parametre sistema, dok je na strani prijemnika implementiran opisani LLR detektor. Simulacije koje su predstavljene u nastavku podrazumijevaju idealno sinhronizovan OFDM-IM sistem. Rezultati su dobijeni kroz Monte Carlo simulacije,

korišćenjem Matlaba. Kako je pretpostavljena idealna vremenska i frekvencijska sinhronizacija, u razmatranje je uzet samo frekvencijski domen OFDM-IM sistema. Funkcije prenosa kanala podnosilaca su generisane kao nezavisne, cirkularno simetrične kompleksne Gausove slučajne promjenljive, nulte srednje vrijednosti (ili nenulte srednje vrijednosti za kanale sa Rice-ovim fadingom), varijanse $1/2$, tako da njihove magnitude imaju Rayleigh-ovu (Rice-ovu) raspodjelu. BER performanse su ispitane u zavisnosti od srednjeg SNR-a, odnosno srednje SNR vrijednosti na strani prijemnika, po svim podnosiocima.

Kako bismo uporedili performanse OFDM i OFDM-IM sistem, odabrane su konfiguracije ova dva sistema koje imaju istu, ili približno istu spektralnu efikasnost. Pretpostavljen je kanal sa Rayleigh-evim fadingom. Kod OFDM-IM sistema sa grupama od po $n=16$ podnosilaca ukupno i $k=5$ aktivnih podnosilaca za prenos, potrebno je 12 bita za odabir indeksa aktivnih podnosilaca, dok se 5 bita emituje preko konstelacionih simbola u svakoj od g grupa, što znači da se na ovaj način prenosi $g*17$ bita ukupno po OFDM-IM simbolu, dok se kod OFDM sistema $g*16$ bita po simbolu prenosi preko $g*16$ podnosilaca. Međutim, kako opisani OFDM-IM sistem koristi samo $g*5$ aktivnih podnosilaca po simbolu, to on omogućava više od 68% poboljšanje energetske efikasnosti [16], i to po cijenu lošijih BER performansi za niže vrijednosti srednjeg SNR-a.

OFDM-IM sistem sa grupama podnosilaca od $n=8$ i $k=3$, koristi 5 bita za selekciju indeksa aktivnih podnosilaca i 3 bita za kreiranje konstelacionih simbola koji se emituju, u svakoj od g grupa podnosilaca, što znači da u ovom sistemu prenosi $g*8$ bita po OFDM-IM simbolu ukupno, dakle jednako kao i u OFDM sistemu sa $g*8$ podnosilaca. U ovom slučaju OFDM-IM koristi samo $g*3$ podnosilaca za emitovanje simbola, tako da je njegova energetska efikasnost 62% bolja u odnosu na OFDM sistem [16].



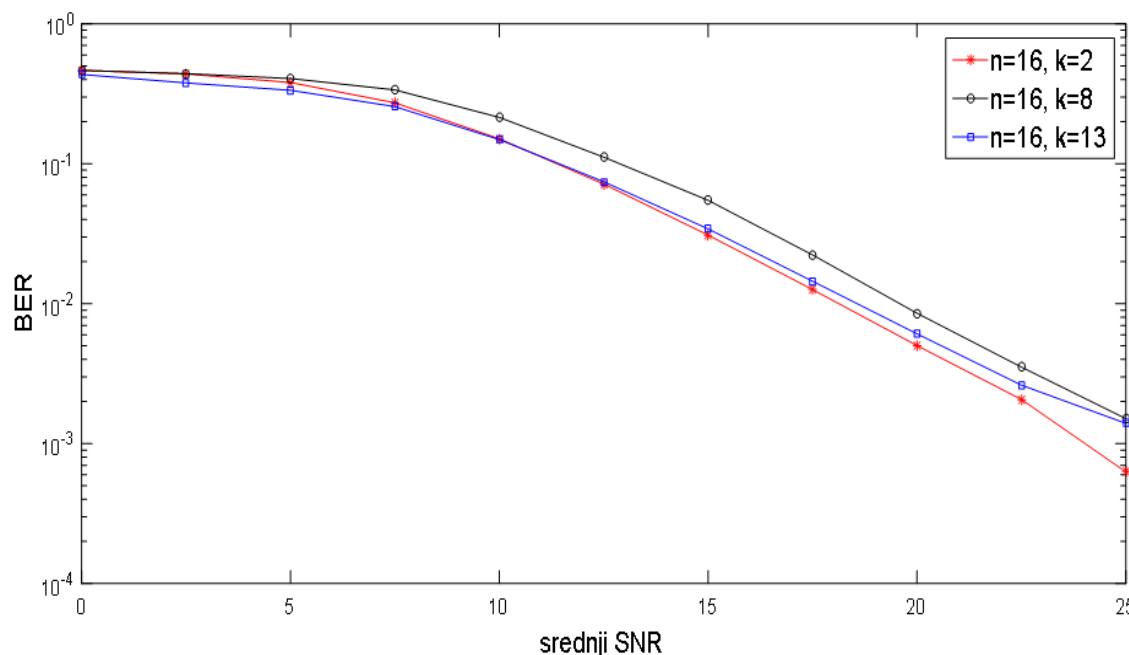
Slika 2.7. BER performanse OFDM-IM i OFDM sistema na kanalu sa Rayleigh-evim fedingom

Dobijeni simulacioni rezultati predstavljeni na slici 2.7, potvrđuju da klasični OFDM sistem postiže bolje BER performanse u poređenju sa OFDM-IM sistemom, kada su u pitanju niže vrijednosti srednjeg SNR-a. Ipak, evidentno je da sa povećanjem SNR vrijednosti, OFDM-IM pokazuje potencijal za unapređenje BER performansi. Primjetno je takođe da OFDM-IM konfiguracija sa $n=8$ i $k=3$ dostiže niže BER vrijednosti, nego OFDM sistem, za srednji SNR veći od 24 dB. Sa slike se može zaključiti i da vjerovatnoća greške po bitu bitno zavisi od konfiguracije samog sistema, odnosno od ukupnog broja podnosilaca u svakoj grupi (tj. od broja n), i broja aktivnih podnosilaca u svakoj grupi (tj. od broja k). Naime, rezultati pokazuju da OFDM-IM sistem koji je realizovan sa $n=16$ i $k=5$, ne dostiže OFDM performanse na cijelom prikazanom skupu vrijednosti srednjeg SNR-a, do 30 dB.

Sljedećom simulacijom se ispituje uticaj broja aktivnih podnosilaca na BER performanse OFDM-IM sistema. U tu svrhu, predstavljene su BER performanse u slučaju različitih konfiguracija OFDM-IM sistema, tj. za različite brojeve aktivnih podnosilaca ($k=2$, $k=8$ i $k=13$) u sistemu sa $n=16$ podnosilaca ukupno u svakoj od g grupa. Na kanalu je modelovana statistika Rayleigh-evog fedinga. Među razmotrenim sistemima, najveća spektralna efikasnost postiže se u slučaju sa $n=16$ i $k=13$. Konkretno, ovaj sistem koristi 9 bita za selekciju indeksa aktivnih podnosilaca u svakoj grupi, a 13 bita se u svakoj grupi prenosi kroz BPSK mapiranje simbola. Istovremeno, konfiguracija sistema sa $n=16$ i $k=2$ je ona koja među datim postiže najveću energetska efikasnost [16], kako koristi samo $g \cdot 2$ aktivnih

podnosilaca po OFDM-IM simbolu, dok se $g \cdot 6$ bita do prijemnika prenosi u vidu kombinacije aktivnih podnosilaca. Treća od pomenutih realizacija OFDM-IM sistema, koja je predstavljena parametrima $n=16$ i $k=8$, predstavlja svojevrsni kompromis između prethodna dva sistema. Kroz prenos $g \cdot 8$ bita za mapiranje simbola i $g \cdot 13$ bita po OFDM-IM simbolu za odabir aktivnih indeksa, postiže se relativno visoka spektralna efikasnost, i istovremeno povoljna energetska efikasnost, usljed aktiviranja samo polovine od dostupnih podnosilaca za prenos.

Sa slike 2.8 se jasno izvodi zaključak da najlošije BER performanse pokazuje sistem sa tačno 50% aktivnih podnosilaca ($k=8$, $n=16$), i to za cio prikazani opseg vrijednosti srednjeg SNR-a. Sa povećanjem ili smanjenjem broja aktivnih podnosilaca omogućava se poboljšanje BER-a. Tako, na primjer, sistem sa $k=8$ dostiže BER vrijednost od 10^{-2} , pri vrijednosti SNR-a, koja je za oko 1 dB veća nego kod ostala dva sistema čije se konfiguracije razmatraju u ovom primjeru.

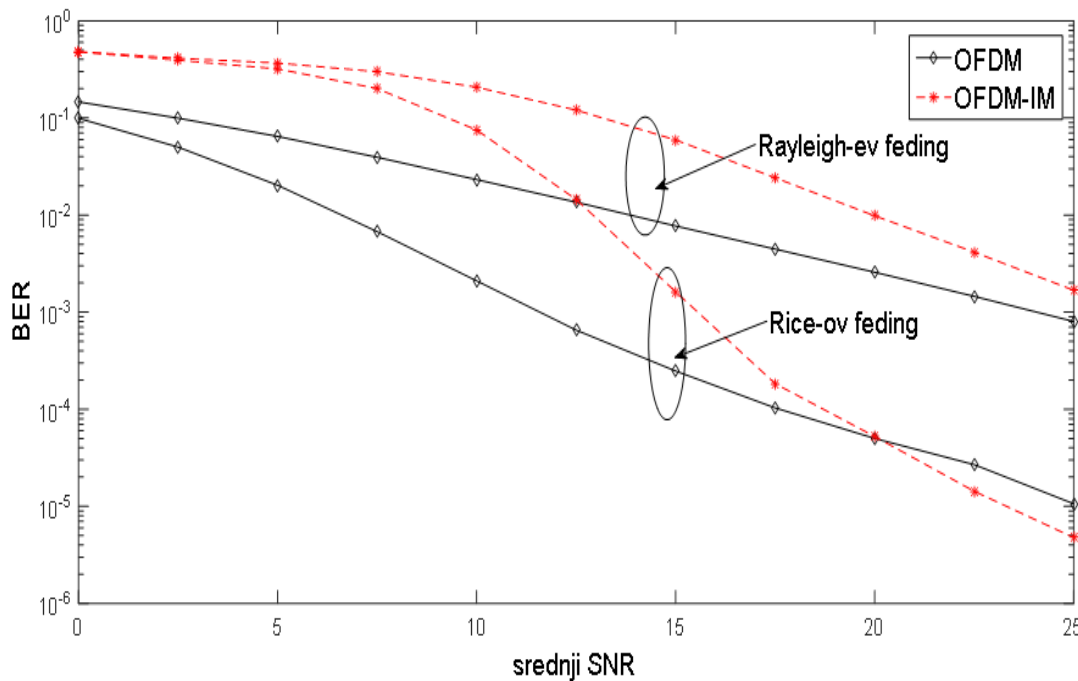


Slika 2.8. BER performanse OFDM-IM sistema sa različitim brojem aktivnih podnosilaca

Takođe je interesantno primijetiti da najbolje BER performanse, pri vrijednostima srednjeg SNR-a većim od 10 dB, ima sistem koji je ujedno i energetska najefikasniji (sa $k=2$), dok pri nižim vrijednostima srednjeg SNR-a, sistem koji je opisan kao spektralno najefikasniji među analiziranim, ostvaruje najmanje BER vrijednosti.

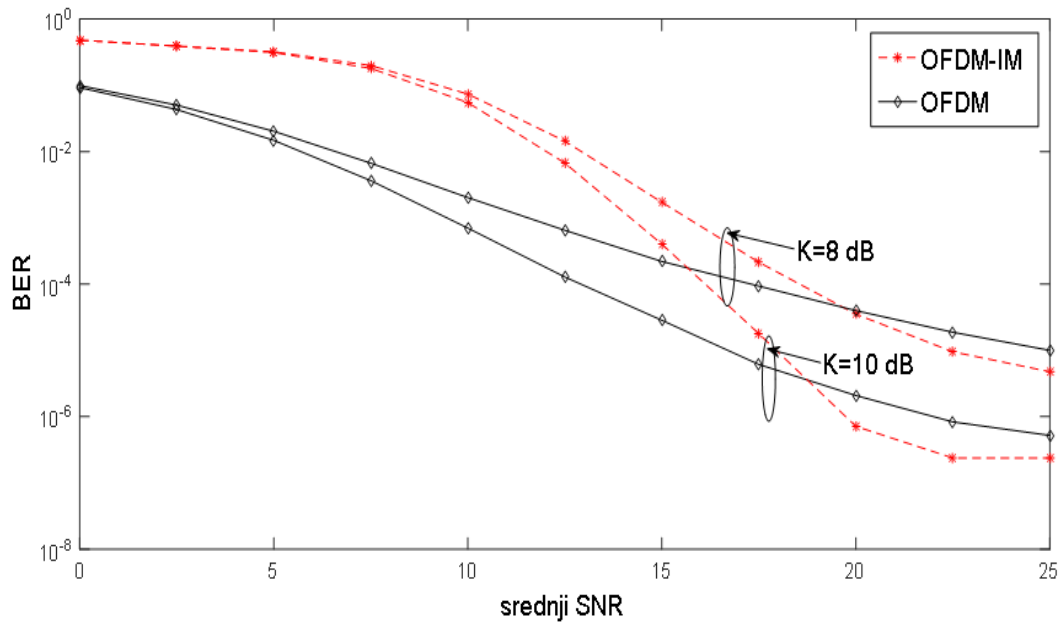
Slika 2.9 predstavlja BER performanse OFDM i OFDM-IM sistema na kanalima sa Rayleigh-evim i Rice-ovim fadingom. U slučaju kanala sa Rice-ovim fadingom, pretpostavljen je Rice-ov K faktor od 8 dB, a OFDM-IM sistem je realizovan sa konfiguracijom od $n=16$ i

$k=8$. Ako se dobijeni rezultati analiziraju, primjetno je da u scenariju sa modelovanim Rice-ovim fedingom na kanalu, OFDM-IM sistem prevazilazi BER performanse OFDM sistema za niže vrijednosti srednjeg SNR-a, u poređenju sa scenarijom sa Rayleigh-evim fedingom. Konkretno, OFDM sistem po pitanju BER-a pokazuje lošije rezultate od OFDM-IM sistema za vrijednosti SNR-a veće od 20 dB, u slučaju kanala sa Rice-ovim fedingom, dok se u slučaju kanala sa Rayleigh-evim fedingom taj preokret javlja za vrijednosti veće od 25 dB.



Slika 2.9. Poređenje BER performansi OFDM i OFDM-IM sistema na kanalima sa Rayleigh-evim i Rice-ovim fedingom

Na slici 2.10 su upoređene BER performanse OFDM i OFDM-IM sistema na kanalu sa Rice-ovim fedingom, i to za dva slučaja, sa primijenim Rice-ovim faktorom 8 dB i 10 dB. Analizirani OFDM-IM sistem ima $n=16$ podnosilaca ukupno, a $k=8$ aktivnih podnosilaca u svakog grupi. Kao što se moglo i očekivati, performanse vjerovatnoće greške po bitu kod oba sistema (OFDM i OFDM-IM) su značajno bolje u slučaju kada je K faktor jednak 10 dB. Na primjer, za BER vrijednosti od 10^{-5} , OFDM-IM sistem na kanalu sa Rice-ovim fedingom koji karakteriše K faktor od 8 dB, ima oko 5 dB lošije performanse, nego isti sistem na kanalu koji karakteriše K faktor od 10 dB. Takođe se može primijetiti da u scenariju sa $K=8$ dB, OFDM-IM prevazilazi OFDM sistem, kada je riječ o BER performansama, pri srednjem SNR-u većem od 20 dB, dok istovremeno za $K=10$ dB, OFDM-IM postiže isti BER kao OFDM sistem za srednji SNR od oko 19 dB.



