

Analiza performansi tehnika digitalnog prekodiranja za *massive* MIMO sisteme i različite uslove primene

Rade Dabetić
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u
Beogradu (PhD student), Beograd,
Republika Srbija
rade.dabetic1@huawei.com,
<https://orcid.org/0000-0002-4886-5244>

Goran Marković
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u
Beogradu, Beograd, Republika Srbija
gmarkovic@etf.bg.ac.rs,
<https://orcid.org/0000-0002-6638-8058>

Lazar Mitrović
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u
Beogradu, Beograd, Republika Srbija
lazar@etf.bg.ac.rs,
<https://orcid.org/0000-0002-9558-0540>

Dejan Drajić
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u
Beogradu i Inovacioni centar
Elektrotehničkog fakulteta, Beograd,
Republika Srbija
ddrajic@etf.bg.ac.rs,
<https://orcid.org/0000-0003-1314-6191>

Đorđe Lukić
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u
Beogradu (PhD student), Beograd,
Republika Srbija
Djordje.Lukic@aspiretechnology.com,
<https://orcid.org/0000-0002-8432-4277>

Abstract—U radu su prikazani rezultati analize performansi tehnika digitalnog prekodiranja pri primeni u *downlink* smeru prenosa u okviru višekorisničkih MIMO (MU-MIMO, *Multi-User Multiple-Input Multiple-Output*) sistema, u formi *massive* MIMO sistema (mMIMO), i to za različite uslove u pogledu međusobne korelacije kanala i kvaliteta procene stanja kanala (CSI, *Channel State Information*). Prikazani su osnovni rezultati i zaključci sprovedene uporedne analize datih tehnika prekodiranja u smislu potencijalno ostvarivih kapaciteta za različite scenarije primene u okviru mMIMO sistema, kao i računске složenosti postupaka.

Ključne reči— *Digital precoding, MU-MIMO, massive MIMO*

I. UVOD

Downlink (DL) smer prenosa u okviru višekorisničkih MU-MIMO sistema karakteriše istovremeni prenos tokova podataka ka svakom korisniku [1],[2]. Kod specifične forme MU-MIMO tehnologije, najčešće označene kao *massive* MIMO (mMIMO) tehnologije, bazna stanica (BS) se oprema antenskim sistemom sa velikim brojem antenskih elemenata kako bi se omogućilo istovremeno emitovanje posebnih tokova podataka ka svakom od korisnika. Način prenosa u mMIMO sistemima omogućava maksimalno korišćenje dodatnih stepena slobode dobijenih na osnovu primene velikog broja antena [3], odnosno sa značajno većim brojem od broja potrebnog za komunikaciju sa uređajem svakog pojedinačnog korisnika sa jednom ili više antena. Maksimalno iskorišćenje složenog antenskog sistema zahteva ortogonalizaciju prenosa ka svim korisnicima raspoređenim u prostoru oko BS, što se postiže primenom tehnika oblikovanja snopa (*beamforming*) [1]-[3]. Za DL smer prenosa u mMIMO sistemima predložene su analogne i digitalne *beamforming* tehnike, kao i hibridne *beamforming* tehnike gde se kombinuju ove dve klase. Digitalne *beamforming* tehnike za DL smer prenosa (sa strane BS), nazivaju se tehnikama prekodiranja.

Performanse tehnika prekodiranja pri primeni u mMIMO sistemima se najčešće izražavaju u smislu ukupnog ostvarenog kapaciteta (SR, *Sum-Rate*), tj. spektralne efikasnosti (SE), ostvarenog za sve korisnike, srednje vrednosti greške po bitu (BER, *Bit Error Rate*), kao i računске složenosti koja se izražava kao ukupan broj proračuna (FLOPs, *Floating-Point Operations*). Teorijska analiza mMIMO sistema pokazuje da maksimalni ostvarivi kapacitet u DL smeru prenosa zavisi od

statističkih osobina radio kanala ostvarenog između svake od antena antenskog sistema BS i antena korisničkih prijemnika u realnim uslovima okruženja propagacije signala (uključujući uzajamnu korelaciju kanala za različite korisnike, na predaji i prijemu), kao i kvaliteta procene stvarnog stanja ovih kanala za potrebe primene tehnika prekodiranja u BS [1]-[3]. Kako bi se izvršila adekvatna analiza performansi tehnika digitalnog prekodiranja, treba izvršiti odgovarajuće modelovanje mMIMO sistema, koje omogućava procenu performansi sistema za slučaj uzajamne korelacije kanala korisnika i pojave grešaka u proceni CSI, što je u ovom radu i urađeno. Na osnovu formiranog simulacionog modela, izvršena je detaljna uporedna analiza performansi posmatranih tehnika digitalnog prekodiranja putem *Monte-Carlo* simulacija. Posmatrana je računska složenost tehnika prekodiranja pri primeni ovih tehnika u DL smeru prenosa u okviru mMIMO sistema, kako bi se ostvario dodatni uvid u pogledu zahteva i ograničenja realizacije ovih sistema, a time posredno i cene implementacije, pri njihovoj primeni.

