

Analiza performansi IoT mMIMO sistema u *uplink* smeru uz bežični prenos energije na bazi HAP TDD

Lazar Mitrović

Katedra za Telekomunikacije

Elektrotehnički fakultet,

Univerzitet u Beogradu

Beograd, Republika Srbija

lazar@etf.bg.ac.rs,

<https://orcid.org/0000-0002-9558-0540>

Dorđe Lukić

Elektrotehnički fakultet,

Univerzitet u Beogradu (PhD student),

Beograd, Republika Srbija

Djordje.Lukic@aspiretechnology.com,

<https://orcid.org/0000-0002-8432-4277>

Vesna Blagojević

Katedra za Telekomunikacije

Elektrotehnički fakultet,

Univerzitet u Beogradu

Beograd, Republika Srbija

vesna.golubovic@etf.bg.ac.rs,

<https://orcid.org/0000-0001-7328-1593>

Goran Marković

Katedra za Telekomunikacije

Elektrotehnički fakultet,

Univerzitet u Beogradu

Beograd, Republika Srbija

gmarkovic@etf.bg.ac.rs,

<https://orcid.org/0000-0002-6638-8058>

Abstract — Razmatran je IoT (*Internet of Things*) senzorski sistem za podršku velikog broja jednostavnih IoT uređaja, koji se bežično napajaju električnom energijom iz hibridne pristupne tačke (*Hybrid Access Point*, HAP). HAP obavlja prenos energije ka IoT uređajima (*downlink*) i prijem podataka od IoT uređaja (*uplink*) tokom *Time-Division Duplex* ciklusa, uz komunikaciju na bazi *massive MIMO* (*Multiple-Input Multiple-Output*) tehnologije primenjene u *uplink* smeru. Razvijen je simulacioni model i izvršena analiza performansi prenosa za različite uslove rada u smislu međusobne korelacije kanala, kvaliteta procene stanja kanala, i odnosa predajne snage HAP i trajanja intervala za prenos energije ka IoT uređajima. Dati su rezultati i zaključci analize u pogledu ukupnog kapaciteta sistema za date scenarije rada, kao i prikaz mogućnosti optimizacije parametara HAP.

Cljučne reči—*Wireless powered communications, hybrid access point, IoT-based sensor systems, energy harvesting, massive MIMO.*

I. UVOD

Ubrzan razvoj informaciono-komunikacionih tehnologija, tehnologija izrade senzora, *embedded* sistema, i drugih srodnih oblasti (npr. *Big Data*, *data science* i veštačka inteligencija) omogućio je brz razvoj koncepta IoT (*Internet of Things*) sistema, M2M (*Machine-to-Machine*) sistema, kao i bežičnih senzorskih mreža (*Wireless Sensor Networks*), [1]. Jedna bitna oblast primene rešenja zasnovanih na navedenim konceptima, predstavljaju senzorski sistemi, koji omogućavaju masovno prikupljanje, skladištenje, obradu, analizu i primenu podataka za potrebe raznih servisa. Razvoj senzorskih sistema zahteva brz i uspešan razvoj novih senzorskih uređaja koji, između ostalog, sadrže *embedded* senzore i komunikacione interfejs za povezivanje u složene senzorske mreže, najčešće korišćenjem bežične komunikacije. Dalji razvoj senzorskih sistema često se posmatra u formi IoT senzorskih sistema. Pri tome, neki od osnovnih izazova u razvoju ovih sistema su pouzdano napajanje električnom energijom (i pitanja vezana za energetska efikasan rad i komunikaciju), razvoj telekomunikacionih mreža koje podržavaju pristup i prenos podataka za izuzetno veliki broj uređaja, kao i pouzdanost ostvarivanja komunikacije.

Iako se bežično napajanje uređaja može ostvariti na više načina, od posebnog značaja je razvoj WPC (*Wireless Power Communications*) sistema, gde je moguće ostvariti bežično povezivanje uređaja (prenos podataka), ali i bežični prenos

energije putem elektromagnetnih talasa u RF opsegu, [2]-[4]. Koncept WPC sistema je posebno interesantan za razvoj IoT senzorskih sistema za primene gde se senzorski uređaji koriste za masovno prikupljanje mernih podataka preko centralnog uređaja, tj. za prenos podataka u *uplink* (UL) smeru, i retku komunikaciju ka njima, tj. prenos u *downlink* (DL) smeru. Ovo uslovljava razvoj rešenja koje podržava bežično napajanje, veliki kapacitet sistema u UL smeru, kao i visoku konektivnost za veoma veliki broj IoT senzorskih uređaja. Moguće rešenje predstavlja kombinacija WPC sistema i mMIMO (*massive Multiple-Input Multiple-Output*) sistema koja podržava zahteve u oba smera prenosa (DL i UL), [5]-[7]. Porast kapaciteta mMIMO sistema zahteva primenu složenih tehnika digitalnog *beamforming-a*, pri čemu se za UL smer najčešće posmatraju ZF (*Zero-Forcing*) i RZF (*Regularized Zero Forcing*) tehnike, kao i primenu složenih metoda za grupisanje korisnika, [8], da bi se podržao pristup izuzetno velikog broja korisnika koji je veći od broja antena pristupne tačke mMIMO sistema.