Slika 2.10. BER performanse OFDM i OFDM-IM sistema na kanalu sa Rice-ovim fedingom

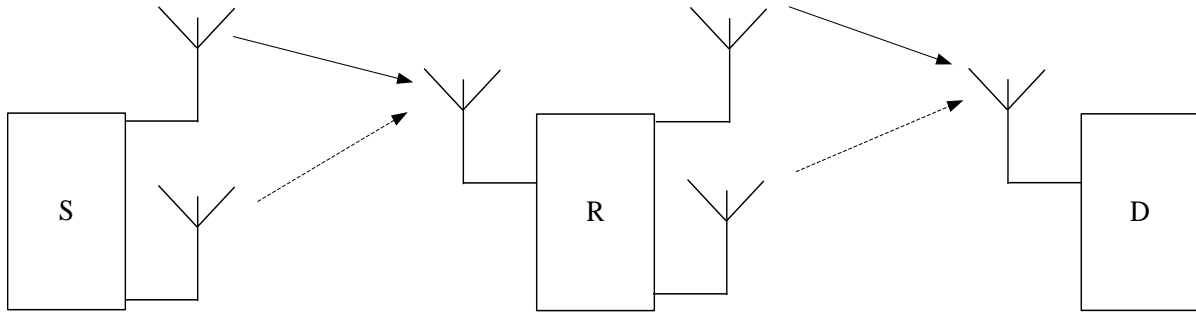
3. OFDM-IM relejni sistem

Ortogonalna frekvencijska modulacija (OFDM) je tehnika koja se iskristalisala kao najdominantnija tehnika prenosa preko više podnosilaca, pogotovo nakon implementacije mobilnih celularnih mreža četvrte generacije (4G), a zbog dobrih karakteristika predviđa se da će i u budućnosti tehnike zasnovane na ovom principu činiti rješenje za prenos u bežičnim komunikacionim sistemima. Ključna osobina ove modulacije, ortogonalnost, omogućava da podnosioci za prenos budu nezavisni, i da se ublaže, ili čak ponište efekti interferencije među kanalima (ICI), a istovremeno se usljed frekvencijskog preklapanja podnosilaca postiže visoka spektralna efikasnost [1]. Osim toga, nezavisnost podnosilaca donosi i mogućnost njihove nezavisne i različite obrade, što čitavom sistemu koji primjenjuje OFDM daje notu fleksibilnosti po pitanju dizajna. Ipak, i pored navedenih karakteristika, pokazano je da OFDM, čak ni uz primijenjene dodatne napredne tehnike primjene višestrukih antena na predaji i prijemu i kodove za detekciju i korekciju greške, nije u stanju da omogući zadovoljavajući kapacitet i kvalitet servisa za korisnike na velikoj udaljenosti od predajnika, ili u blizini granica pokrivenosti. Kao efikasno rješenje za povećanje dometa bežičnih komunikacionih sistema, kao i povećanje kapaciteta na ivicama oblasti pokrivanja, pokazao se koncept kooperativnih komunikacionih sistema. Kod kooperativnih komunikacionih sistema se na bazi koordinacije među djelovima sistema i međusobnom dijeljenju resursa, obezbjeđuje značajno poboljšanje pokrivenosti, brzine prenosa podataka, kapaciteta, spektralne efikasnosti i pouzdanosti linka [17]. Sistem relejnog prenosa je jedan od načina realizacije pomenutog koncepta, koji je kao rješenje usvojen i kod LTE-A standarda, i to upravo u svrhu povećanja dometa komunikacije, brzine prenosa i poboljšanja performansi na ivici ćelija. OFDM, kao rješenje za fizički sloj relejnih sistema, donosi mogućnosti ostvarivanja dodatnog unapređenja kapaciteta i performansi sa stanovišta vjerovatnoće greške po bitu, kroz korišćenje prenosa ortogonalnim podnosiocima, odnosno kroz odgovarajuće šeme mapiranja podnosilaca na relejnoj stanici [17]. Uz to, prednosti koje donose kooperativni sistemi sa jedne strane, i prostorna modulacija (SM) sa druge, uslovile su da kombinacija ova dva koncepta bude prepoznata kao moćan potencijalni kandidat za inkorporiranje u buduće bežične mreže [18]. Istraživanja su pokazala da je prostornu modulaciju moguće uspješno integrisati u mreže zasnovane na relejnim sistemima koje primjenjuju “dekodiraj-i-proslijedi” (DF- *Decode-and-Forward*) i “pojačaj-i-

proslijedi” (AF- *Amplify-and-Forward*) obradu podataka na relejnoj stanici, a protokoli dizajnirani za SM kooperativne sisteme obećavaju veći red diverzitija, veću pouzdanost i veće propusnosti sistema [19],[20]. Imajući na umu sve mogućnosti i prednosti indeks modulacije primijenjene na OFDM sisteme, izložene u prethodnom poglavlju, prirodno je razmišljati i u pravcu implementacije OFDM-IM tehnike na kooperativne sisteme. U [18], autori su detaljno izložili prednosti koje OFDM-IM može donijeti 5G sistemima, ističući pritom kao jedan od izazova budućih istraživanja primjenu tehnika indeks modulacije na kooperativne sisteme.

3.1 Predloženi model sistema

Kako je scenario OFDM „dekodiraj-i-proslijedi“ (DF) relejnih sistema sa dva hopa već usvojen u 4G sistemima, za proširivanje dometa i poboljšanje performansi za korisnike na ivicama ćelija [17], taj scenario je u ovom radu odabran za modelovanje, uz primjenu indeks modulacije. Ovakav kooperativni sistem, u kombinaciji sa IM, ima potencijal da omogući širok spektar servisa koji se očekuju od mreža nakon 5G, i to od energetske efikasne (usljed malog broja aktivnih podnosilaca koji se koriste) komunikacija širokog dometa, M2M (*Machine-to-Machine*) tipa, za različite IoT (*Internet of Things*) aplikacije, pa do spektralno efikasne i pouzdane komunikacije velikih brzina prenosa, za korisnike u blizini granica oblasti pokrivanja neke bazne stanice [21]. Osnovni cilj analize koja slijedi je steći predstavu o svojevrsnom kompromisu između degradacije BER performansi, usljed implementacije IM, i benefita koje ona donosi OFDM relejnim sistemima, u pogledu energetske i spektralne efikasnosti. U predloženom modelu, na OFDM DF relejnom sistemu sa dva hopa su istovremeno primijenjene indeks modulacija (IM) i prostorna modulacija (SM). Proces komunikacije između izvora informacija (S-*Source*) i destinacije (D-*Destination*) se odvija preko relejne stanice (R-*Relay*). R čvor sprovodi „dekodiraj-i-proslijedi“ obradu podataka, i pretpostavljeno je da i S i R posjeduju po dvije predajne antene, koje se koriste u skladu sa SM principom (Slika 3.1.).



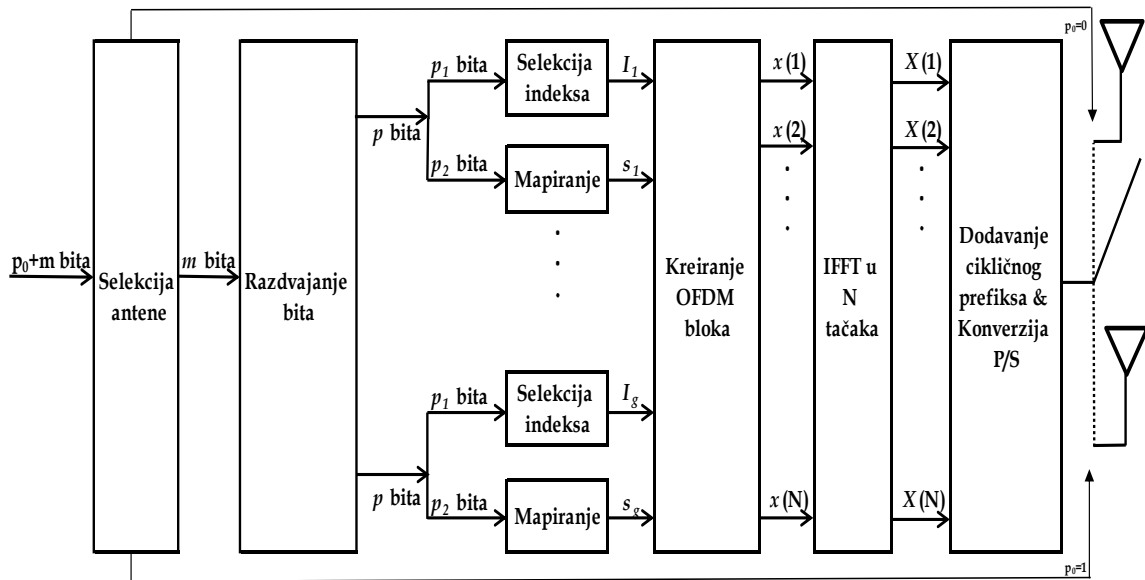
Slika 3.1 Analizirani relejni sistem sa dva hopa i SM

To onda znači da je potreban:

$$p_0 = \log_2(n_t) = 1 \quad (3.1)$$

bit za određivanje koja od $n_t=2$ predajne antene će biti korišćena tokom prenosa. Iz tog razloga, prvi bit informacione sekvence se koristi za određivanje predajne antene.

OFDM-IM modulacija je realizovana podjelom ukupnog broja od N podnosilaca u g grupa, sa po $n=N/g$ podnosilaca u svakoj grupi. Prvi bit informacione sekvence na ulazu je rezervisan za selekciju predajne antene, a sljedećih m bita se prvo dijeli na g grupa, od po p bita u svakoj grupi, tako da je $m=p \cdot g$.



Slika 3.2. Blok šema predajnika predloženog OFDM-IM-SM sistema

Nakon bloka za razdvajanje bita, u svakoj od g grana, p bita se još jednom dijeli na dvije grupe od po p_1 i p_2 bita, gdje je $p_1+p_2=p$. U svakoj grani, p_2 bita se mapira u M -arne signalne konstelacije, dok se p_1 bita šalje u blok za selekciju indeksa, gdje se na osnovu njih vrši selekcija

k aktivnih podnosilaca, koji će biti korišćeni za prenos M -arnih simbola. Broj bita koji se koristi za selekciju indeksa aktivnih podnosilaca u svakoj grani se može izračunati iz (2.3). Sa druge strane, broj bita koji se u svakoj grupi mapiraju u M -arne simbole dobija se preko (2.4).

Na nivou cijelog OFDM bloka, ovom šemom se prenosi ukupno:

$$p_0 + m = p_0 + g \cdot p = p_0 + g \cdot p_1 + g \cdot p_2 = p_0 + g \cdot \log_2(C(n, k)) + g \cdot k \cdot \log_2 M \quad (3.2)$$

bita.

Kreirani M -arni simboli se emituju preko aktivne antene i to na odabranim podnosiocima, dok ostali podnosioci tokom prenosa ostaju neaktivni, tj setovani su na nulu. Ovaj proces obavlja kreator OFDM bloka. U nastavku, izvodi se standardna OFDM modulacija, što znači da signal prolazi kroz IFFT u N tačaka, zatim kroz konverziju paralele u seriju (P/S) i dodavanje cikličnog prefiksa. Kod standardnog OFDM sistema, svih N podnosilaca je iskorišćeno za prenos podataka, dok se u slučaju sa primijenjom IM, set od $g \cdot k < N$ podnosilaca koristi za prenos podataka.

Blok selektora indeksa se može realizovati na dva načina, koja su već opisana u prethodnom poglavlju, uz upotrebu jednostavne *look-up* tabele koja se koristi i na strani prijemnika i na strani predajnika, ili preko primjene metoda kombinatorike brojeva, koji predstavlja mapiranje prirodnih brojeva u striktno opadajuću sekvencu aktivnih indeksa [7]. U slučaju kada se na predaji blok za selekciju indeksa realizuje preko *look-up* tabele, prijemnik se realizuje uz implementaciju ML detektora, jer je za njegovo funkcionisanje potrebno da posjeduje informaciju o svim mogućim kombinacijama aktivnih podnosilaca, odnosno njihovih indeksa. Sa druge strane, ako selekcija aktivnih indeksa primjenjuje metod kombinatorike brojeva, na strani prijema se koristi LLR detektor, koji za svaki podnosilac računa logaritamske odnose a-posteriori vjerovatnoće da je taj podnosilac tokom prenosa bio setovan na vrijednost različitu od nule, tj. da je tokom prenosa bio aktivan, i vjerovatnoće da je isti podnosilac tokom prenosa bio setovan na nulu.

Kako analizirani OFDM relejni sistem implementira prostornu modulaciju, i prvi bit sekvence koja se prenosi je iskorišćen za odabir aktivne predajne antene između dvije dostupne i na izvoru i na releju, to je prvi korak koji se obavlja na prijemu detekcija indeksa aktivne antene. Detekcija ovog indeksa se izvršava u skladu sa:

$$l = \arg \max \{ \mathbf{h}_l^H \mathbf{y} / \|\mathbf{h}_l\|_F^2 \}, \quad (3.3)$$

gdje je l indeks aktivne antene, \mathbf{h} kompleksni vektor kanala, a \mathbf{y} vektor primljenog signala. Hermitova transpozicija je označena sa $(\cdot)^H$ a sa $\|\cdot\|_F$ Frobenijusova norma [5]. Nakon što se na ovaj način odredi indeks aktivne antene, odnosno prvi bit informacione sekvence koja se

detektuje (p_0), nastavlja se proces detekcije p_1 bita određivanjem aktivnih OFDM podnosilaca, a zatim i detekcije preostalih p_2 informacionih bita kroz demodulaciju konstelacionih simbola emitovanih na aktivnim podnosiocima.

Čitav opisani proces se odvija nezavisno na prvom hopu, između S i R, a zatim opet na drugom hopu, između R i D.

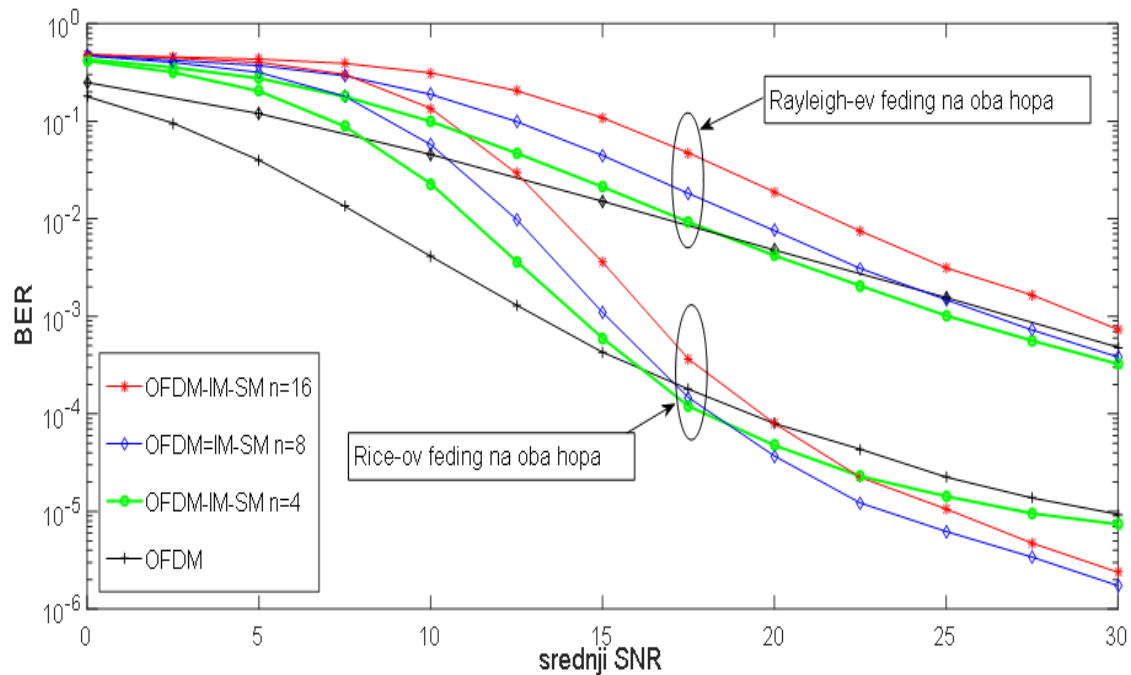
3.2 Analiza rezultata

Rezultati simulacija koji su predstavljani u nastavku daju BER performanse predloženog OFDM-IM-SM relejnog sistema sa dva hopa. Ovi rezultati su dobijeni na osnovu pretpostavke savršeno sinhronizovanog OFDM-IM-SM relejnog sistema, i to kroz Monte Carlo simulacije, sa nekorelisanim feding kanalima na dva hopa, kao i uz međusobno nekorelisana dva kanala na svakom hopu. U cilju međusobnog poređenja, prikazani su i rezultati BER performansi OFDM relejnih sistema sa dva hopa. Podnosioci su modulirani BPSK modulacijom, i pretpostavljene su iste vrijednosti srednjeg SNR-a na oba hopa, za sve sisteme koji su razmatrani.

Na slici 3.3 su date BER performanse OFDM i OFDM-IM-SM relejnih sistema, u komunikacionom scenariju sa Rayleigh-evim fedingom na oba hopa sistema. Istovremeno su prikazani rezultati dobijeni u scenariju sa Rice-ovim fedingom na oba hopa. U tom slučaju, pretpostavljen je Rice-ov K faktor od 8 dB.

Svi OFDM zasnovani relejni sistemi razmatrani u ovoj simulaciji, realizovani su sa $N=64$ podnosioca. Kod OFDM-IM-SM relejnih sistema, primijenjen je opisani koncept podjele podnosilaca u grupe [7]. Prva varijanta ovog sistema posjeduje $g_1=4$ grupe sa po $n_1=N/g_1=16$ podnosilaca u svakoj. Druga razmatrana varijanta je realizovana sa $g_2=8$ grupa, i $n_2=N/g_2=8$ podnosilaca u svakoj grupi, dok su kod treće varijante podnosioci podijeljeni u $g_3=16$ grupa sa po $n_3=N/g_3=4$ podnosioca.

U svrhu poređenja različitih konfiguracija OFDM-IM-SM relejnog sistema, po pitanju BER performansi i spektralne efikasnosti, broj aktivnih podnosilaca u svakom od sistema sa indeks modulacijom je odabran da bude jednak polovini od broja dostupnih podnosilaca u svakoj grupi, tako da je energetska efikasnost prikazanih sistema dovedena na isti nivo [16].



Slika 3.3. BER performanse OFDM-IM-SM relejnog sistema

Kod OFDM-IM-SM sistema, konfigurisanog tako da svaka od g_1 grupa sadrži $n=16$ podnosilaca, $k=8$ podnosilaca je aktivno tokom prenosa BPSK simbola. Spektralna efikasnost ovog relejnog sistema direktno je proporcionalna ukupnom broju bita koje prijemnik rekonstruiše iz pojedinačnog OFDM simbola, što je u ovom slučaju jednako p_0+m [21]. Uz korišćenje relacije (3.2) može se izračunati da prijemnik pomenutog OFDM-IM-SM sistema dobije 85 bita po simbolu, odnosno 1 bit preko indeksa aktivne antene, $g_1*8=4*8=32$ bita preko konstelacionih simbola koji su emitovani preko aktivnih podnosilaca i $g_1*13=4*13=52$ bita kroz selekciju indeksa aktivnih podnosilaca. Istovremeno, kod BPSK modulisanog OFDM relejnog sistema sa $N=64$ podnosioca, prijemnik iz svakog simbola rekonstruiše 64 bita, što dovodi do zaključka da je spektralna efikasnosti OFDM-IM-SM relejnog sistema sa $N=64$, $g_1=4$, $n_1=16$ i $k_1=8$, veća za oko 33% u poređenju sa OFDM relejnim sistemom sa $N=64$.