II. OPIS USVOJENOG MODELA mMIMO SISTEMA

Posmatra se mMIMO sistem za DL smer prenosa koji čini BS sa M predajnih antena, u formi uniformnog pravougaonog antenskog niza, kao i K korisnika (tj. uređaja) opremljenih sa jednom antenom, pri čemu se posebno posmatra slučaj podrške za realizaciju IoT (*Internet of Things*) servisa. Kompleksna matrica kanala $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times M}$, koju definiše skup vektora kanala između BS i korisnika, $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$, $k = 1, 2, \dots, K$, smatra se fiksnom tokom perioda koherencije kanala (CT, *Coherence Time*). U posmatranom scenariju primene mMIMO sistema sa jednom BS, međučelijska interferencija (ICI, *Inter-Cell Interference*) smatra se zanemarivom ili se posmatra kao sastavni deo aditivnog šuma okruženja, pa međukorisnička interferencija (IUI, *Inter-User Interference*) i greške procene CSI (tj. trenutne vrednosti matrice kanala \mathbf{H}) predstavljaju glavni ograničavajući faktor performansi mMIMO sistema, što se može donekle rešiti prekodiranjem korisničkih podataka, [2]. Na osnovu opisanog modela mMIMO sistema, primljeni signali $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ za svih K korisnika tokom jednog vremenskog slota, dati su [2], [4], kao,

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{w} + \mathbf{n}, \quad (1)$$

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Rep. Srbije, Broj ugovora: 451-03-47/2023-01/200103 i 451-03-66/2024-03/200223.

gde je $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{M \times K}$ matrica prekodovanja za primenjenu tehniku prekodiranja, $\mathbf{d} \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ je vektor podataka za K korisnika za slučaj primene m-QAM postupka modulacije, tj. $d_k \in A = \{a_1 + ja_Q | a_1, a_Q \in \{\pm 1, \pm 3, \dots, \pm(\sqrt{m} - 1)\}\}$ je simbol k -tog korisnika, a $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{I}_K)$ je vektor AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) nulte srednje vrednosti i jedinične varijanse. Ukupna snaga signala $\mathbf{x} = \mathbf{W}\mathbf{d} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ na predaji ograničena je sa $\mathbb{E}[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] \leq P_T$, gde $\mathbb{E}(\cdot)$ predstavlja matematičko očekivanje, a $(\cdot)^H$ je operator transponovanja sa konjugacijom. Pošto se ovde posmatra mMTC (*Massive Machine-Type Communications*) scenario za 5G NR sisteme, korisnički uređaji se posmatraju u *indoor* okruženju, dok servis pružaju *outdoor* makro BS, što rezultuje pojavom prostorne korelacije između NLOS (*Non-Line-of-Sight*) *fading* kanala sa Rejljevom raspodelom, [5]. U ovom scenariju antenski sistem BS je postavljen visoko iznad tla, pa nema pojave lokalnog rasejanja (*scattering*), što rezultuje visokim nivoom korelacije između predajnih antena, i modeluje se prostornom matricom korelacije na predaji $\mathbf{R}_{TX} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ putem Džeksonovog (*Jakes*) *one-ring MIMO channel scattering* modela prikazanom na Sl.1 [6]-[7]. U ovom modelu θ predstavlja ugao azimuta korisnika lociranog na rastojanju S od BS, okruženog prstenom reflektora (*scatterers*) prečnika r . Rasipanje radio signala po uglu Δ se aproksimira kao $\Delta \approx \arctg(r/S)$, gde je koeficijent prostorne korelacije predajnih antena $1 \leq p, q \leq M$, [7],

$$[\mathbf{R}_{TX}]_{p,q} = \frac{1}{2\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} e^{j\mathbf{g}^T(\alpha+\theta)(\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_q)} d\alpha, \quad (2)$$

gde $\mathbf{g}(\alpha + \theta) = -\frac{2\pi}{\lambda_c} [\cos(\alpha + \theta) \quad \sin(\alpha + \theta)]^T$ predstavlja vektor ravnog talasa čiji je AoA (*Angle of Arrival*) sa predajnim antenskim nizom α , λ_c je talasna dužina za signal nosioc učestanosti f_c , a $\mathbf{u}_p, \mathbf{u}_q \in \mathbb{R}^2$ su vektori pozicije antena BS p, q u 2D koordinatnom sistemu. Matrica \mathbf{R}_{TX} je normalna matrica koja se može prikazati, [6], u obliku,

$$\mathbf{R}_{TX} = \mathbf{U}_{TX} \mathbf{\Sigma}_{TX} \mathbf{U}_{TX}^H, \quad (3)$$