Drugi modelovani OFDM-IM-SM relejni sistem posjeduje $n=8$ podnosilaca u svakoj grupi, od kojih je $k=4$ aktivno tokom prenosa. Na isti način se dobija da ovaj sistem svakim simbolom emituje 81 bit, odnosno 1 bit kroz selekciju antene, $g_2*6=48$ bita kroz odabir aktivnih indeksa, i $g_2*4=32$ bita kroz BPSK mapiranje simbola, što znači da ovaj relejni sistem postiže više od 26% unaprijeđenu efikasnost u odnosu na OFDM relejni sistem.

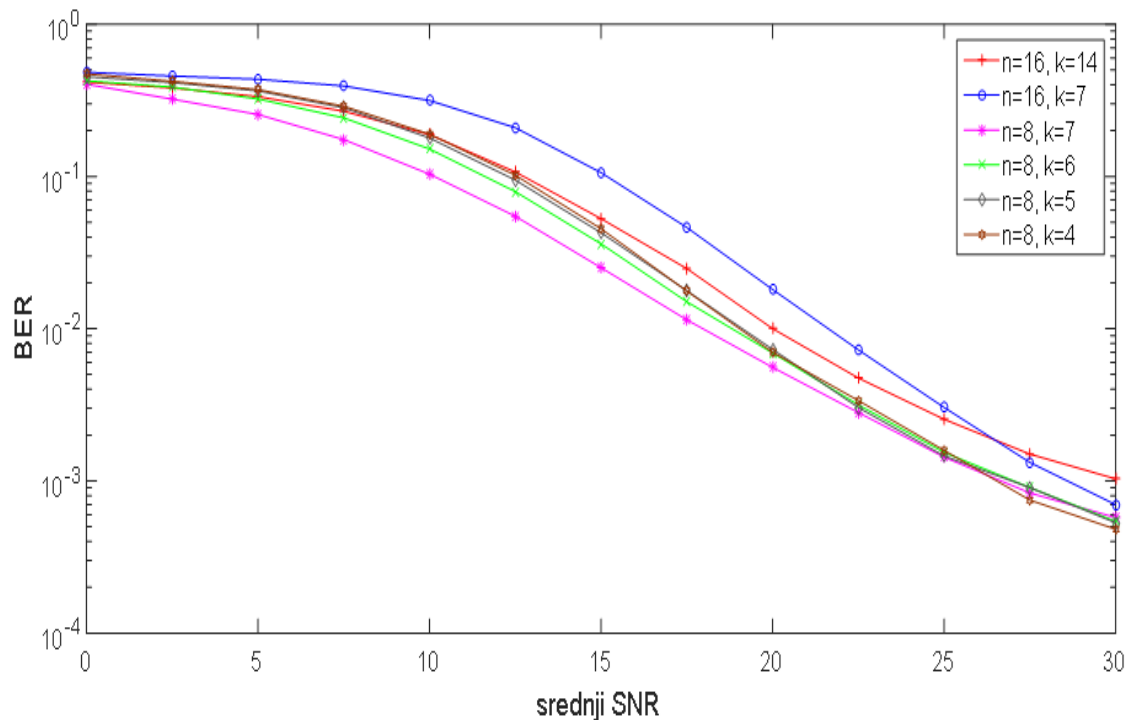
Treći modelovani OFDM-IM-SM relejni sistem, realizovan sa $n=4$ podnosioca u svakoj od g_3 grupa, od kojih je $k=2$ aktivnih, prenosi 65 bita od predajnika do prijemnika tokom svakog simbola. Naime, 1 bit se prenosi samim izborom antene za prenos, $g_3*2=32$ bita izborom

odgovarajućih aktivnih podnosilaca za prenos, i $g_3 \cdot 2 = 32$ bita konstelacionim simbolima na aktivnim podnosiocima, što u odnosu na klasični OFDM relejni sistem znači samo jedan bit više, odnosno unapređenje spektralne efikasnosti za oko 1.5%.

Sa slike 3.3 se jasno uočava da su sva pomenuta unapređenja spektralne efikasnosti postignuta implementacijom IM, a po cijenu lošijih BER karakteristika za male i srednje vrijednosti srednjeg SNR-a, u odnosu na OFDM relejni sistem. Takođe, u dijelu malih i srednjih vrijednosti srednjeg SNR-a, među indeks modulisanim sistemima, BER performanse su primjetno uslovljene veličinom grupa podnosilaca, tj. sistemi kod kojih su podnosioci grupisani u manje grupe, pokazuju bolje BER performanse. Sa povećanjem vrijednosti SNR-a, razlika po pitanju BER-a među ovim sistemima se smanjuje, da bi uz dalje povećanje vrijednosti SNR-a, bolje BER performanse dostigli sistemi sa većim grupama podnosilaca. Posmatranjem dobijenih BER rezultata svih sistema obuhvaćenih ovom analizom, može se primijetiti i da u slučaju scenarija sa Rice-ovim fadingom na oba hopa, indeks modulisani OFDM relejni sistemi prevazilaze, po pitanju BER-a, OFDM relejni sistem pri manjim SNR vrijednostima. Tako je, na primjer, u ovom scenariju, klasični OFDM relejni sistem prevaziđen po pitanju BER performansi od strane sistema sa indeks modulacijom sa $n=16$, $n=8$ i $n=4$, pri vrijednostima srednjeg SNR-a od 20 dB, 17 dB i 16 dB, respektivno. Sa druge strane, u scenariju sa Rayleigh-evim fadingom na oba hopa, OFDM relejni sistem zadržava bolje BER performanse od OFDM-IM-SM relejnog sistema sa $n=16$ za cijeli predstavljeni opseg SNR vrijednosti, tj. do 25 dB, dok ga OFDM-IM-SM relejni sistemi sa $n=8$ i $n=4$ prevazilaze pri vrijednostima srednjeg SNR-a od 25 dB odnosno 18.5 dB, respektivno. Posmatranjem oblika BER krive, zaključuje se da i indeks modulisani sistem sa $n=16$ dostiže performanse OFDM relejnog sistema, za SNR veći od 30 dB. Zaključuje se, da OFDM-IM-SM relejni sistemi omogućavaju unapređenje spektralne efikasnosti i BER karakteristika, u odnosu na klasični OFDM relejni sistem, pri većim vrijednostima srednjeg SNR-a, a po cijenu slabijih BER performansi u uslovima malih i srednjih vrijednosti srednjeg SNR-a, i to u situaciji kada je za prenos aktivirano samo pola od dostupnih OFDM podnosilaca, odnosno kada je energetska efikasnost bolja za 50% u odnosu na OFDM relejni sistem [16].

Sljedeća analiza, čiji su rezultati prikazani na slici 3.4, daje međusobno poređenje BER performansi različitih realizacija relejnog OFDM-IM-SM sistema sa dva hopa. Različite realizacije podrazumijevaju različite kombinacije ukupnog broja podnosilaca i broja aktivnih podnosilaca u svakoj od grupa, a odabrane su tako da se porede sistemi koji imaju istu spektralnu efikasnost, tj. sistemi koji sa svakim simbolom prenose isti broj bita. Konkretno, svi sistemi uključeni u analizu imaju $N=64$ podnosilaca, i svi kroz odabir antene i podnosilaca za

prenos, kao i mapiranje konstelacionih simbola, ukupno emituju 81 bit, a to znači da ovi sistemi, u odnosu na klasični OFDM relejni sistem, postižu 26% bolju spektralnu efikasnost. Osim što različite konfiguracije OFDM-IM-SM relejnih sistema sa istim brojem podnosilaca i istom spektralnom efikasnošću, dovode do različitih BER karakteristika ovih sistema, one u isto vrijeme postižu i različite energetske efikasnosti, usljed različitog broja podnosilaca aktivnih za prenos [16]. Analiza podrazumijeva Rayleigh-ev fading na oba hopa svih sistema.



Slika 3.4. BER performanse različitih konfiguracija OFDM-IM-SM relejnog sistema

Na slici 3.4. je prikazano 6 konfiguracija OFDM-IM-SM relejnih sistema, koje karakteriše jednaka spektralna efikasnost. Konkretno, broj bita koji se u okviru jednog simbola prenose od predajnika do prijemnika, na osnovu (3.2) je:

1. $N=64, g=4, n=16, k=14 \Rightarrow p_0+g \cdot p_1+g \cdot p_2 = 1+24+56=81$
2. $N=64, g=4, n=16, k=7 \Rightarrow p_0+g \cdot p_1+g \cdot p_2 = 1+52+28=81$
3. $N=64, g=8, n=8, k=7 \Rightarrow p_0+g \cdot p_1+g \cdot p_2 = 1+24+56=81$
4. $N=64, g=8, n=8, k=6 \Rightarrow p_0+g \cdot p_1+g \cdot p_2 = 1+32+48=81$
5. $N=64, g=8, n=8, k=5 \Rightarrow p_0+g \cdot p_1+g \cdot p_2 = 1+40+40=81$
6. $N=64, g=8, n=8, k=4 \Rightarrow p_0+g \cdot p_1+g \cdot p_2 = 1+48+32=81$.

Sa slike se uočava da na čitavom prikazanom SNR opsegu, bolje BER performanse pokazuju sistemi kod kojih su podnosioci podijeljeni u manje grupe, tj. u grupe od 8 podnosilaca. Na primjer, ako se uporede sistem sa $n=16, k=14$ i sistem sa $n=8, k=7$, koji osim spektralne

efikasnosti, imaju jednake i energetske efikasnosti, jer se kod oba sistema od $N=64$ podnosilaca ukupno, za prenos aktivira ukupno 56, jasno je vidljivo da za sve prikazane BER vrijednosti, sistem sa više manjih grupa podnosilaca ima skoro konstantan SNR dobitak od 2 dB. Konkretno, vrijednost greške po bitu od 10^{-2} sistem sa $n=8$ i $k=7$ dostiže za srednji SNR od 18 dB, a sistem sa $n=16$ i $k=14$, za srednji SNR od 20 dB.

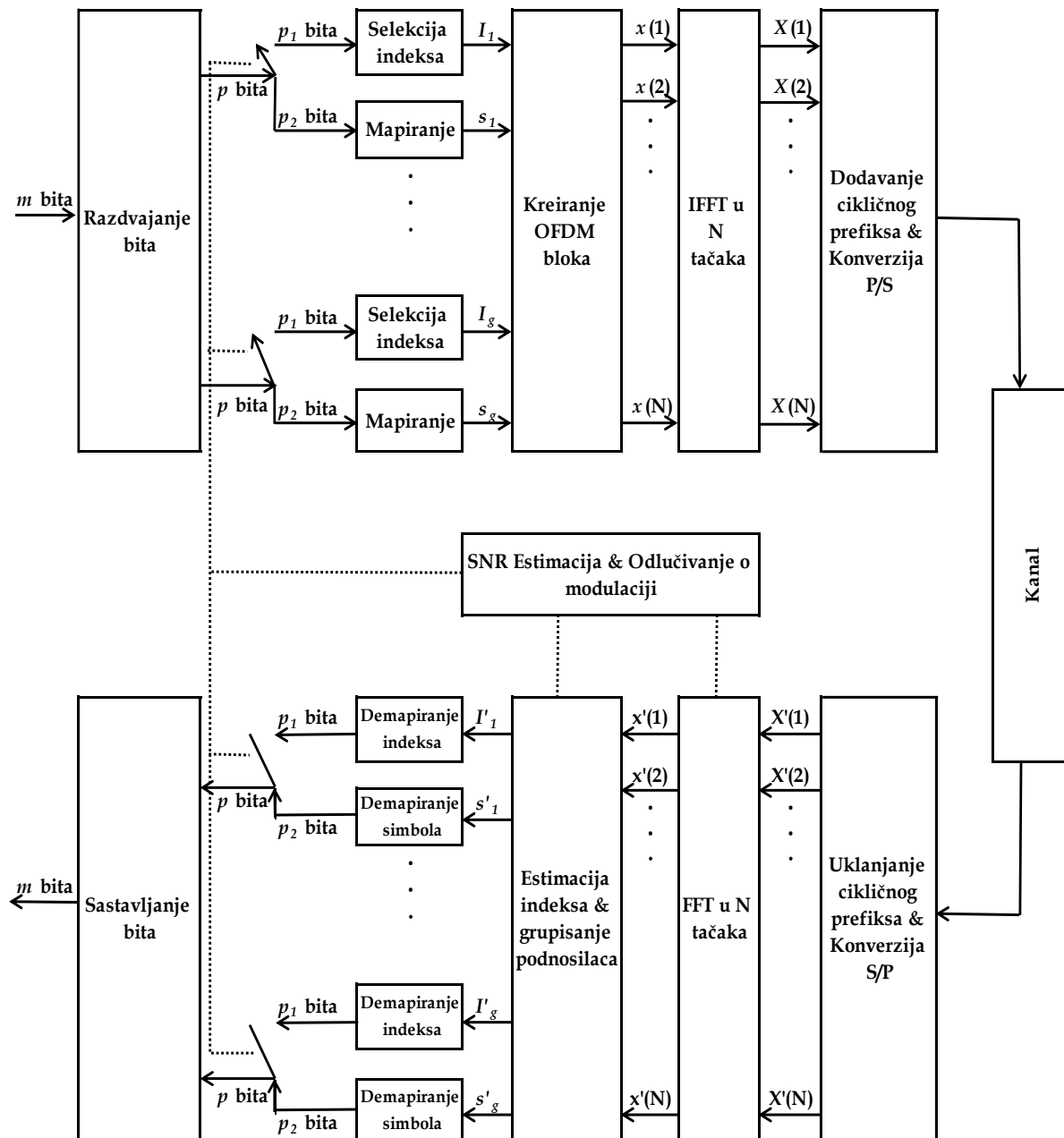
Takođe, sa slike 3.4 se zaključuje da među sistemima sa jednakim grupama podnosilaca, na opsegu nižih i srednjih vrijednosti srednjeg SNR-a, najbolje BER performanse pokazuju oni kod kojih je za prenos aktivirano najviše podnosilaca. Tako je sistem sa $n=16$ i $k=14$ povoljniji po pitanju BER-a u odnosu na sistem sa $n=16$ i $k=7$, za vrijednosti SNR-a do 26 dB, dok za vrijednosti iznad 26 dB, bolje performanse ima sistem sa 7 aktivnih podnosilaca, koji je ujedno i duplo efikasniji kada se radi energetske efikasnosti. Na sličan način, među sistemima kod kojih su podnosioci podijeljeni u grupe od po 8 podnosilaca, za niže i srednje vrijednosti srednjeg SNR-a, najbolje BER performanse pokazuje sistem sa najviše aktivnih podnosilaca, tj. sistem sa $n=8$ i $k=7$. Kao i u prethodnom slučaju, za veće SNR vrijednosti, iznad 25 dB konkretno, sva tri preostala sistema sa $n=8$ ga dostižu i prestižu, sa vidljivom tendencijom da sa daljim povećanjem SNR-a, najbolje BER performanse ostvaruje energetski najefikasniji sistem, tj. onaj sa najmanje aktivnih podnosilaca.

4. Hibridni OFDM-IM sistem

Već je pokazano da OFDM-IM modulaciona tehnika ima potencijal da donese poboljšanja u pogledu spektralne i energetske efikasnosti u odnosu na klasični OFDM sistem, i to eksploatacijom koncepta indeks modulacije. Različita istraživanja su se bavila analizom BER performansi pomenutog sistema, pri različitim komunikacionim scenarijima, i većina njih stavlja akcenat na superiornost OFDM-IM u odnosu na OFDM, po pitanju BER-a, za veće SNR vrijednosti [7], [22], [23], [24]. Međutim, nedovoljno je pažnje posvećeno slabijim BER performansama OFDM-IM sistema pri nižim SNR vrijednostima. Ova činjenica je i bila motiv za predlaganje hibridnog OFDM-IM sistema, za slučaj kada je BER performansa od interesa [25]. Suština hibridnog sistema leži u kombinovanju klasičnog OFDM i OFDM-IM sistema, u cilju minimizovanja BER-a. Konkretno, način prenosa kod ovako postavljenog sistema se bira između pomenute dvije tehnike modulacije, i to u zavisnosti od prosječne SNR vrijednosti na strani prijemnika, što znači da bi se u uslovima nižih vrijednosti SNR-a za prenos koristila klasična OFDM tehnika, a pri većim vrijednostima SNR-a, OFDM-IM tehnika. Na taj način, iskoristile bi se dokazane prednosti oba pojedinačna sistema. Prelazak sa jednog na drugi mod prenosa izvršavao bi se kroz komunikaciju predajnika i prijemnika, a u zavisnosti od trenutnih uslova na kanalu. Ipak, kako ovaj sistem podrazumijeva implementaciju OFDM i OFDM-IM sistema, u slučajevima kada bi optimizovanje neke druge performanse, a ne BER-a, postalo prioritet, hibridni sistem bi se lako mogao podesiti da koristi samo jedan vid prenosa - OFDM, u cilju smanjenja kompleksnosti demodulacije, ili OFDM-IM, u cilju povećanja energetske ili spektralne efikasnosti [25]. Dodatno, povoljni uslovi na kanalu, kada se koristi OFDM-IM modulacija, dozvoljavaju da se u proces prenosa informacije uključi i dodatna promjenjiva, a to je broj aktivnih podnosilaca. OFDM-IM tehniku je moguće generalizovati na način da ovaj parametar nije predefinisiran i fiksiran na tačno jednu vrijednost, već je moguće ograničiti ga na skup dozvoljenih vrijednosti, a izbor jedne od ovih vrijednosti bi se na nivou svake grupe podnosilaca vršio direktno, u zavisnosti od ulazne sekvence bite, što znači da ova selekcija može biti dodatni vid prenosa podataka [24].