gde je $\mathbf{U}_{TX} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ kvadratna matrica čije kolone predstavljaju sopstvene vektore matrice \mathbf{R}_{TX} , a $\mathbf{\Sigma}_{TX} \in \mathbb{R}^{M \times M}$ je dijagonalna matrica čiji su elementi sopstvene vrednosti matrice \mathbf{R}_{TX} . Prijem signala od strane *indoor* korisničkih uređaja (npr. IoT uređaja) najčešće karakteriše fluktuacija snage usled uticaja prepreka propagacije duž putanje prostiranja radio signala (*shadow fading*). Pri tom, kanali za prostorno bliske prijemnike su u značajnoj meri korelisani usled dejstva istih prepreka, pri čemu se prostorna korelacija kanala za svaka dva korisnika $1 \leq i, j \leq K$ modeluje korišćenjem Gudmudsonovog modela [8], tj. kao,

$$[\mathbf{R}_{RX}]_{i,j} = \frac{\sigma_s^2}{d_{cor}} e^{-\frac{|d_{i,j}|}{d_{cor}}} \quad (4)$$

gde $|d_{i,j}|$ predstavlja rastojanje korisnika i i j , σ_s je standardna devijacija za *shadow fading*, a d_{cor} je definisano rastojanje korelacije, tj. rastojanje na kome vrednost korelacije pada ispod vrednosti 0.5. Matrica $\mathbf{R}_{RX} \in \mathbb{C}^{K \times K}$ je normalna matrica koja se, na sličan način kao i matrica \mathbf{R}_{TX} , može prikazati kao,

$$\mathbf{R}_{RX} = \mathbf{U}_{RX} \mathbf{\Sigma}_{RX} \mathbf{U}_{RX}^H, \quad (5)$$

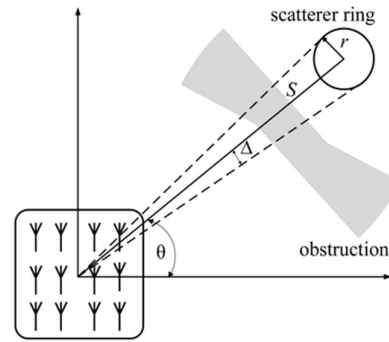
pri čemu matrica $\mathbf{U}_{RX} \in \mathbb{C}^{K \times K}$ i dijagonalna matrica $\mathbf{\Sigma}_{RX} \in \mathbb{R}^{K \times K}$ sadrže sopstvene vektore i sopstvene vrednosti matrice \mathbf{R}_{RX} (slično kao matrice \mathbf{U}_{TX} i $\mathbf{\Sigma}_{TX}$ na strani predaje). U

posmatranom modelu primenjen je Kronekerov korelacioni model [9], gde se pretpostavlja potpuno razdvajanje korelacije na predaji i prijemu, pa je ukupna matrica kanala,

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_{RX}^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{iid} \mathbf{R}_{TX}^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

gde je $\mathbf{H}_{iid} \in \mathbb{C}^{K \times M}$ nekorelisana matrica kanala sa Rejljevom raspodelom elemenata matrice, tj. elementi matrice predstavljaju međusobno nezavisne slučajne promenljive koje karakteriše identična kompleksna Gausova raspodela jedinične varijanse i nulte srednje vrednosti. Konačan izraz za matricu kanala \mathbf{H} je,

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}_{RX} \mathbf{\Sigma}_{RX}^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{iid} \mathbf{\Sigma}_{TX}^{\frac{1}{2}} \mathbf{U}_{TX}. \quad (7)$$



Sl. 1. Ilustracija *one-ring MIMO channel scattering* modela, [5]

U okviru analize korišćenjem posmatranog modela sistema posmatrana su dva slučaja u pogledu kvaliteta procene CSI, i to: slučaj idealnog poznavanja CSI kada se pretpostavlja da je na predaji BS poznata prava vrednost kanalske matrice iz izraza (7), kao i slučaj neidealne procene CSI pri čemu je primenjen model estimacije matrice kanala iz [10], definisan kovarijansom $a = 0.1$ i $\tau = \sqrt{0.01}$ za bolji odnosno $\tau = \sqrt{0.05}$ za lošiji kvalitet procene CSI, kada CSI nije poznata na strani prijema.