4.1 Predloženi model sistema

Na slici 4.1 prikazana je blok šema primopredajnika predloženog hibridnog OFDM-IM sistema.



Slika 4.1 Blok šema primopredajnika predloženog hibridnog OFDM-IM sistema

Kao i u slučaju OFDM-IM sistema, biti sa ulaza predajnika se na startu dijele na g grupa od po p bita, tako da je $m=g \cdot p$ [7]. Posmatrani sistem, kao hibridni, ima dva načina na koja može funkcionisati. Konkretno, na strani predaje se bira implementacija OFDM ili OFDM-IM tipa modulacije za svaki vremenski slot, i to u zavisnosti od trenutnog stanja na kanala. Stanje na kanalu se u ovom slučaju odnosi na srednju SNR vrijednost za sve podnosioce na strani prijemnika. Broj OFDM simbola tokom vremenskog slota je sistemski parametar, koji je uslovljen odnosnom koherentnog vremena kanala i trajanja OFDM simbola.

Kada je srednja vrijednost SNR-a na strani prijema niža od predefinisane vrijednosti praga, svi informacioni biti u svim granama se prosljeđuju na blok za mapiranje, gdje se u nastavku mapiraju u M -arne simbolne konstelacije. U ovom slučaju, blok za selekciju indeksa se uopšte ne koristi. Cio sistem raspolaže sa N podnosilaca, koji su podijeljeni na g grupa, sa po n podnosilaca u svakoj grupi, tako da je $N=g \cdot n$. To znači da se svakoj grupi podnosilaca za prenos dodjeljuje:

$$p = p_2 = \log_2(M) \cdot n \quad (4.1)$$

bita. Na nivou cijelog OFDM simbola, do prijemnika se prenosi:

$$m = g \cdot p = g \cdot \log_2(M) \cdot n = \log_2(M) \cdot N \quad (4.2)$$

bita.

U drugom slučaju, kada je srednji SNR veći od zadate vrijednosti praga, p bita se dijeli na dva dijela od po p_1 i p_2 bita, koji se dalje prosljeđuju na blok za selekciju indeksa i blok za mapiranje, respektivno. U nastavku procesa se izvodi već opisana procedura OFDM-IM modulacije, što znači da se informacija prenosi od predajnika do prijemnika osim preko M -arnih simbola, i putem selekcije odgovarajućih indeksa podnosilaca za prenos tih simbola [22]. Kada je, na osnovu uslova na kanalu, za prenos odabrana OFDM-IM modulacija, ukupan broj bita koji se sistemom prenosi po simbolu je:

$$m = g \cdot p = g \cdot (p_1 + p_2) = g \cdot (\log_2(C(n, k)) + \log_2(M) \cdot k). \quad (4.3)$$

Poređenjem (4.2) i (4.3), jasno je da kod hibridnog OFDM-IM sistema prijemnik dobija različit broj informacionih bita po simbolu preko dva različita moda funkcionisanja, a samo u specijalnom slučaju kada je:

$$\log_2(M) \cdot n = \log_2(C(n, k)) + \log_2(M) \cdot k, \quad (4.4)$$

prijemnik iz simbola koje dobije preko obje modulacione tehnike, rekonstruiše istu količinu informacija. Nakon bloka za mapiranje, kreirani M -arni simboli se prenose preko odgovarajućih podnosilaca iz svake grupe.

Ako je odabran OFDM način prenosa, svi podnosioci su aktivirani za prenos, i N konstelacionih simbola se šalje po OFDM simbolu, preko $n \cdot g$ podnosilaca. Sa druge strane, kada sistem funkcioniše kao OFDM-IM, $k \cdot g$ M -arnih simbola se prenosi po OFDM-IM simbolu, i to preko $k \cdot g$ podnosilaca aktiviranih od strane bloka za selekciju indeksa, dok se preostali podnosioci setuju na nultu vrijednost. Nakon kreiranja OFDM bloka, signal prolazi kroz uobičajeni proces IFFT u N tačaka, zatim kroz P/S konverziju i dodavanje cikličnog prefiksa. Kod opisanog modela sistema, estimacija kanala (SNR estimacija) nije implementirana na strani prijemnika, već je pretpostavljeno da su karakteristike kanala poznate na strani prijema. Koristeći ovo znanje, prijemnik donosi odluku o tipu demodulacije koja će biti primijenjena, i obezbjeđuje povratnu informaciju predajniku, za određivanje tipa modulacije.

Na strani prijemnika, nakon uklanjanja cikličnog prefiksa, S/P konverzije, i FFT transformacije, vrši se odlučivanje o načinu prenosa, na bazi srednje SNR vrijednosti. Kada je srednji SNR niži od predefinisane praga, demodulacija se obavlja na klasični OFDM način, tj. konstelacioni simboli na svim podnosiocima se demodulišu i otkriva se p informacionih bita. U drugom mogućem slučaju, kada srednji SNR ima vrijednost veću od postavljenog praga, u sklopu OFDM-IM demodulacije, prvo se vrši detektovanje indeksa aktivnih podnosilaca i otkrivanje prvih p_1 bita informacione sekvence, a zatim demodulisanje konstelacionih simbola na aktivnim podnosiocima, i otkrivanje preostalih p_2 bita informacione sekvence [22].

4.2 Generalizovani OFDM-IM

OFDM-IM modulacija, kao integralni dio hibridnog sistema, kroz korišćenje mapiranja informacionih bita u kombinaciju aktivnih podnosilaca kao dodatne dimenzije prenosa podataka, može imati i bolju spektralnu efikasnost od standardne OFDM modulacije, takođe implementirane u hibridni sistem [7]. Iz tog razloga, u situacijama kada srednja SNR vrijednost nije na nivou koji bi omogućio funkcionisanje sistema u OFDM-IM modu, spektralna efikasnost cijelog sistema biva ograničena, u cilju optimizacije BER performansi. Sa druge strane, kada je stanje kanala povoljno, i srednja SNR vrijednost iznad praga koji uslovljava korišćenje OFDM-IM modulacije, postoji mogućnost uvođenja dodatne dimenzije za prenos informacionih bita od predajnika do prijemnika. U [24] je predložena šema nazvana OFDM-GIM1 (OFDM sa generalizovanom IM), koja podrazumijeva da, za razliku od OFDM-IM, broj

aktivnih podnosilaca nije neophodno konstantan. Na taj način, pored selekcije indeksa podnosilaca za prenos i mapiranja konstelacionih simbola, odabir broja aktivnih podnosilaca predstavlja vid prenosa dodatnih bita. Set mogućih brojeva aktivnih podnosilaca $\mathbf{K}=\{K_1, K_2, \dots, K_r\}$ je unaprijed predefinisano, što znači da postoji R dozvoljenih mogućnosti broja aktivnih podnosilaca OFDM-IM sistema. Kako su OFDM podnosioci ovog sistema u startu podijeljeni u g grupa, a svaka grupa nezavisno prenosi jedan dodijeljeni dio informacije sa predaje, implementacija pomenute šeme znači i da će broj aktivnih podnosilaca u svakoj od grupa biti različit. Na nivou jedne grupe, prema [24], broj bita koji se može emitovati uzimanjem u obzir svih $K_r \in \mathbf{K}$ je:

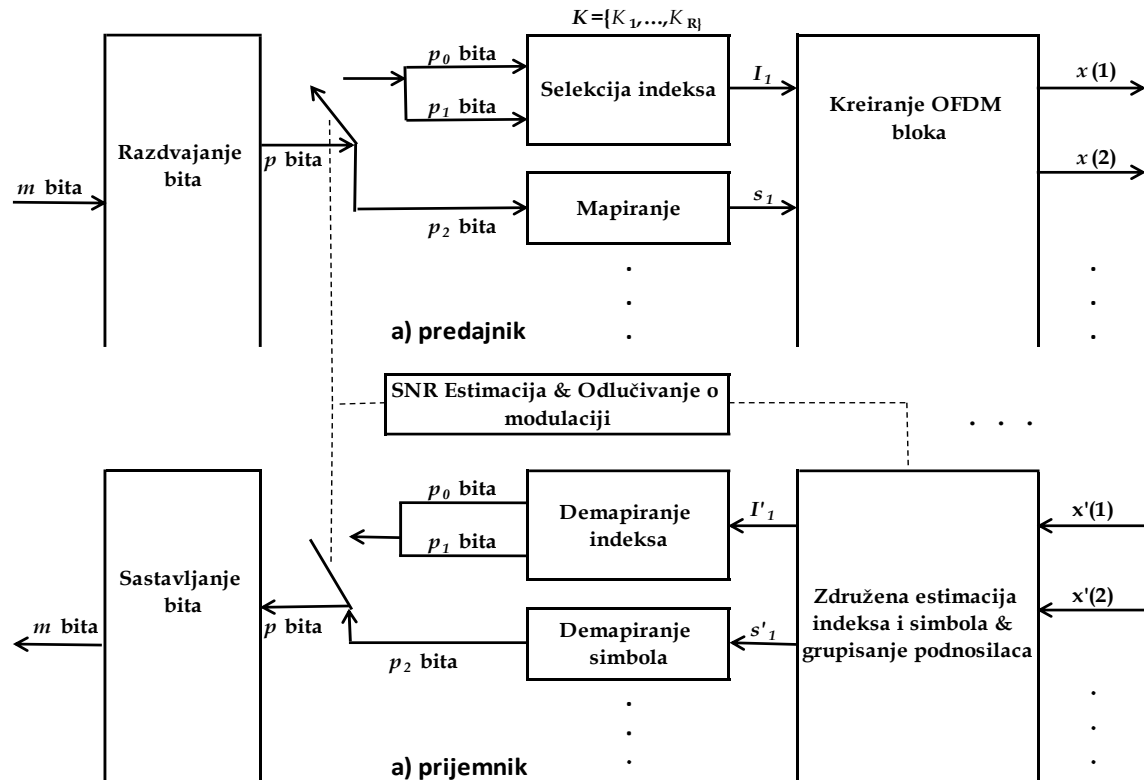
$$\sum_{K_r \in \mathbf{K}} B_r^g = \lfloor \log_2(\sum_{K_r \in \mathbf{K}} M^{K_r} C_n^{K_r}) \rfloor \quad (4.5)$$

Uz nešto jednostavniju primjenu ideje o fleksibilnosti broja aktivnih podnosilaca, OFDM-IM mod hibridnog sistema može birati odgovarajući K_r iz seta $\mathbf{K}=\{K_1, K_2, \dots, K_R\}$, direktno na osnovu ulaznih informacionih bita. Broj bita koji se može mapirati na ovaj način, u svakoj od g grupa podnosilaca bi bio:

$$p_0 = \log_2(R), \quad (4.6)$$

gdje je R veličina skupa \mathbf{K} . Dakle, pri aktivnom OFDM-IM modu hibridnog sistema, u svakoj od grupa podnosilaca, prvih p_0 bita informacione sekvence bi se moglo iskoristiti za odabir broja podnosilaca za prenos u selektoru indeksa, a nakon toga bi p_1 bita, takođe kroz selektor indeksa, odredilo konkretne indekse aktivnih podnosilaca, na kojima bi se zatim emitovalo p_2 bita kroz M -arne konstelacione simbole. Dodatno unaprijeđena spektralna efikasnost postigla bi se na ovaj način, i to bez eksploatacije dodatnih resursa. Članovi skupa \mathbf{K} , odnosno moguće vrijednosti broja aktivnih podnosilaca, mogu se izabrati na način da primjenom svakog od njih, broja bita p koji se prenosi u svakoj od grupa, bude konstantan, dok god sistem funkcioniše na OFDM-IM način, odnosno:

$$\log_2(C(n, K_1) + \log_2(M) \cdot K_1) = \log_2(C(n, K_2) + \log_2(M) \cdot K_2) = \dots = \log_2(C(n, K_r) + \log_2(M) \cdot K_r) \quad (4.7)$$



Slika 4.2. Modifikacija šeme predajnika i prijemnika za OFDM-IM sa varijabilnim brojem podnosilaca

Kao primjer funkcionisanja OFDM-IM modulacije sa fleksibilnim brojem aktivnih indeksa, može se uzeti sistem sa parametrima iz poglavlja 3, odnosno sa $N=64$ podnosioca ukupno, podijeljena u $g=8$ grupa, sa po $n=8$ podnosilaca u svakoj, i BPSK mapiranjem. U grupi od $n=8$ podnosilaca, na osnovu (2.3) i (2.4), moguće je broj podnosilaca odabrati iz skupa od 4 vrijednosti, tako da broj bita koji se prenosi od predajnika do prijemnika bude jednak u svakom od tih slučajeva, dok variraju broj bita koji se sadrži u selekciji kombinacije podnosilaca za prenos i broj bita koji se prenosi preko konstelacionih simbola:

1. $n=8, k=7 \Rightarrow p_1 + p_2 = 3 + 7 = 10$
2. $n=8, k=6 \Rightarrow p_1 + p_2 = 4 + 6 = 10$
3. $n=8, k=5 \Rightarrow p_1 + p_2 = 5 + 5 = 10$
4. $n=8, k=4 \Rightarrow p_1 + p_2 = 6 + 4 = 10$

Dakle, u ovom primjeru, skup mogućih vrijednosti broja aktivnih indeksa se može definisati kao $K=\{4,5,6,7\}$, pa se kroz odabir jednog od elemenata ovog skupa, pri svakoj iteraciji prenosa, mogu emitovati dodatna 2 bita (vidjeti 4.6) u svakoj od grupa, što bi spektralnu efikasnost u konkretnom primjeru uvećalo za 20%.

U tabeli 4.1 prikazan je šablon aktiviranja podnosilaca za prenos, u zavisnosti od ulaznih informacionih bita, konkretno p_0 i p_1 bita, na osnovu kojih se u sklopu za selekciju indeksa određuje broj aktivnih indeksa, a zatim i sami indeksi.

Tabela 4.1. Šema aktiviranja podnosilaca za prenos u primjeru sa $n=8$ i $k \in (4,5,6,7)$

po biti	broj aktivnih indeksa	p1 biti		aktivni indeksi		Podblok
00	$k=4$	000000	$p_1=6$	{1,2,3,4}	$p_2=4$	{s(1) s(2) s(3) s(4) 0 0 0 0}
00		000001		{1,2,3,5}		{s(1) s(2) s(3) 0 s(4) 0 0 0}
...	
00		111110		{4,6,7,8}		{0 0 0 s(1) 0 s(2) s(3) s(4)}
00		111111		{5,6,7,8}		{0 0 0 0 s(1) s(2) s(3) s(4)}
01	$k=5$	00000	$p_1=5$	{1,2,3,4,5}	$p_2=5$	{s(1) s(2) s(3) s(4) s(5) 0 0 0}
01		00001		{1,2,3,4,6}		{s(1) s(2) s(3) s(4) 0 s(5) 0 0}
...	
01		111110		{3,5,6,7,8}		{0 0 s(1) 0 s(2) s(3) s(4) s(5)}
01		111111		{4,5,6,7,8}		{0 0 0 s(1) s(2) s(3) s(4) s(5)}
10	$k=6$	0000	$p_1=4$	{1,2,3,4,5,6}	$p_2=6$	{s(1) s(2) s(3) s(4) s(5) s(6) 0 0}
10		0001		{1,2,3,4,5,7}		{s(1) s(2) s(3) s(4) s(5) 0 s(6) 0}
...	
10		1110		{2,4,5,6,7,8}		{0 s(1) 0 s(2) s(3) s(4) s(5) s(6)}
10		1111		{3,4,5,6,7,8}		{0 0 s(1) s(2) s(3) s(4) s(5) s(6)}
11	$k=7$	000	$p_1=3$	{1,2,3,4,5,6,7}	$p_2=7$	{s(1) s(2) s(3) s(4) s(5) s(6) s(7) 0}
11		001		{1,2,3,4,5,6,8}		{s(1) s(2) s(3) s(4) s(5) s(6) 0 s(7)}
...	
11		110		{1,3,4,5,6,7,8}		{s(1) 0 s(2) s(3) s(4) s(5) s(6) s(7)}
11		111		{2,3,4,5,6,7,8}		{0 s(1) s(2) s(3) s(4) s(5) s(6) s(7)}

Proces demodulacije signala kod opisanog hibridnog sistema, u slučaju kada je srednja SNR vrijednost dovoljno velika da se koristi OFDM-IM modulacija, uključuje mjerenje vrijednosti $\lambda(\alpha)$ na osnovu (2.15), za svaki od n podnosilaca u svakoj od g grupi, određivanje k podnosilaca sa najvećim vrijednostima $\lambda(\alpha)$, i otkrivanje M -arnih simbola na tim podnosiocima [24]. Ovaj proces se obavlja na osnovu fiksne vrijednosti k , koja je predefinisana i poznata i na prijemu i na predaji. Međutim, kada broj aktivnih podnosilaca k nije fiksna vrijednost, već jedan element iz skupa \mathbf{K} mogućih vrijednosti veličine R , prijemnik prilikom demodulacije mora uzeti u obzir svaku moguću vrijednost iz skupa. Zbog toga prijemnik treba da za svako $K_r \in \mathbf{K}$, odredi maksimalnih K_r LLR vrijednosti na osnovu (2.15), i od njihovih indeksa kreira nizove I_β^r (2.7), gdje je $\beta=1, \dots, g$ i $r=1, \dots, R$. Nakon toga se određuje vektor M -arnih signala s_β^r (2.8), detektovanih na podnosiocima čiji su indeksi sadržani u I_β^r . Na osnovu svih dobijenih I_β^r i s_β^r , konkretni $I_\beta^{\hat{r}}$ i $s_\beta^{\hat{r}}$ kao set indeksa aktivnih podnosilaca tokom prenosa, i set M -arnih

simbola emitovanih na aktivnim podnosocima, određuju se na osnovu minimalne distance između emitovanog signala kroz kanal i primljenog signala, među svim mogućim r [24]:

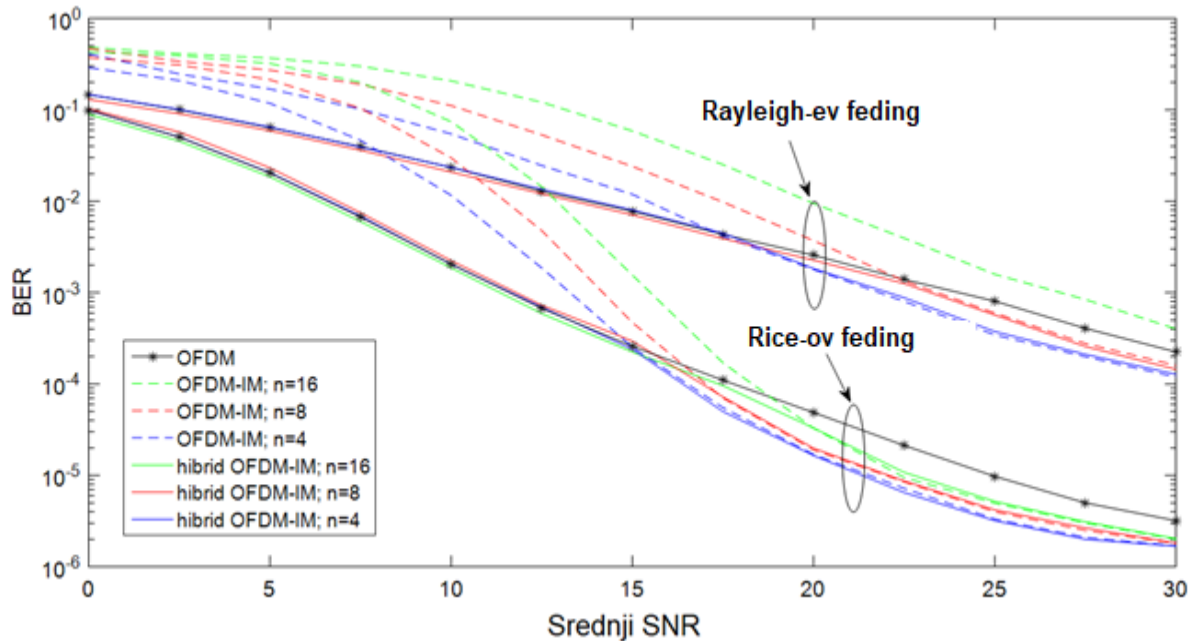
$$(I_{\beta}^{\hat{r}}, s_{\beta}^{\hat{r}}) = \arg \min_{r=1, \dots, R} \left(\sum_{\gamma \in I_{\beta}^r} |y_F^{\beta}(\gamma)|^2 + \sum_{k=1}^{K_r} |y_F^{\beta}(i_{\beta}^r(k)) - h_F^{\beta}(i_{\beta}^r(k))s_{\beta}^r(k)|^2 \right). \quad (4.8)$$

Nakon toga, dobijeni $I_{\beta}^{\hat{r}}$ i $s_{\beta}^{\hat{r}}$ se prosljeđuju do blokova koji vrše demapiranje indeksa, odnosno demapiranje simbola, a na izlazu tih blokova se izdvajaju procijenjeni biti ulazne binarne sekvence.

4.3 Analiza rezultata

BER performanse hibridnog OFDM-IM sistema analizirane su simulacionim putem i dobijeni rezultati su prikazani u nastavku, uz poređenje sa performansama OFDM i OFDM-IM sistema. Grafik sa slike 4.3 sadrži prikaz BER performansi sva tri pomenuta sistema, i to u slučaju kanala sa Rayleigh-evim i Rice-ovim fadingom, i BPSK mapiranjem simbola. Lako se uočava osnovna ideja predloženog hibridnog OFDM-IM sistema, čija BER kriva prati BER krivu standardnog OFDM sistema pri nižim vrijednostima srednjeg SNR-a, dok je za veće vrijednosti srednjeg SNR-a, približna BER krivoj OFDM-IM sistema. Dakle, na cijelom skupu analiziranih vrijednosti srednjeg SNR-a, hibridni OFDM-IM sistem postiže minimalni BER među modelovanim sistemima. Primijenjene granične vrijednosti srednjeg SNR-a od kojih zavisi tip modulacije kod hibridnog sistema, odabrane su na osnovu dobijenih rezultata poređenja BER karakteristika OFDM i OFDM-IM modulacije [22].

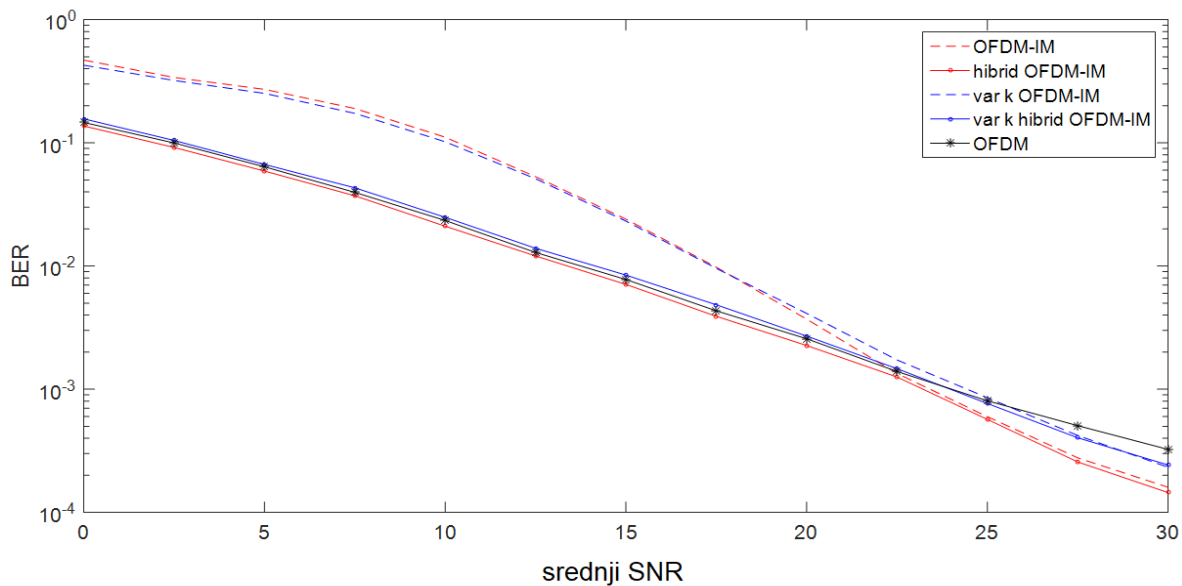
Sa slike 4.3 se zaključuje da, pored tipa fadinga na kanalu, ova vrijednost praga zavisi i od načina realizacije indeks modulacije, odnosno od veličine podblokova u koje su grupisani podnosioci sistema, i broja aktivnih podnosilaca u tim podblokovima. Tako OFDM-IM sistemi sa manjim grupama podnosilaca prevazilaze standardni OFDM po pitanju BER-a, pri nižim vrijednostima srednjeg SNR-a, pa je i vrijednost praga kod hibridnog sistema niža kada su podnosioci istog grupisani u manje podblokovne.



Slika 4.3. BER performanse hibridnog OFDM-IM sistema

Na primjer, za hibridni OFDM-IM sistem sa grupama od po $n=4$ podnosioca, od kojih su $k=2$ aktivna, definisana je vrijednost SNR praga od 15 dB za kanal sa Rice-ovim fedingom, odnosno 17.5 dB za kanal sa Rayleigh-evim fedingom, dok su te vrijednosti za sistem sa $n=8$ i $k=4$ 17 dB, odnosno 22.5 dB. Kad je u pitanju hibridni sistema sa $n=16$ i $k=8$, u slučaju kanalu sa Rice-ovim fedingom definisan je SNR prag od 19 dB, dok je u slučaju kanala sa Rayleigh-evim fedingom, vrijednost praga veća od 30 dB, odnosno za sve prikazane vrijednosti SNR-a do 30 dB, klasična OFDM modulacija ima superiornije BER karakteristike u odnosu na OFDM-IM modulaciju. Treba istaći da modelovani hibridni sistemi, pri srednjim SNR vrijednostima većim od definisanog praga, odnosno kada se izvodi OFDM-IM tip modulacije, za prenos koriste tačno polovinu dostupnih podnosilaca, pa je i energetska efikasnost značajno poboljšana u ovim uslovima [16]. Takođe, hibridni sistemi modelovani na slici 4.3, u slučaju kada se za prenos koristi OFDM-IM modulacija, do prijemnika emituju više bita, nego u slučaju odabrane standardne OFDM modulacije, pa je na taj način unaprijeđena i spektralna efikasnost sistema, sa izuzetkom sistema sa $n=4$ i $k=2$. Konkretno, sistem sa $n=16$ i $k=8$, emituje ukupno $14+8=22$ bita (vidjeti (4.3)) na nivou svake grupe podnosilaca, kada se primjenjuje OFDM-IM modulacija, za razliku od 16 bita (vidjeti (4.2)), koji se prenose kada je primijenjena OFDM modulacija, dok sistem sa $n=8$ i $k=4$, do prijemnika prenosi $6+4=10$ bita (vidjeti (4.3)) tokom OFDM-IM, za razliku od 8 bita (vidjeti (4.2)), koliko se prenosi tokom OFDM ciklusa. U specifičnom slučaju indeks modulacije sa $n=4$ i $k=2$ kod hibridnog sistema, do prijemnika se

preko podnosilaca pojedinačne grupe ovog sistema prenosi 4 bita (vidjeti (4.4)), i to kod oba moguća načina modulacije.



Slika 4.4 BER performanse OFDM-IM i hibridnog OFDM-IM sistema sa varijabilnim brojem aktivnih podnosilaca k

Na slici 4.4 je dat prikaz BER performansi OFDM-IM i hibridnog OFDM-IM sistema, koji je implementiran sa varijabilnim brojem aktivnih podnosilaca k u svakoj od grupa, u toku primjene OFDM-IM modulacije, odnosno za vrijednosti SNR-a veće od definisanog praga. Modelovani sistem sadrži po $n=8$ podnosilaca u svakom podbloku, a broj aktivnih indeksa je ograničen na skup $K=\{4,7\}$. Odabir konkretnog k iz navedenog skupa se u svakoj iteraciji i u svakoj zasebnoj grupi vrši u zavisnosti od $p_0=1$ (vidjeti (4.6)) bita na početku informacione sekvence [24]. Na taj način se bez korišćenja dodatnih resursa, ovim sistemom prenosi dodatni jedan bit u ciklusu funkcionisanja u OFDM-IM modu, što omogućava povećanje spektralne efikasnosti od 10% u odnosu na hibridni OFDM-IM sistem sa fiksnim k . Sa slike 4.4 je vidljivo da je pomenuto poboljšanje postignuto po cijenu nešto lošijih BER performansi OFDM-IM sistema sa varijabilnim k , u odnosu na OFDM-IM sistem sa fiksnim k , i to pri vrijednostima srednjeg SNR-a iznad 20 dB, dok su pri nižim vrijednostima srednjeg SNR-a BER performanse ova dva sistema praktično identične. Konkretno, OFDM-IM sistem sa fiksnim brojem aktivnih indeksa k , prevazilazi klasični OFDM po pitanju BER-a u uslovima vrijednosti srednjeg SNR-a većim od 22.5 dB, dok OFDM-IM sistem sa varijabilnim brojem aktivnih indeksa k , to čini pri vrijednostima srednjeg SNR-a većim od 25 dB, pa je iz tog razloga i prag hibridnog OFDM-IM sistema sa varijabilnim k u ovom slučaju postavljen na 25 dB.

5. Hibridni OFDM-IM relejni sistem

Prednosti opisanog hibridnog OFDM-IM sistema, koje se odnose na smanjenje vjerovatnoće greške po bitu tokom prenosa [25], čine ovaj sistem pogodnim za implementaciju u različitim scenarijima. Već pomenute tehnike relejnog prosleđivanja, same po sebi imaju za cilj, između ostalih, povećanja pouzdanosti prenosa između izvora podataka i krajnjeg korisnika. Analiziranjem mogućeg kombinovanja indeks modulacije i kooperativnih sistema, u vidu OFDM-IM relejnih sistema, izvedeni su zaključci o značajnom potencijalu ovakvih sistema da dostignu neke od zahtjeva dinamičnog okruženja bežičnih mreža nove generacije [21]. Indeks modulacija, kroz dvije dimenzije mapiranja informacionih bita, omogućava povećanje spektralne efikasnosti standardne OFDM modulacije, dok se pri procesu prenosa podataka troši manje energije, kako je ona direktno proporcionalna broju podnosilaca koji su aktivni u prenosu [16]. Pored toga, OFDM-IM relejni sistem pokazuje i unapređenje BER performansi u uslovima većih odnosa signal-šum, u odnosu na relejne sisteme koji implementiraju klasičnu OFDM modulaciju [21]. Ipak, pri nižim SNR vrijednostima, direktna posljedica indeks modulacije su lošije performanse greške po bitu, što predstavlja potencijalni problem za kooperativne sisteme, kojima je jedna od namjena upravo za poboljšanje kvaliteta prenosa za korisnike na velikim udaljenostima od izvora signala. Iz tog razloga, pogodno je ispitati i primjenu hibridnog modela OFDM-IM modulacije na sisteme koji upošljavaju relejne stanice za povećanje dometa komunikacije. Hibridni OFDM-IM relejni sistem bi podrazumijevao da se na svakom zasebnom hopu, u zavisnosti od uslova na kanalu, vrši odabir modulacije, i to između standardne OFDM modulacije i indeks modulisanje OFDM. Na strani prijemnika ovog sistema, obavlja se procjena parametara koji karakterišu trenutne uslove na kanalu i donosi se odluka o načinu modulisanja OFDM podnosilaca, a sve sa ciljem optimizacije performansi sistema po pitanju BER-a. Isti proces se nezavisno odvija na čvorištima izvora i releja, pa se u procesu prenosa na različitim hopovima mogu koristiti različiti tipovi modulacije. Istovremeno, na hibridni OFDM-IM relejni sistem se može primijeniti i prostorna modulacija (SM), kroz više dostupnih antena na strani predaje, od kojih se konkretna antena za prenos bira u zavisnosti od ulaznih informacionih bita.

5.1 Predloženi model sistema

Na slici 5.1 je prikazana blok šema primopredajnika hibridnog OFDM-IM-SM sistema na jednom hopu, sa dvije predajne antene. Obrada signala tipa „dekodiraj i prosljedi“ na relejnoj stanici, u komunikacionom sistemu sa dva hopa, podrazumijeva da su procesi modulacije na izvornom čvoru i na relejnoj stanici nezavisni, tj. odvijaju se u skladu sa odgovarajućim uslovima na prvom i drugom hopu, respektivno, kao i u zavisnosti od komunikacionih potreba.