III. PREGLED POSMATRANIH TEHNIKA PREKODIRANJA

Tehnike prekodiranja se klasifikuju na linearne i nelinearne. Kod linearnih tehnika korisnicima su dodeljene različite matrice prekodiranja na predaji, a predajni signal za svaku antenu se generiše odvojeno (u digitalnom domenu) što omogućava punu fleksibilnost pri generisanju signala. Podaci se prenose preko antenskog sistema primenom linearnih transformacija, pa ove tehnike odlikuje manja računaska složenost i relativno dobre performanse, [3]. Nelinearne tehnike prekodiranja su složenije za implementaciju, ali imaju značajan potencijal u pogledu poboljšanja performansi u odnosu na linearne tehnike. Rezultati teorijske analize pokazuju da su ove tehnike optimalne u smislu postizanje maksimalnog kapaciteta sistema, ali ih računaska složenost čini nepraktičnim za primenu u realnim sistemima [3]. Ipak, nelinearne tehnike prekodiranja su veoma robusne na pojavu međusobne korelacije kanala, što ove tehnike čini ozbiljnim kandidatima za mMIMO sisteme, npr. 5G NR, [3].

Primenom *Zero Forcing* (ZF) tehnike prekodiranja postiže se eliminacija pojave interferencije ostalih korisnika pri slanju signala prema željenom korisniku, putem proračuna pseudo-inverzne matrice kanala, a time i anuliranja prostiranja signala željenog korisnika u pravcima (ka lokacijama) ostalih korisnika [3]. U slučaju odsustva AWGN na prijemu, smatra se da je ZF

tehika optimalna tehniku precodiranja u pogledu poništavanja međukorisničke interferencije, ali se pri tome očekuje značajan gubitak kapaciteta sistema usled načina proračuna matrice precodovanja (\mathbf{W}) kojom se postiže ortogonalizacija prenosa u slučaju postojanja međusobne korelacije korisničkih kanala [4]. Povećanjem broja antena na predaji (M) u odnosu na broj korisnika (K), povećava se stepen slobode, pa tada ZF tehnika postiže visok kapacitet čak i za niske vrednosti SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). Princip rada RZF (*Regularized Zero Forcing*) tehnike zasniva se na postupku minimizacije srednje kvadratne greške između simbola na predaji i prijemu, tj. regularizacije inverzne matrice kanala, čime se ostvaruje balans između usklađenosti amplitude signala i nivoa suzbijanja šuma [3], pri čemu ova tehnika predstavlja unapređenje ZF tehnike za male vrednosti SNR.

Sa stanovišta teorije informacija optimalna strategija za mMIMO sisteme u DL smeru je DPC (*Dirty Paper Coding*) tehnika, gde se na bazi poznavanja matrice kanala interferencija unapred eliminiše pre slanja signala. DPC tehniku karakteriše prevelika računaska složenost, pa su predložene suboptimalne tehnike, npr. THP (*Tomlinson-Harashima Precoding*) tehnika precodiranja sa sukcesivnim poništavanjem interferencije [11]-[12]. Dalje smanjenje računaska složenosti ostvareno je u okviru GSP (*Gram-Schmidt Precoding*) tehnike precodiranja, gde se umesto proračuna pseudo-inverzne matrice kanala koristi GSO (*Gram-Schmidt Orthogonalization*) postupak ortogonalizacije [13]. U nelinearne tehnika spada i *Vector Perturbation* (VP) tehnika sa primenom varijacija inverzije kanala za potrebe regularizacije inverzne matrice kanala, i „sfernog dekodera” za perturbaciju podataka kako bi se smanjila predajna snaga signala [14]. Putem VP tehnike modifikuju se predajni podaci tako što se usklađuju simboli podataka na predaji sa sopstvenim vrednostima inverzne matrice kanala, [3], [7]. Osim toga moguće je posmatrati i kombinaciju linearnih i nelinearnih tehnika precodiranja, npr. hibridna tehnika sa primenom ZF tehnike i THP tehnike [5].

IV. REZULTATI ANALIZE

Posmatrana je jedna ćelija mMIMO sistema, u kome je BS sa $M = 10 \times 10 = 100$ omnidirekcionih antena u centru ćelije, pri čemu se prenos ka $K \in \{10,30,50,70,90\}$ korisnika odvija u RF opsegu 3.5 GHz (globalni IMT-2020 opseg za 5G NR [15]). Usvojen je razmak antena (D) od 0.5 talasnih dužina signala nosioca, kao i primena 16-QAM postupka koji pruža dovoljan kapacitet za mMTC 5G NR servis [1]. Korišćen je model sistema opisan u poglavlju II, gde su parametri modela preuzeti iz [5]. Korisnički uređaji su uniformno i slučajno locirani na rastojanju od 100 m do 300 m, dok su rastojanje objekata koji izazivaju rasejanje (*scattering*) i vrednost rasejanja po uglu usvojeni iz [7], a korelaciono rastojanje (d_{cor}) i varijansa za *shadow fading* (σ_s) preuzeti iz [8]. Pregled svih korišćenih parametara modela dat je u Tabeli I.