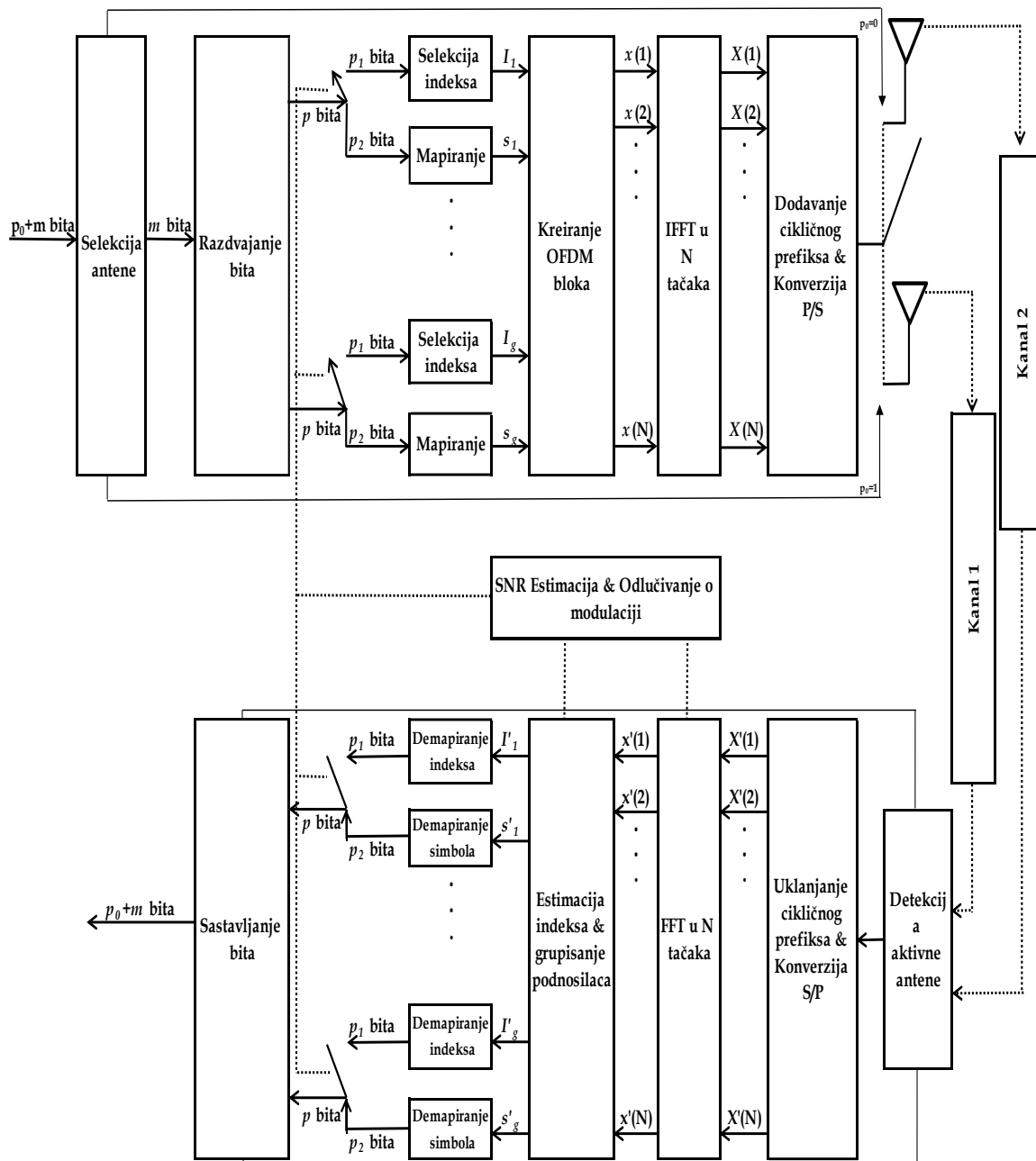
Na strani predajnika, proces započinje selekcijom jedne od n_t dostupnih antena za prenos, a u zavisnosti od $p_0 = \log_2(n_t)$ ulaznih bita. Na taj način se prvi dio informacije sadrži u indeksu aktivne predajne antene. Nakon što je odabrana antena, a time i kanal od predajnika do prijemnika, donosi se odluka i o načinu modulisanja OFDM podnosilaca, a na bazi informacije o srednjoj vrijednosti odnosa signal-šum na konkretnom kanalu. Proces donošenja odluka obavlja se na principu poređenja srednje vrijednosti SNR-a, sa unaprijed definisanom vrijednosti praga [25]. U slučaju kada je ova vrijednost manja od postavljene vrijednosti praga, primjenjuje se standardna OFDM modulacija, i svi podnosioci se mapiraju u M -arne simbole i šalju preko odabranog kanala. U drugom slučaju, kada je procijenjena vrijednost srednjeg SNR-a veća od postavljene vrijednosti praga, predajnik funkcioniše u OFDM-IM modu, pa se u zavisnosti od informacionih bita za prenos M -arnih konstelacionih simbola, bira samo određena kombinacija OFDM podnosilaca, u sklopu indeks selektora [22].

Na prijemu, proces demodulacije počinje određivanjem aktivne antene, na osnovu (3.3). U ovom koraku, primljeni signal se prosljeđuje do blokova za OFDM demodulaciju, a istovremeno se i otkrivaju biti sadržani u indeksu aktivne antene, koji čine i prvi dio poslate informacije. Otkrivanje preostalih bita obavlja se demapiranjem konstelacionih simbola na podnosiocima.

Broj bita, koji se u opisanom sistemu prenosi od predajnika do prijemnika, zavisi od načina modulacije OFDM podnosilaca. Ako su svi dostupni podnosioci grupisani u g podblokova sa po n podnosilaca, tokom perioda kada niža vrijednost srednjeg SNR-a uslovljava primjenu standardne OFDM modulacije, predajnik emituje ukupno

$$p_0 + m = p_0 + g \cdot p = p_0 + g \cdot \log_2(M) \cdot n = p_0 + \log_2(M) \cdot N \quad (5.1)$$

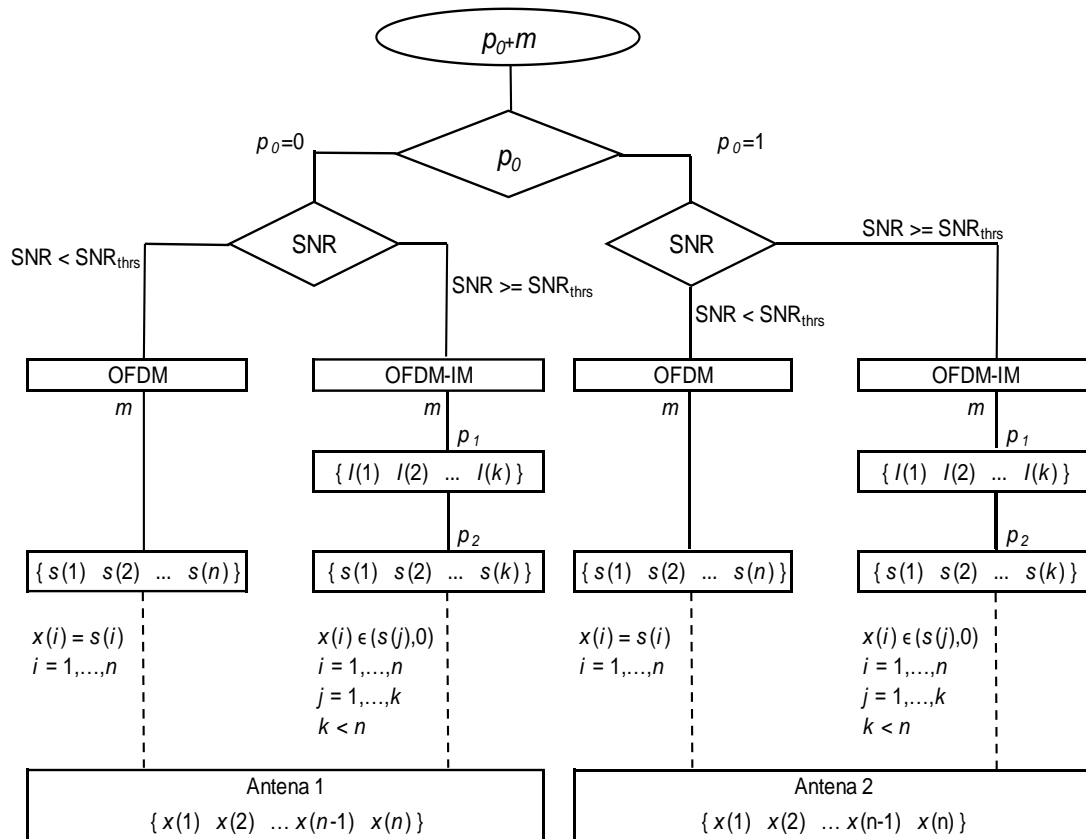
bita.



Slika 5.1. Blok šema primopredajnika predloženog hibridnog OFDM-IM-SM sistema

Sa druge strane, u toku ciklusa kada je primijenjena OFDM-IM modulacija, tj kada je vrijednost srednjeg SNR-a veća od granične, ukupan broj bita koje hibridni relejni sistem prenosi po simbolu, je:

$$p_0 + m = p_0 + g \cdot p = p_0 + g \cdot (p_1 + p_2) = p_0 + g \cdot (\log_2(C(n, k)) + \log_2(M) \cdot k). \quad (5.2)$$



Slika 5.2 Algoritam odabira emisione antene i načina modulacije podnosilaca kod hibridnog OFDM-IM-SM relejnog sistema

Slika 5.2 predstavlja algoritam funkcionisanja hibridnog OFDM-IM relejnog sistema, sa prikazanim izborima aktivne antene za prenos i tipa modulacije, a u zavisnosti od ulaznih bita i procijenjene vrijednosti srednjeg SNR-a, respektivno.

Kako su u predloženom sistemu implementirani svi mehanizmi standardne OFDM i indeks modulisan OFDM, to on po potrebi može funkcionisati isključivo u jednom od ova dva režima, nezavisno od uslova na kanalu. U [6] je opisan predlog hibridnog OFDM-IM sistema, kod kojeg se izbor modulacije između dostupnih OFDM i OFDM-IM, vrši na osnovu ulaznih informacionih bita, i to u svakom od podblokova podnosilaca zasebno. Na ovaj način, uvodi se dodatna dimenzija mapiranja bita, tako što se u svakom od podblokova sistema prvi informacioni bit koristi kao indikator za izbor odgovarajućeg načina modulacije. U relejnom okruženju, to bi značilo da se nakon prvih, u opštem slučaju p_0 bita ulazne sekvence, koji ukazuju na aktivnu antenu koja će se koristiti za prenos, i nakon podjele preostalih m bita na g grupa od po p , u svakoj podsekvenci od p bita, prvi bit mapira kroz odabir aktivne modulacije koja će biti primijenjena na podnosiocima konkretne grupe. Hibridni model iz [6], kao

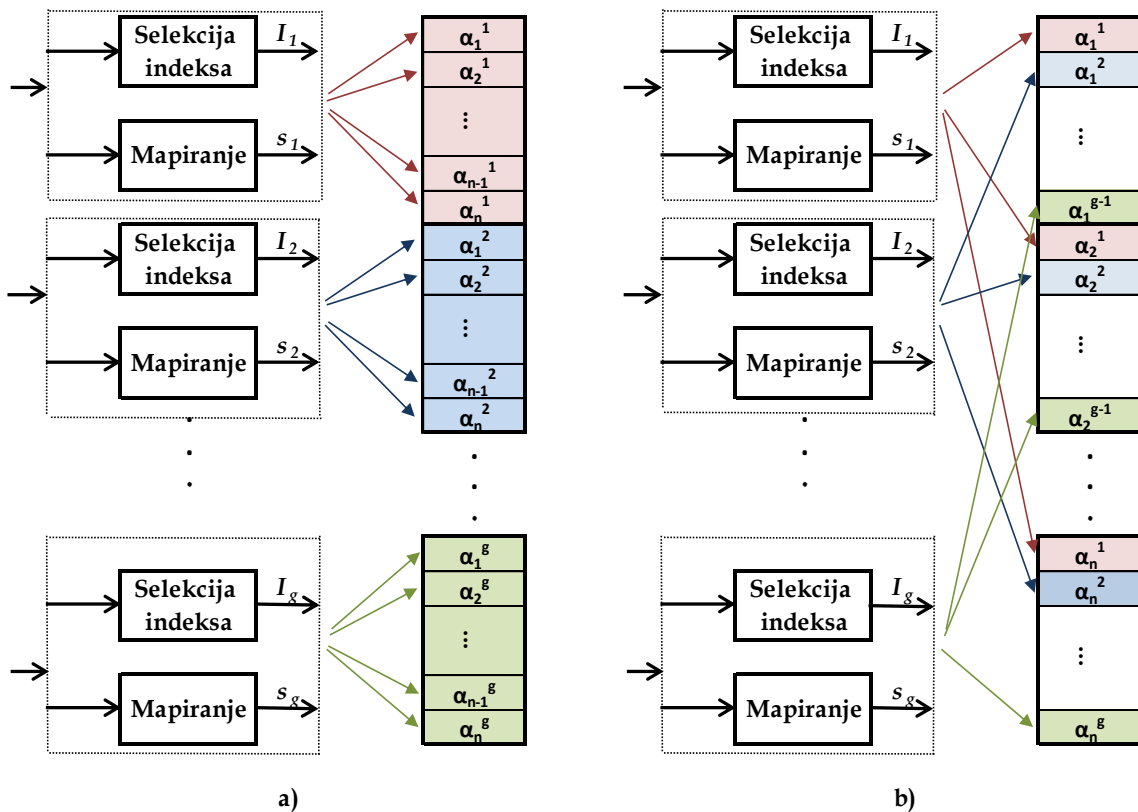
karakteristiku od primarnog interesa za unapređenje performansi sistema, postavlja spektralnu efikasnost, i to tako što uvodi još jedan način za prenos podataka preko postojećeg sistema, dok hibridni sistem predložen u ovom istraživanju, u fokus stavlja optimizovanje BER performansi pojedinačnih OFDM i OFDM-IM sistema. Tako bi na mjestu ispitivanja vrijednosti srednjeg SNR-a, u algoritmu hibridnog OFDM-IM relejnog sistema sa slike 5.2, u slučaju hibridnog modela iz [6], bilo ispitivanje dodatnog informacionog bita, u svakoj od grupa. U specifičnom slučaju, kada se svaki podblok sistema sastoji od n OFDM podnosilaca, i kada je $n = M$, gdje je M red modulacije, tada se u slučaju primjene standardne OFDM, ali i OFDM-IM sa samo jednim neaktivnim podnosiocem ($k=n-1$), od predajnika do prijemnika prenosi isti broj bita po simbolu. U takvoj situaciji, na jednostavan način se, tokom svakog simbola, i u svakoj grupi, može birati tip modulacije. Tabela 5.1 prikazuje funkcionisanje pomenutog hibridnog modela opisanog u [6], implementiranog uz prostornu modulaciju sa dvije predajne antene, na primjeru grupe sa $n=4$ QPSK modulisana podnosioca. Kada je prvi bit sekvence p , na ulazu svake grupe, jednak 0, svi podnosioci su u prenosu aktivni, i mapirani u QPSK simbole ($s(1)$, $s(2)$, $s(3)$, $s(4)$), dok se u slučaju kada je na početku niza p bit 1, primijenjuje OFDM-IM tehnika sa $k=3$.

Tabela 5.1 Šema aktiviranja podnosilaca kod hibridnog modela

	p_0	p	Izlaz antene 1:		p_0	p	Izlaz antene 2:
1.	0	0 00000000	{s(1) s(1) s(1) s(1)}	513.	1	0 00000000	{s(1) s(1) s(1) s(1)}
2.	0	0 00000001	{s(1) s(1) s(1) s(2)}	514.	1	0 00000001	{s(1) s(1) s(1) s(2)}
...
128.	0	0 01111111	{s(2) s(4) s(4) s(4)}	640.	1	0 01111111	{s(2) s(4) s(4) s(4)}
129.	0	0 10000000	{s(3) s(1) s(1) s(1)}	641.	1	0 10000000	{s(3) s(1) s(1) s(1)}
...
255.	0	0 11111110	{s(4) s(4) s(4) s(3)}	767.	1	0 11111110	{s(4) s(4) s(4) s(3)}
256.	0	0 11111111	{s(4) s(4) s(4) s(4)}	768.	1	0 11111111	{s(4) s(4) s(4) s(4)}
257.	0	1 00000000	{s(1) s(1) s(1) 0}	769.	1	1 00000000	{s(1) s(1) s(1) 0}
258.	0	1 00000001	{s(1) s(1) s(2) 0}	770.	1	1 00000001	{s(1) s(1) s(2) 0}
...
384.	0	1 01111111	{s(4) s(4) 0 s(4)}	896.	1	1 01111111	{s(4) s(4) 0 s(4)}
385.	0	1 10000000	{s(1) 0 s(1) s(1)}	897.	1	1 10000000	{s(1) 0 s(1) s(1)}
...
511.	0	1 11111110	{ 0 s(4) s(4) s(3)}	1023.	1	1 11111110	{ 0 s(4) s(4) s(3)}
512.	0	1 11111111	{ 0 s(4) s(4) s(4)}	1024.	1	1 11111111	{ 0 s(4) s(4) s(4)}

5.2 Interliving grupisanje podnosilaca

U svim do sada opisanim varijantama OFDM-IM sistema, podnosioci su podijeljeni u manje podblokove, a svakom podbloku pripada odgovarajući broj susjednih podnosilaca. Međutim, u [6] i [26] je pokazano kako se u sistemu sa većim brojem podnosilaca koeficijenti kanala unutar podblokova mogu smatrati znatno korelisanim, a njihov takav uticaj na OFDM podnosiocce se značajno odražava na performanse OFDM-IM sistema. Iz tog razloga, predloženo je i grupisanje OFDM-IM podnosilaca u interliving režimu [26], za razliku od lokalnog grupisanja, što bi i hibridnim OFDM-IM-SM relejnim sistemima omogućilo dodatno unapređenje BER performansi. Ovaj princip podrazumijeva da se susjedni informacioni biti, modulisani u M -arne simbole, prenose preko podnosilaca koji nijesu susjedni, već su dovoljno frekvencijski razdvojeni da bi se koeficijenti kanala na njima smatrali nezavisnim. Slika 5.3 prikazuje poređenje lokalnog i interliving grupisanja podnosilaca u slučaju OFDM-IM modulacije, dok se isti interliving šablon može primijeniti i kada hibridni sistem funkcioniše u OFDM režimu.