TABELA I. USVOJENI PARAMETRI MODEL A mMIMO SISTEMA

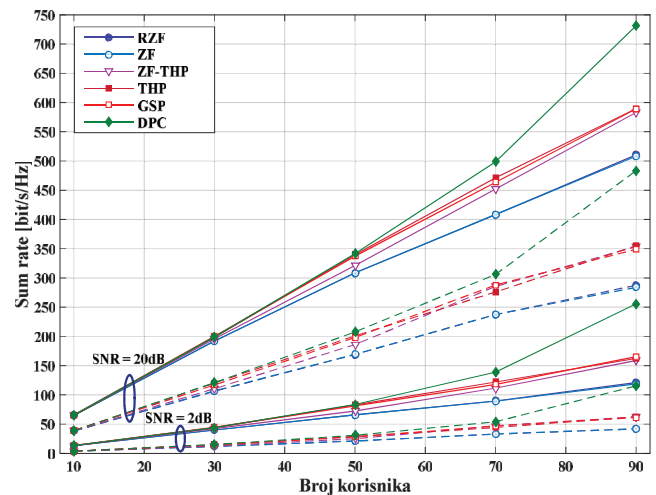
PARAMETAR	VREDNOST	PARAMETAR	VREDNOST
θ	$[-180^\circ, 180^\circ]$	f_c	3.5 GHz
Δ	$[5^\circ, 15^\circ]$	M	100
d_{cor}	20 m	D	0.5
r	30 m	σ_s	0.4

Za potrebe sprovođenja analize, primenom softverskog paketa MATLAB razvijen je sopstveni model mMIMO sistema, u skladu sa opisom datim u poglavlju II, odnosno realizovane su sve posmatrane tehnike precodiranja.

A. Ostvarena spektralna efikasnost

Analiza performansi u pogledu ukupne ostvarene SE (*Sum-Rate*) za posmatrani skup tehnika precodiranja (RZF, ZF, ZF-THP, THP, GSP i DPC) najpre je izvršena za slučaj idealnog poznavanja CSI, pri čemu su posmatrani mMIMO sistemi sa $K \in \{10, 30, 50, 70, 90\}$ korisnika, prvo za slučaj nekorelisanih međusobno nezavisnih kanala sa Rejljevim fadingom, odnosno za realniji slučaj kanala sa pojavom korelisanih *shadow fading*-a koji unosi korelaciju između kanala prostorno bliskih korisnika i izaziva smanjenje kapaciteta. U okviru sistema su korišćene tehnike precodiranja navedene u poglavlju III, i klasičan *Water-Filling* algoritam za potrebe alokacije snage pojedinačnim korisnicima [5].

Analiza performansi obavljena je za različite vrednosti SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) na prijemu u opsegu 0 dB do 20 dB. Ostvareni kapacitet za male (2 dB) i velike vrednosti (20 dB) SNR u funkciji broja korisnika dati su na Sl. 2, i to za slučaj kada imamo uzajamno nekorelisane kanale (krive prikazane punom linijom na Sl. 2) i kada imamo korelisane kanale (krive prikazane isprekidanom linijom na Sl. 2).

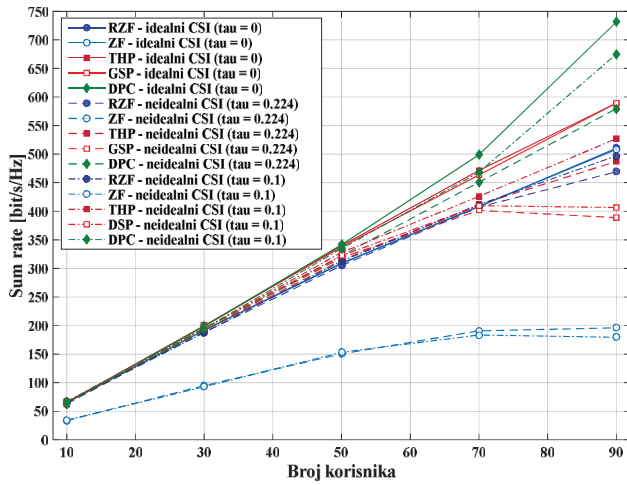


Sl. 2. Ostvareni ukupni kapacitet za slučaj nekorelisanih kanala (puna linija) i korelisanih kanala (isprekidana linija) kada postoji idealno poznavanje CSI za SNR = 2 dB i SNR = 20 dB.

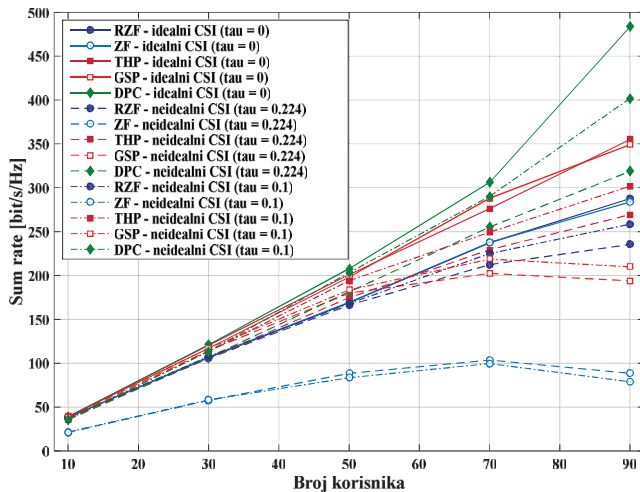
Na osnovu prikazanih rezultata jasno se uočava da se najbolje performanse (kapacitet) u svim slučajevima ostvaruju putem primene optimalne DPC tehnike, nakon čega slede nelinearne tehnike (THP i GSP tehnike) sa sličnim ponašanjem, dok linearne tehnike (RZF i ZF tehnike) ostvaruju veoma slične, najlošije performanse u odnosu na ostale tehnike precodiranja. Primenom THP tehnike ostvaruju se nešto bolje performanse u odnosu na GSP tehniku, osim u slučaju postojanja korelacije korisničkih kanala kada je broj korisnika između 50 i 80, a kada se primenom GSP tehnike ostvaruju nešto veće vrednosti kapaciteta u odnosu na THP tehniku. Dodatno, sve posmatrane tehnike precodiranja karakteriše značajan gubitak kapaciteta usled postojanja korelacije između korisničkih kanala, pri čemu je najmanji relativni gubitak ostvaren u slučaju DPC tehnike, nakon čega slede nelinearne tehnike precodiranja. Linearne

tehnikе pokazuju najveći relativni gubitak kapaciteta u ovom slučaju, pogotovo za veliki broj korisnika, a usled značajnog porasta korelacije kanala koju treba potisnuti putem procesa ortogonalizacije. U slučaju hibridnog postupka prekodiranja (ZF-THP), a na račun povećanja računске složenosti, gotovo se dostiže nivo performansi ostvaren za nelinearne tehnikе.

Kao što je ranije navedeno, izvršena je i analiza performansi u pogledu ukupne ostvarene SE (*Sum-Rate*) za posmatrani skup tehnika prekodiranja za slučaj neidealnog poznavanja CSI, tj. u slučaju kada postoji greška procene CSI, a koja se karakteriše putem faktora τ , kao što je to dato u poglavlju II, i to za dve vrednosti ovog parametra. Analiza je obavljena pod istim uslovima kao i za slučaj idealne procene (poznavanja) CSI. Na Sl. 3 dati su rezultati analize dobijeni za slučaj kada se posmatra prenos preko nekorelisanih međusobno nezavisnih kanala sa Rejljevim fadingom, za različite vrednosti broja korisnika i za vrednost SNR od 20 dB, dok su na Sl. 4 dati rezultati analize u slučaju postojanja korelacije između kanala.



Sl. 3. Ostvareni ukupni kapacitet za slučaj nekorelisanih kanala u slučaju idealnog poznavanja CSI i postojanja greške procene CSI (u funkciji vrednosti τ) za SNR = 20 dB



Sl. 4. Ostvareni ukupni kapacitet za slučaj korelisanih kanala u slučaju idealnog poznavanja CSI i postojanja greške procene CSI (u funkciji vrednosti τ) za SNR = 20 dB

Na osnovu rezultata prikazanih na Sl. 3 i Sl. 4 jasno se uočava izuzetno velika osetljivost ZF tehnikе na grešku procene CSI, a usled gubitka ortogonalnosti i pojave međukorisničke interferencije koja predstavlja osnovno ograničenje kapaciteta (tj. uticaj šuma je zanemariv). Nisu prikazane performanse za ZF-THP tehniku, koja zbog primene dva koraka prekodiranja uz grešku procene CSI prestaje da funkcioniše. Dodatno, uočava se da se pri primeni DPC i THP tehnikе ostvaruje sličan relativan gubitak performansi u pogledu kapaciteta sistema (pri čemu se primenom DPC tehnikе generalno ostvaruju nešto bolje performanse osim u slučaju korelisanih kanala kada je broj korisnika između 50 i 80), dok se pri primeni GSP tehnikе, iako ona funkcioniše na sličnom principu kao i THP tehnikа, zapaža nešto veća osetljivost na grešku procene CSI usled primene GSO za dekompoziciju matrice kanala. U slučaju neidealne procene CSI, a u poređenju sa nelinearnim tehnikama prekodiranja, primenu RZF tehnikе karakteriše manji relativan gubitak performansi, pri čemu se u ovom slučaju ostvaruje veći kapacitet u poređenju sa GSP tehnikom prekodiranja. Ipak, treba naglasiti da je u realnom slučaju ovaj gubitak performansi nešto veći pošto je u korišćenom modelu posmatrano da je pri primeni RZF postupka poznata tačna vrednost τ , koja se koristi u okviru RZF postupka [10]. Zapravo u ovom slučaju, način realizacije RZF tehnikе prekodiranja usklađen je sa načinom na koji se obavlja neidealna estimacija matrice kanala. U slučaju kada bi se pri primeni RZF tehnikе koristila pogrešna vrednost τ , može se očekivati da se performanse ostvarene primenom RZF tehnikе približe onim ostvarenim pri primeni ZF tehnikе prekodiranja.