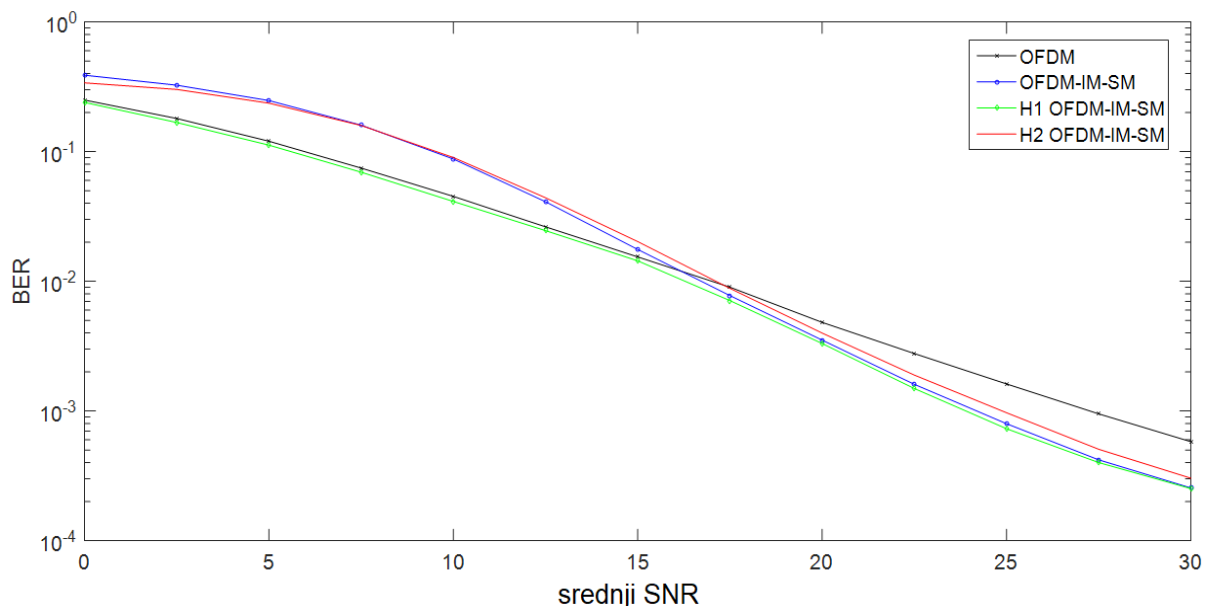


Slika 5.3 a) lokalno grupisanje OFDM-IM podnosilaca; b) interliving grupisanje OFDM-IM podnosilaca

Vektor signala u frekvencijskom domenu $x_F = [x(1) x(2) \dots x(N)]$, sa implementacijom interleaving grupisanja, se može predstaviti kao $x_F = [x^1(1) x^2(1) \dots x^g(1) x^1(2) x^2(2) \dots x^g(2) x^1(n) x^2(n) \dots x^g(n)]$, umjesto $x_F = [x^1(1) x^1(2) \dots x^1(n) x^2(1) x^2(2) \dots x^2(n) x^g(1) x^g(2) \dots x^g(n)]$ u slučaju lokalnog grupisanja, gdje je g broj podblokova, a n broj podnosilaca u svakom podbloku, odnosno $N=g*n$.

5.3 Analiza rezultata

BER performanse opisanog hibridnog OFDM-IM-SM relejnog sistema su dobijene kreiranjem simulacionog modela. Na kanalu je pretpostavljen Rayleigh-ev fading, a za mapiranje simbola je implementirana BPSK. Predloženi hibridni OFDM-IM-SM relejni sistem kod koga tip primijenjene modulacije, OFDM ili OFDM-IM, zavisi od estimirane srednje vrijednosti SNR-a, je na slici 5.4 označen kao H1 OFDM-IM-SM. Oznaka H2 OFDM-IM-SM na slici 5.4 se odnosi na hibridni sistem predložen u [6], kod koga se izbor načina modulacije, od pomenuta dva, vrši direktno na osnovu informacionih bita, a koji je takođe u ovoj simulaciji implementiran kao relejni sistem i uz primijenjenu prostornu modulaciju (SM).



Slika 5.4 BER performanse različitih realizacija hibridnog OFDM-IM-SM relejnog sistema

Poređenja radi, na slici 5.4 prikazane su i BER performanse OFDM i OFDM-IM-SM relejnih sistema. Svi modelovani sistemi su realizovani sa podnosiocima podijeljenim u grupe od po $n=4$, a u momentima primjene indeks modulacije, za prenos se u svakoj grupi aktivira po $k=2$ podnosioca. Sa slike se vidi, a i ranije je pokazano, da ovako realizovan OFDM-IM sistem pokazuje bolje BER karakteristike u odnosu na klasični OFDM za vrijednosti srednjeg SNR-a veće od 17 dB, pa je na tu vrijednost postavljen i prag kod H1 OFDM-IM-SM relejnog sistema. Tako ovaj sistem, pri rasponu vrijednosti srednjeg SNR-a manjim od navedenog praga, pod uticajem OFDM modulacije, postiže bolje BER performanse u odnosu na OFDM-IM-SM relejni sistem, a ta razlika pri BER-u od $2 \cdot 10^{-2}$ iznosi oko 1 dB. Sa povećanjem vrijednosti srednjeg SNR-a iznad definisanog praga, H1 OFDM-IM-SM relejni sistem ispoljava BER karakteristike identične onim OFDM-IM-SM relejnog sistema, a te karakteristike su u odnosu na OFDM relejni sistem bolje za oko 3 dB, pri BER-u od 10^{-3} . Hibridni sistem H1, realizovan je tako da se u ciklusima primjene OFDM i OFDM-IM modulacije sistemom prenosi isti broj bita, odnosno 4 bita po simbolu, po jednoj grupi podnosilaca (5.1, 5.2), što je isto kao u slučaju OFDM-IM-SM relejnog sistema, a razliku u odnosu na OFDM relejni sistem čini 1 dodatni bit koji se na nivou cjelokupnog sistema prenosi kroz SM koncept, odnosno kroz odabir jedne od dostupne dvije predajne antene (3.1). Takođe, kako je indeks modulacija implementirana da koristi polovinu dostupnih podnosilaca u svakom podbloku, to je i energetska efikasnost hibridnog sistema dvostruko bolja u periodima izvršavanja OFDM-IM tipa modulacije [16].

Kada je u pitanju H2 OFDM-IM-SM sistem, njegova BER kriva u dijelu grafika sa nižim vrijednostima srednjeg SNR-a, skoro potpuno prati BER krivu OFDM-IM-SM sistema, što znači da u ovom dijelu ima lošije performanse od klasičnog OFDM relejnog sistema. Međutim, i ovaj sistem takođe postiže bolje BER performanse u odnosu na OFDM, pri većim vrijednostima srednjeg SNR-a, i to vrijednostima većim od 17.5 dB. Na primjer, pri BER-u od 10^{-3} , relejni sistem H2 OFDM-IM-SM ima bolje performanse za oko 2.5 dB u odnosu na OFDM relejni sistem, dok istovremeno pokazuje performanse lošije za nešto manje od 1 dB, u poređenju sa H1 OFDM-IM-SM i OFDM-IM-SM relejnim sistemima. Treba dodatno naglasiti i da H2 OFDM-IM-SM mapira dodatni informacijski bit u svakoj grupi podnosilaca kroz odabir odgovarajuće modulacije, tako da ovaj sistem po svakom simbolu i svakoj grupi podnosilaca prenosi ukupno 5 bita, što direktno utiče na 25% veću spektralnu efikasnost u odnosu na ostale modelovane sisteme.

6. OFDM-IM: izazovi, otvorena pitanja i potencijalne primjene

Indeks modulacija primijenjena na OFDM sisteme, kroz aktivno korišćenje za prenos samo jednog dijela dostupnih podnosilaca, omogućava značajno unapređenje energetske efikasnosti cjelokupnog sistema, a u slučaju kada se za mapiranje samih simbola koristi konstelacioni alfabet nižeg reda, IM donosi i povećanje spektralne efikasnosti. Međutim, kod realizacije OFDM sistema sa mapiranjima višeg reda, biti emitovani kroz princip indeksiranja, ne mogu nadoknaditi onaj dio informacije koji bi se prenosio podnosiocima, koji u IM procesu ostaju neaktivni [27]. Iz navedenog je jasno, da se pri dizajnu OFDM-IM sistema mora praviti kompromis između spektralne i energetske efikasnosti. U cilju daljeg poboljšanja spektralne efikasnosti OFDM-IM sistema, predložene su i DM (*Dual Mode*) šeme indeks modulacije [28], kod kojih se princip određivanja specifične grupe podnosilaca kroz njihove indekse, koristi za podjelu podnosilaca u dvije grupe, kako bi se podnosioci iz dvije posebne grupe modulirali od strane dva različita konstelaciona seta. Na taj način, zadržavaju se biti dobijeni kroz indeksiranje i selekciju podnosilaca, a istovremeno se svi podnosioci aktivno koriste za prenos, što broj bita emitovanih od predajnika do prijemnika značajno povećava. Ovakav sistem za prenos koristi sve dostupne podnosioce, kao i konvencionalni OFDM, čime gubi prednost redukovanja uložene energije, koja karakteriše OFDM-IM [16]. Može se zaključiti da bi, iz perspektive balansiranja spektralne i energetske efikasnosti, optimalni indeks modulirani OFDM sistem mogao imati formu pažljivo konstruisane kombinacije OFDM-IM i DM-OFDM sistema [27]. Ovakva buduća optimizacija treba da vodi računa i o postizanju zadovoljavajućih BER performansi, koje su uglavnom uslovljene vrijednošću SNR-a na prijemu. Kako je SNR funkcija više parametara sistema, jasno je da bi pomenuta optimizacija morala uzeti u obzir sve ključne parametre i njihov uticaj na performanse, što čitav proces čini izazovnim ali i perspektivnim pravcem budućih istraživanja.

Još jedna sfera u kojoj se mogu pronaći rješenja za poboljšanje performansi OFDM-IM sistema su tehnike kodiranja kanala. Metodi kodiranja poput Hamming kodova, turbo kodova, LDPC (*Low Density Parity Check*) kodova, BMST (*Block Markov Superposition Transmission*) kodova i polarnih kodova, mogu se primijeniti na bite mapirane u amplitudski/fazno modulirane simbole, kao i na bite indeks modulacije. Samo kodiranje i dekodiranje kanala, kroz upotrebu odgovarajućih resursa, neizbježno vodi degradiranju brzine

prenosa i dodatnoj kompleksnosti, ali istovremeno doprinosi značajnom unapređenju performansi sistema, kroz zaštitu kodiranjem bita mapiranih u simbole i bita mapiranih u kombinaciju indeksa, što je za praktičnu implementaciju neophodno postići. U cilju primjene u konkretnim scenarijima, postoje preliminarne studije o kodiranju u sistemima koji koriste indeks modulaciju u frekvencijskom domenu, među kojima i predlog LDPC kodiranog OFDM-IM sistema [29]. Računanje *soft* informacije u procesu LDPC dekodiranja za svaki bit, pokazuje se kao veoma komplikovano, i u mnogome drugačije u odnosu na konvencionalni OFDM sistem, jer se, između ostalog, u obzir moraju uzeti i LLR vrijednosti za svaki podnosilac, koje ukazuju na odgovarajući šablon indeksa. Iz tog razloga je dizajn optimalnog kodiranja kanala složen zadatak, ali i izrazito poželjan za omogućavanje konkretne i realne primjene indeks moduliranih sistema, a složenost procesa se može i redukovati kroz princip kodiranja samo bita konstelacionih simbola, ili samo bita aktivnih indeksa [27].

Indeks modulacija primijenjena na OFDM sisteme, na način kakav je opisan u ovom radu, može se shvatiti kao jedan specijalan slučaj mnogo šireg principa, koji bi sve podnosiocima sistema dijelio na skupove, a zatim na različite skupove primijenio mapiranja različitim konstelacionim setovima. Taj širi princip višestrukih konstelacija, takozvana *multimod* (MM) šema, stvara mnogo veći broj mogućih realizacija OFDM podblokova, pa je i spektralna efikasnost koju može postići ovakav sistem znatno unaprijeđena [30]. U situaciji kad je broj skupova na koje su podijeljeni podnosioci u MM šemi jednak 2, od kojih se jedan skup mapira u simbole definisanim konstelacionim alfabetom, a drugi skup podnosilaca ostaje neaktivan tokom prenosa, opšti MM slučaj postaje specifični OFDM-IM sistem. Dizajn optimalnog sistema višestrukih konstelacija može biti kompleksan proces, iz razloga što se u razmatranje mora istovremeno uzeti više faktora, kao što su red konstelacije i vrijednost prijemnog SNR-a [27]. Zbog superiornih performansi, za koje ovi sistemi posjeduju potencijal, razvoj efektivne tehnike višestrukih konstelacija predstavlja pitanje za dalju analizu.

Osobina kojoj takođe treba posvetiti pažnju u toku budućih optimizacija, a generalno karakteriše OFDM sisteme, je i visoka vrijednost PAPR odnosa, koja uzrokuje nelinearna izobličenja signala, usljed nelinearnih prenosnih karakteristika uređaja u sklopu predajnika. Iako su u odnosu na konvencionalni OFDM, PAPR vrijednosti kod OFDM-IM sistema povoljnije, i dalje su dovoljno velike da rezultuju ozbiljnim degradacijama performansi [27]. Da bi se ublažili negativni efekti velikog PAPR, potrebno je da se u OFDM-IM sistemima usvoje metode za smanjenje PAPR, a neke od klasičnih predloženih za OFDM, kao što su *clipping* (isijecanje) i SLM (*Selective Mapping*) [31], mogu se direktno primijeniti i na OFDM-IM. Druge metode, pak, zahtijevaju odgovarajuće modifikacije da bi mogle biti primijenjene

na indeks modulirane OFDM sisteme, a primjer je ACE (*Active Constellation Extension*) algoritam [32], kod kog se pri strategiji proširenja konstelacije moraju uzeti u obzir i svojstva signala koja su posljedica indeks modulacije. Mada efikasne u redukovanju PAPR, ove tehnike uglavnom izazivaju i smanjenje spektralne efikasnosti i/ili SNR-a na prijemu, pa je veoma poželjno u budućim istraživanjima razmotriti optimalan dizajn tehnike za smanjenje PAPR za primjenu u OFDM-IM sistemima, koja ne bi ugrožavala ostale ključne performanse sistema.

Kao što je već na početku rečeno, princip indeks modulacije je inicijalno usvojen u prostornom domenu, pa proširen na frekvencijski domen, a može biti primijenjen i na vremenski domen i domen kanala [27]. Samim tim se IM operacije mogu sprovoditi simultano na više domena istovremeno, čime se performanse sistema mogu značajno unaprijediti, u odnosu na sistem sa jednom vrstom IM. I u ovom radu je opisan princip kombinovanja indeks modulacije u prostornom i frekvencijskom domenu kroz OFDM-IM-SM sistem (slika 3.2), a isti princip može biti proširen na opšti slučaj. U opštem slučaju se za prenos može aktivirati dio dostupnih predajnih antena, tako mapirajući dio informacionih bita u kombinaciju indeksa odabranih antena, dok se na svakoj anteni simboli prenose podskupom dostupnih frekvencijskih podnosilaca, ili vremenskih slotova, čiji bi indeksi nosili dodatne informacione bite. Ovakva šema ima potencijal za ostvarivanje značajnog diverzitetnog dobitka, a time i superiornih performansi u odnosu na šeme jednodimenzionalne IM. Strategija dizajna sistema, koji bi na sličan način kombinovao tri ili više vrsta IM tehnika nije značajnije istražena, a svakako je izazov konstruisati kombinovanu, optimalnu konstelaciju za ovakav hibridni sistem, kod kog postoji veliki broj različitih setova signala, kao i algoritam detekcije koji bi imao prihvatljivu kompleksnost.

Svakodnevni rast saobraćaja i broja pametnih uređaja uslovljava neprestano unapređenje i optimizaciju mobilnih mreža. Ove mreže sa svakom sljedećom generacijom moraju imati sposobnost da ponude mnogo veće brzine podataka, manja kašnjenja, manje troškove i manju potrošnju energije. Potencijalno rješenje za suočavanje sa ovim zahtjevima nude upravo tehnike IM. Konkretno, pomenute šeme multimodnih OFDM-IM sistema [30], imaju mogućnost da značajno poboljšaju brzine prenosa podataka, kroz prenos dodatnih bita, a sve to uz istu ili manju potrošnju energije, što vodi ostvarenju dobitaka i po pitanju energetske efikasnosti, u poređenju sa srodnim sistemima bez IM. Podesno koncipirani IM sistemi mogu se iskoristiti i da pojednostave strukturu predajnika i prijemnika, što bi obezbijedilo manju kompleksnost sistema, a samim tim i manja kašnjenja i cijene. Uz neophodna dalja istraživanja, OFDM-IM tehnike mogu biti inkorporirane uz različite ključne tehnologije u mobilnim

mrežama iduće generacije, na sličan način kako je to već predloženo za SM tehniku u masivnim MIMO sistemima [33].

Pored potencijala za primjenu u tehnologijama mobilnih mreža, OFDM-IM sistemi su ozbiljan kandidat za primjenu u optičkim bežičnim komunikacijama. Zahvaljujući prednostima koje obezbjeđuju, poput otpornosti na elektromagnetnu interferenciju, korišćenja nelicenciranog spektra, sigurnosti informacija i bezbjednosti po ljudsko zdravlje, bežične optičke komunikacije su postale obećavajuća tehnika za dopunu radio komunikacijama, koje pate od velike iskorišćenosti frekvencijskih resursa i problema u ispunjenju sve većih potreba za komunikacijama velikim brzinama. Kod optičkih bežičnih komunikacija se može napraviti generalna podjela na komunikacije u opsegu vidljive svjetlosti VLC (*Visible Light Communications*) i koherentne optičke komunikacije [27]. Optički OFDM (O-OFDM) kod VLC sistema, kao što su ACO-OFDM (*Asymmetrically Clipped Optical OFDM*) i PAM-DMT (*Pulse-Amplitude-Modulated Discrete Multitone*), bilježi neizbježna smanjenja spektralne efikasnosti, kako ovi sistemi koriste samo neparne podnosioce, odnosno samo imaginarni dio podnosilaca, respektivno [34]. Ovaj fenomen se barem djelimično može nadoknaditi uz pomoć IM. Takođe, OFDM-IM svojim konceptom sa nultim podnosiocima može popraviti i lošiju energetska efikasnost koju uzrokuje jednosmjerna komponenta, kao kod DCO-OFDM (*Direct Current Biased Optical OFDM*) sistema. Sa druge strane, koherentne optičke komunikacije, proistekle iz istog principa kao i prenos optičkim vlaknom, čine okosnicu FSO (*Free Space Optical*) komunikacionih sistema, koje karakterišu velika slabljenja i interferencija usljed kompleksnih atmosferskih i klimatskih uslova, u prvom redu magle [35]. Zbog specifičnih osobina ovih sistema, poput koherentne detekcije i mogućnosti simultanog emitovanja dva nezavisna toka podataka sa ortogonalnom polarizacijom, princip implementacije IM na VLC sisteme i radio signale, se ne može iskoristiti i za koherentne optičke komunikacije, već su neophodna dodatna istraživanja koja bi adresirala osnovna pitanja o primjeni IM.