B. Analiza računске složenosti

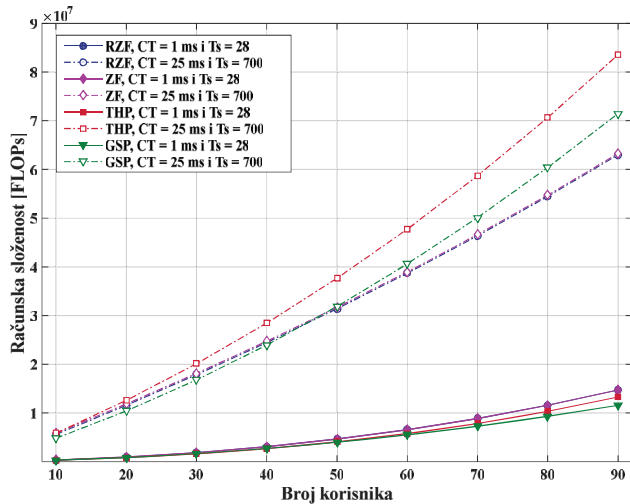
Računška složenost tehnik prekodiranja kvantifikovana je brojem FLOPs operacija za mMIMO sistem sa K korisnika i sa M antena. U računsku složenost su uračunate operacije pri određivanju matrice \mathbf{W} za datu tehniku prekodiranja, ali i svi proračuni pri prenosu T_S prekodiranih vektora podataka za jedan interval koherencije kanala trajanja CT , [5], kada se koristi ista matrica \mathbf{W} . U Tabeli II dati su izrazi za računsku složenost posmatranih tehnik, pri čemu nisu uključene nelinearne tehnikе prekodiranja na bazi primene DPC tehnikе i VP tehnikе, a koje zavise od načina realizacije i značajno su veće u odnosu na ostale tehnikе.

TABELA II. RAČUNSKA SLOŽENOST TEHNIKA PREKODIRANJA, [5],[13]

	BROJ FLOPS OPERACIJA
ZF	$4K^3 + 2KM(4M - 1) + (K^2 + K)(4M - 1) + 8K^2 + 6K + 2MT_S(4K - 1)$
RZF	$4K^3 + K^2(12M + 7) + K(4M + 6) + MT_S(8K - 2)$
THP	$16K^3/3 + 2K(4KM - K + 2) + 2T_S[2K + 2K^2 + M(4K - 1) - 4]$
GSP	$K^2(11M + 5) + 2K(8M - 5) + (6 - 18M) + T_S[4K^2 + 6K(M + 5)]$

Na Sl. 5 dato je poređenje računске složenosti za RZF, ZF, THP i GSP tehnikе u slučaju kada se koristi M antena, pri čemu se broj korisnika K povećava od 10 do 90. Da bi se prikazala značajna zavisnost složenosti od vrednosti T_S , izabrane su tipične vrednosti, i to male (mobilni korisnici) i velike (statični korisnici) vrednosti CT za 3.5 GHz opseg, tj. 1 ms i 25 ms respektivno, kojima odgovaraju vrednosti T_S 28 i 700 za OFDM sistem sa 30 kHz razmakom između podkanala (što je preuzeto iz 3GPP standarda). Na osnovu Sl. 5, vidi se da inverzija

matrica u okviru ZF, RZF i THP tehnika uzrokuje veću računsku složenost u odnosu na GSP tehniku, osim u slučaju primene ZF i RZF tehnika za velike vrednosti T_S i veliki broj korisnika. Pri tome, treba primetiti da za male vrednosti T_S (npr. mobilni korisnici) obe linearne tehnike prekodiranja odlikuje veća računaska složenost u odnosu na nelinearne tehnike.



Sl. 5. Računska složenost posmatranih tehnika prekodiranja, $M = 100$.

V. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani rezultati uporedne analize performansi osnovnih tehnika prekodiranja namenjenih za DL smer prenosa u mMIMO sistemima. Analiza je izvršena na osnovu razvijenog simulacionog modela koji omogućava analizu performansi DL prenosa u okviru mMIMO sistema pri primeni posmatranih tehnika prekodiranja koji u obzir uzima neke realne uslove propagacije signala, kao što su prenos u slučaju nekorelisanih i korelisanih kanala korisnika, odnosno obrada u slučaju idealne procene (poznavanja) CSI i pojave grešaka pri proceni CSI.

Na osnovu dobijenih rezultata analize može se zaključiti da posmatrane nelinearne tehnike prekodiranja (THP tehnika i GSP tehnika) predstavljaju dobre kandidate za primenu u DL smeru budućih mMIMO sistema, kako u pogledu potencijalnog kapaciteta u slučaju postojanja korelacije između korisničkih kanala, tako i po pitanju manje osetljivosti na uticaj greške procene CSI u odnosu na linearne tehnike. Pri tome, RZF tehnika predstavlja znatno pogodnije rešenje u odnosu na jednostavniju ZF tehniku u realnim uslovima rada. Osnovni nedostatak primene nelinearnih tehnika prekodiranja predstavlja generalno veća računaska složenost. Ipak, može se zaključiti da u određenim scenarijima primene mMIMO sistema, npr. u slučaju prenosa ka pretežno stacionarnim korisnicima (npr. IoT uređaji), kada vreme koherencije kanala ima relativno velike vrednosti i u slučaju postojanja velikog broja korisnika, GSP tehniku kao nelinearnu tehniku prekodiranja, karakteriše manja računaska složenost u odnosu na linearnu RZF tehniku. Pri tome, treba imati u vidu da jednostavnija GSP tehnika ostvaruje manji potencijalni kapacitet u odnosu na složeniju THP tehniku.

LITERATURA

[1] C. Bockelmann, N. Pratas, H. Nikopour, K. Au, T. Svensson, C. Stefanovic, P. Popovski and A. Dekorsy, "Massive machine-type communications in 5G: Physical and MAC layer solutions," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 9, pp. 59–65, September 2016.

[2] E. Castañeda, A. Silva, A. Gameiro and M. Kountouris, "An Overview on Resource Allocation Techniques for Multi-User MIMO Systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 239-284, 1st quarter 2017.

[3] T. Kebede, Y. Wondie, J. Steinbrunn, H. B. Kassa and K. T. Komegay, "Precoding and Beamforming Techniques in mmWave-Massive MIMO: Performance Assessment," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 16365-16387, 2022.

[4] A. Wiesel, Y. C. Eldar and S. Shamai, "Zero-Forcing precoding and generalized inverses," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 9, pp. 4409-4418, September 2008.

[5] D. B. Lukic, G. B. Markovic and D. D. Drajić, "Two-Stage Precoding Based on Overlapping User Grouping Approach in IoT-Oriented 5G MU-MIMO Systems," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, Article ID 8887445, 13 pages, 2021.

[6] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, Wiley - IEEE Press New York, USA, 1974, pp. 60-65.

[7] A. Adhikary, J. Nam, J.-Y. Ahn and G. Caire, "Joint spatial division and multiplexing - The large-scale array regime," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 59, no. 10, pp. 6441-6463, October 2013.

[8] M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems," *Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2145-2146, Nov. 1991.

[9] K. Yu and B. Ottersten, "Models for MIMO propagation channels: A review," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 7, pp. 653–666, 2002.

[10] A. Mueller, A. Kammoun, E. Björnson and M. Debbaha, "Linear precoding based on polynomial expansion: Reducing complexity in massive MIMO," *Journal on Wireless Communications and Networking*, 2016:63, February 2016.

[11] N. Fatema, G. Hua, Y. Xiang, D. Peng and I. Natgunanathan, "Massive MIMO Linear Precoding: A Survey," *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 4, pp. 3920-3931, December 2018.

[12] S. Begashaw, X. Shao, E. Visotsky, F. Vook and A. Ghosh, "Evaluation of Tomlinson-Harashima Precoding for 5G Massive MU-MIMO," in *Proceedings of IEEE 5G World Forum (5GWF)*, Silicon Valley, CA, USA, July 2018, pp. 77-82.

[13] R. Dabetic and G. Markovic, "A low-complexity transmit combining method for downlink of massive MU-MIMO systems," *Electronics Letters*, vol. 59, no. 10, May 2023.

[14] C. B. Peel, B. M. Hochwald and A. L. Swindlehurst, "A Vector-Perturbation Technique for Near-Capacity Multiantenna Multiuser Communication - Part I: Channel Inversion and Regularization," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, no. 1, pp. 195-202, Jan. 2005.

[15] J. Lee, E. Tejedor, K. Ranta-aho, H. Wang, K.T. Lee, E. Semaan, E. Mohyeldin, J. Song, C. Bergljung and S. Jung, "Spectrum for 5G: Global status, challenges, and enabling technologies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 3, pp. 12-18, March 2018.

ABSTRACT

The performance analysis for digital precoding techniques intended for the downlink direction in MU-MIMO systems, i.e. massive MIMO (mMIMO) system, for different conditions regarding the users' channel correlation and the quality of channel state information assessment is given. The main results and conclusions of the comparative analysis are presented, in terms of potential capacities of mMIMO systems for various application scenarios, as well as the computational complexity.

Performance analysis of digital precoding techniques for mMIMO systems in different application conditions

R. Dabetić, L. Mitrović, Đ. Lukić, G. Marković, D. Drajić