7. Zaključak

Osnovna ideja indeks modulacije u sklopu OFDM sistema (OFDM-IM) je činjenica da se dodatna informacija može poslati od predajnika do prijemnika kroz selekciju odgovarajućeg podskupa podnosilaca za prenos, pri čemu su svi podnosioci označeni odgovarajućim indeksima. Primijenjena na OFDM sisteme, indeks modulacija ima potencijal da donese značajna unapređenja po pitanju energetske efikasnosti i, zavisno od broja aktivnih podnosilaca izabраниh za prenos, kao i konstelacionog alfabeta iskorišćenog za mapiranje simbola, može uvećati i spektralnu efikasnost. Zahvaljujući ovim prednostima u odnosu na konvencionalni OFDM sistem, OFDM sa IM se može smatrati veoma interesantnom tehnikom prenosa preko višestrukih podnosilaca za buduće bežične komunikacije. Određena istraživanja su već sugerisala mogućnost implementacije OFDM-IM koncepta na različite sisteme, kao što su komunikacije sa malom potrošnjom energije, 5G mobilni sistemi i sistemi nakon 5G, kao i mMTC, V2X, UWA i VLC komunikacioni sistemi. U ovom radu je predstavljen i predlog primjene IM, u kombinaciji sa SM, na OFDM bazirane relejne sisteme, u vidu relejnog OFDM-IM-SM sistema, koji može biti efikasno rješenje za različite izazove bežičnih komunikacija, od energetske efikasne komunikacije dugog dometa, za IoT i M2M bazirane aplikacije, do komunikacija velikih brzina prenosa za korisnike na ivicama ćelija.

Detaljno su ispitane BER performanse OFDM-IM i relejnog OFDM-IM-SM sistema, pri različitim konfiguracijama samih sistema, u smislu veličine grupa u koje su podijeljeni dostupni podnosioci i broja aktivnih podnosilaca u svakoj od grupa. Prezentovani rezultati su dobijeni u različitim uslovima po pitanju fedinga na kanalu, tj. na kanalima sa Rayleigh-evim i Rice-ovim fedingom, a ujedno su BER performanse sistema sa IM upoređene sa BER performansama klasičnog OFDM sistema. Pokazano je da, za manje vrijednosti srednjeg SNR-a, OFDM sistem postiže bolje BER performanse nego OFDM-IM i relejni OFDM-IM-SM, ali sa porastom SNR-a, indeks modulirani sistemi imaju sve bolje performanse, bolje čak i od OFDM sistema. Takođe je demonstrirano da je u scenariju sa dobrim uslovima na kanalu, kao što je to slučaj kada postoji direktna linija komunikacije (Rice-ov feding), granična vrijednost srednjeg SNR-a pri kojoj OFDM-IM i relejni OFDM-IM-SM prevazilaze klasični OFDM sistem, po pitanju BER performansi, značajno niža nego što je to u slučaju kada ne postoji direktna linija komunikacije (Rayleigh-ev feding). Kada je riječ o postavkama sistema sa IM, na primjeru OFDM-IM-SM je prikazano da se bolje BER performanse postižu sa podnosiocima

podijeljenim u manje podblokove, a broj aktivnih podnosilaca u svakoj grupi utiče tako što realizacije sa više aktivnih podnosilaca postižu bolje BER performanse u regionu manjih vrijednosti srednjeg SNR-a, a sa povećanjem srednjeg SNR-a, superiornije BER performanse ispoljavaju one realizacije sa manjim brojem aktivnih podnosilaca u podblokovima.

Pomenuto pogoršanje BER performansi OFDM-IM modulacije u odnosu na standardni OFDM, pri nižim vrijednostima srednjeg SNR-a, bilo je motiv za predlaganje hibridnog OFDM-IM sistema. Predstavljeni model, u zavisnosti od procijenjenih uslova na kanalu, funkcioniše u OFDM ili OFDM-IM režimu, tako da se BER karakteristike održavaju minimalnim u svim slučajevima. U sklopu hibridnog OFDM-IM sistema, opisan je i princip funkcionisanja indeks modulacije sa varijabilnim brojem aktivnih podnosilaca. Ako se ovaj parametar, umjesto predefinisane konstante, ograniči na skup dozvoljenih vrijednosti, njegov odabir tokom svakog simbola postaje dodatni način za prenos informacionih bita što uvećava spektralnu efikasnost sistema, a po cijenu nešto slabijih BER performansi u odnosu na OFDM-IM sa konstantim brojem aktivnih podnosilaca, pri većim SNR vrijednostima. Nakon hibridnog OFDM-IM, obrazložena je i mogućnost kombinovanja istog principa i sa relejnim OFDM-IM-SM sistemima, koje bi doprinijelo poboljšanju kvaliteta linka, čak i za korisnike na ivicama dometa komunikacije. Hibridni OFDM-IM i hibridni relejni OFDM-IM-SM, koji su modelovani tako da mogu sprovesti i OFDM i OFDM-IM modulacije, izbor konkretnog režima rada mogu vršiti na osnovu uslova na kanalu tj. estimirane vrijednosti srednjeg SNR-a na strani prijemnika u cilju optimizacije BER-a, ali i direktno na osnovu ulaznih bita, što bi bio još jedan način prenosa dodatne informacije od predajnika do prijemnika, u cilju povećanja spektralne efikasnosti. Pokazano je da hibridni sistemi koji način rada biraju na osnovu sekvence ulaznih bita, pokazuju oko 1 dB slabije BER performanse u odnosu na hibridne sisteme kod kojih se način rada bira u zavisnosti od uslova na kanalu.

Iako je jasno da OFDM-IM komunikacioni sistemi pokazuju potencijal za unapređenje različitih aspekata OFDM zasnovanih komunikacionih sistema, da bi mogla zaživjeti konkretna primjena indeks moduliranih OFDM sistema, potrebno je u budućim istraživanjima odgovoriti na otvorena pitanja i izazove, od kojih su neki navedeni i u ovom radu.

Literatura

- [1] Bhardwaj, Manushree. (2012). "A Review on OFDM: Concept, Scope & its Applications". IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. 1. 07-11. 10.9790/1684-0110711.
- [2] S. B. Weinstein, and P. M. Ebert, "Data Transmission by Frequency Division Multiplexing Using Discrete Fourier Transform", IEEE Trans. Communications, Vol. COM-19, October 1971, pp. 628-634.
- [3] Overview of 3GPP Release 8 V0.3.3 (2014-09)
- [4] Z. Wang, T. Mao and Q. Wang, "Optical OFDM for visible light communications," 2017 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2017, pp. 1190-1194, doi: 10.1109/IWCMC.2017.7986454
- [5] Mesleh, Raed & Haas, Harald & Sinanovic, Sinan & Ahn, Chang Wook & Yun, Sangboh. (2008). "Spatial Modulation". Vehicular Technology, IEEE Transactions on. 57. 2228 - 2241. 10.1109/TVT.2007.912136.
- [6] M.Wen, X.Cheng, L.Yand, "Index Modulation for 5G Wireless Communications", Springer book 2017.
- [7] Basar, Ertugrul & Aygözü, Ümit & Panayirci, Erdal & Poor, H. Vincent. (2013). "Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation". IEEE Transactions on Signal Processing. vol. 61, pp. 5536-5549. 10.1109/TSP.2013.2279771.
- [8] Dogan S, Tusha A, Arslan H., "OFDM with Index Modulation for Asynchronous mMTC Networks," Sensors, 2018; 18(4):1280. <https://doi.org/10.3390/s18041280>.
- [9] X. Cheng, M. Wen, L. Yang, and Y. Li, "Index Modulated OFDM with Interleaved Grouping for V2X Communications", in Proc. IEEE 17th Int. Conf. ITSC, 2014.
- [10] M. Wen, X. Cheng, L. Yang, Y. Li, X. Cheng, and Fei Ji, "Index Modulated OFDM for Underwater Acoustic Communications", IEEE Comm. Magazine, pp. 132-137, May 2016.
- [11] E. Başar and E. Panayircı, "Optical OFDM with index modulation for visible light communications," 2015 4th International Workshop on Optical Wireless Communications (IWOW), 2015, pp. 11-15, doi: 10.1109/IWOW.2015.7342256.

- [12] R. Abu-alhiga and H. Haas, "Subcarrier-index modulation OFDM," 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Tokyo, 2009, pp. 177-181. doi: 10.1109/PIMRC.2009.5449882
- [13] Abdullah, Hikmat & Jaafr, Rawaa. (2019). "Comparative Study of Selected Subcarrier Index Modulation OFDM Schemes". TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering. 17. 15-22. 10.12928/TELKOMNIKA.v17i1.10317.
- [14] Tsonev, Dobroslav & Sinanovic, Sinan & Haas, Harald. (2011). "Enhanced subcarrier index modulation (SIM) OFDM". 10.1109/GLOCOMW.2011.6162549.
- [15] J. Fu, C. Hou, W. Xiang, L. Yan, and Y. Hou, "Generalised spatial modulation with multiple active transmit antennas," in IEEE GLOBECOM Workshops, Dec. 2010, pp. 839–844.
- [16] A. I. Siddiq, "Effect of Subcarrier Activation Ratio on the Performance of OFDM-IM over Rayleigh Fading Channel," in IEEE Communications Letters, vol. 21, no. 6, pp. 1293-1296, June 2017, doi: 10.1109/LCOMM.2017.2668410.
- [17] M. Pejanovic-Djurisic, E. Kocan, R. Prasad: "OFDM based relay systems for future wireless communications", River Publishers, Denmark, 2012.
- [18] E. Basar, "Index Modulation Techniques for 5G Wireless Networks", IEEE Comm. Magazine, pp. 168-175, July 2016.
- [19] Serafimovski, Sinanovic, Di Renzo, Haas. (2011). "Dual-hop Spatial Modulation (Dh-SM)". IEEE 73rd Vehicular Technology Conference: VTC2011-Spring. 1-5. 10.1109/VETECS.2011.5956586.
- [20] S. Narayanan, M. Di Renzo, F. Graziosi and H. Haas, "Distributed Spatial Modulation: A Cooperative Diversity Protocol for Half-Duplex Relay-Aided Wireless Networks," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 65, no. 5, pp. 2947-2964, May 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2442754.
- [21] J. Mrkic, E. Kocan and M. Pejanovic-Djurisic, "Index modulation techniques in OFDM relay systems for 5G wireless networks," 2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2017, pp. 208-211, doi: 10.1109/TSP.2017.8075970.
- [22] J. Mrkic and E. Kocan, "BER Performance of OFDM-IM System in Fading Channels", ETF Journal of Electrical Engineering, Vol.23, No.1, November 2017, pp. 15-25.

- [23] E. Basar, "Multiple-Input Multiple-Output OFDM with Index Modulation", IEEE Signal Processing Letters, vol. 22, no. 12, pp. 2259 – 2263, Dec. 2015
- [24] R. Fan, Y. J. Yu and Y. L. Guan, "Generalization of Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 14, no. 10, pp. 5350-5359, Oct. 2015, doi: 10.1109/TWC.2015.2436925.
- [25] J. Mrkic and E. Kocan, "Hybrid OFDM-IM System for BER Performance Improvement," 2018 26th Telecommunications Forum (TELFOR), 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELFOR.2018.8611873.
- [26] Y. Xiao, S. Wang, L. Dan, X. Lei, P. Yang and W. Xiang, "OFDM With Interleaved Subcarrier-Index Modulation," in IEEE Communications Letters, vol. 18, no. 8, pp. 1447-1450, Aug. 2014, doi: 10.1109/LCOMM.2014.2332340
- [27] T. Mao, Q. Wang, Z. Wang and S. Chen, "Novel Index Modulation Techniques: A Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 21, no. 1, pp. 315-348, Firstquarter 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2858567.
- [28] T. Mao, Z. Wang, Q. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, "Dual-mode index modulation aided OFDM," IEEE Access, vol. 5, pp. 51–60, 2017.
- [29] H. Zhang, L.-L. Yang, and L. Hanzo, "LDPC-coded index-modulation aided OFDM for in-vehicle power line communications," in Proc. VTC Spring, Nanjing, China, May 2016, pp. 1–5.
- [30] M. Wen, E. Basar, Q. Li, B. Zheng and M. Zhang, "Multiple-Mode Orthogonal Frequency Division Multiplexing With Index Modulation," in IEEE Transactions on Communications, vol. 65, no. 9, pp. 3892-3906, Sept. 2017, doi: 10.1109/TCOMM.2017.2710312
- [31] A. P. More and S. B. Somani, "The reduction of PAPR in OFDM systems using clipping and SLM method," 2013 International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES), 2013, pp. 593-597, doi: 10.1109/ICICES.2013.6508385
- [32] B. S. Krongold and D. L. Jones, "PAR reduction in OFDM via active constellation extension," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 49, no. 3, pp. 258-268, Sept. 2003, doi: 10.1109/TBC.2003.817088.
- [33] Y. Cui and X. Fang, "Performance analysis of massive spatial modulation MIMO in high-speed railway," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 65, no. 11, pp. 8925–8932, Nov. 2016.

- [34] Sun, Yaqi & Yang, Fang & Cheng, Ling. (2018). “*An Overview of OFDM-Based Visible Light Communication Systems From the Perspective of Energy Efficiency Versus Spectral Efficiency*”. IEEE Access. PP. 1-1. 10.1109/ACCESS.2018.2876148.
- [35] M. A. Khalighi and M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 16, no. 4, pp. 2231-2258, Fourthquarter 2014, doi: 10.1109/COMST.2014.2329501

Lista skraćenica

ACE – *Active Constellation Extension*

ACO-OFDM – *Asymmetrically Clipped Optical OFDM*

AF – *Amplify-and-Forward*

AMPS – *Advance Mobile Phone Services*

BER – *Bit Error Rate*

BMST – *Block Markov Superposition Transmission*

BPSK – *Binary Phase Shift Keying*

CDMA – *Code Division Multiple Access*

CP – *Cyclic Prefix*

DAB – *Digital Audio Broadcasting*

DCO-OFDM – *Direct Current Biased Optical OFDM*

DF – *Decode-and-Forward*

DFT – *Discrete Fourier Transform*

DL – *Downlink*

DM – *Dual Mode*

DVB-T – *Digital Video Broadcasting - Terrestrial*

DVB-H – *Digital Video Broadcasting - Handheld*

EDGE – *Enhanced Data GSM Evolution*

ESIM – *Enhanced Subcarrier-Index Modulation*

FDMA – *Frequency Division Multiple Access*

FEC – *Forward Error Correction*

FFT – *Fast Fourier Transform*

FSO – *Free Space Optical*

GI – *Guard Interval*

GPRS – *General Packet Radio System*

GSM – *Global System for Mobile communication*

HSDPA – *High Speed Downlink Packet Access*

HSUPA – *High Speed Uplink Packet Access*

ICI – *Inter-Carrier Interference*

IDFT – *Inverse Discrete Fourier Transform*

IFFT – *Inverse Fast Fourier Transform*

IM – *Index Modulation*

IoT – *Internet of Things*

IP – *Internet Protocol*

ISI – *Inter-Symbol Interference*

LDPC – *Low Density Parity Check*

LLR – *Log-Likelihood Ratio*

LTE – *Long Term Evolution*

M2M – *Machine to Machine*

MIMO – *Multiple Input Multiple Output*

ML – *Maximum Likelihood*

MM – *Multi-Mode*

mMTC – *massive Machine-Type Communications*

NMT – *Nordic Mobile Telephones*

NTT – *Nippon Telephone and Telegraph*

OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*

OFDM-GIM – *OFDM with Generalized Index Modulation*

OFDM-IM – *OFDM with Index Modulation*

OFDM-IM-SM - *OFDM with Index Modulation and Space Modulation*

OOK – *On-Off Keying*

PAM-DMT – *Pulse-Amplitude-Modulated Discrete Multitone*

PAPR – *Peak to Average Power Ratio*

P/S – *Parallel-to-Serial*

QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*

QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying*

SIM – *Subcarrier-Index Modulation*

SLM – *Selective Mapping*

SM – *Spatial Modulation*

SMS – *Short Message Service*

SNR – *Signal-to-Noise Ratio*

S/P – *Serial-to-Parallel*

TACS – *Total Access Communication Systems*

TDMA – *Time Division Multiple Access*

UL – *Uplink*

UMTS – *Universal Mobile Terrestrial/Telecommunication Systems*

V-BLAST – *Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time*

WiMAX – *Worldwide interoperability for Microwave Access*

WLAN – *Wireless Local Area Network*

VLC – *Visible Light Communication*

Ime i prezime autora: Jovana Mrkić, Spec. Sci

ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 24 Pravila studiranja na postdiplomskim studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je magistarski rad pod naslovom

"Indeks modulacija za poboljšanje performansi bežičnih komunikacionih sistema sa višestrukim nosiocima"

moje originalno djelo.

Podnosilac izjave,



Jovana Mrkić, Spec. Sci

U Podgorici, dana 30.06.2021. godine