Posmatra se bežični komunikacioni sistem za prikupljanje mernih podataka od velikog broja IoT senzorskih uređaja (IoT *Sensor Nodes*, IoTSN), u obliku WPC sistema sa hibridnom pristupnom tačkom (*Hybrid Access Point*, HAP), [2]. HAP obavlja prenos energije ka IoTSN (DL smer) i prijem podataka od IoTSN (UL smer) na bazi primene TDD (*Time-Division Duplex*) tokom periodičnih TDD ciklusa. Za komunikaciju HAP sa velikim brojem IoTSN uređaja, koristi se mMIMO tehnologija, uz primenu metoda grupisanja IoTSN u podgrupe i istovremeni UL prenos od svih IoTSN iz jedne podgrupe ka HAP primenom ZF tehnike. Na osnovu dostupne literature, ovde posmatrano rešenje nije ranije detaljno analizirano, a ovde je dat samo početni model sistema uz analizu performansi.

Analiza performansi posmatranog IoT senzorskog sistema je zahtevala razvoj adekvatnog modela mMIMO sistema. Na osnovu razvijenog simulacionog modela sistema, sprovedena je opsežna analiza performansi datog sistema u smislu ukupnog kapaciteta za UL smer, izvršena putem *Monte-Carlo* simulacija. Posmatrani su slučajevi kada postoji i ne postoji međusobna korelacija kanala između IoTSN i HAP, slučaj idealnog poznavanja stanja kanala (CSI, *Channel State Information*) i slučaj pojave grešaka estimacije CSI, uz primenu dva metoda za grupisanje korisnika (slučajno grupisanje i grupisanje na



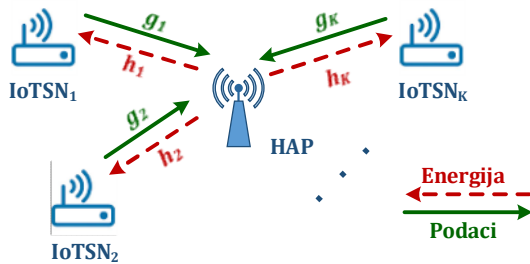
osnovu međusobne korelacije kanala), tj. scenariji rada za koje se zna da značajno utiču na performanse mMIMO sistema, [1], [5]-[8]. Osim toga, analiziran je i uticaj parametara HAP tokom TDD ciklusa na ponašanje i ukupan kapacitet sistema, i to: trajanje intervala pri prenosu energije ka IoTSN, odnos srednje snage na predaji HAP i nivoa šuma pri prijemu signala od IoTSN, uz njihovu optimizaciju radi poboljšanja performansi.

II. OPIS POSMATRANOG MODELA SISTEMA

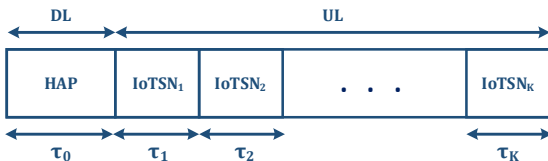
U ovom odeljku je dat detaljan opis modela posmatranog IoT senzorskog sistema sa primenom bežičnog napajanja IoTSN uređaja. Definisan je detaljan model sistema i opisan princip rada, uključujući elemente kao što su modelovanje MIMO kanala, tehnika obrade i postupak analize performansi.

A. Princip rada HAP uz primenu TDD tehnike dupleksiranja

Posmatramo WPC komunikacioni sistem za prikupljanje mernih (senzorskih) podataka od skupa IoTSN, uz ostvareno bežično napajanje IoTSN električnom energijom, sa centralnim uređajem sistema u formi HAP. HAP ima dvojnu funkciju, gde u DL smeru obavlja prenos energije skupa od K IoTSN, dok u UL smeru obavlja prijem podataka koje tokom definisanih vremenskih intervala (slotova) šalju IoTSN. Da bi se omogućila jednostavnija realizacija HAP i IoTSN, i time smanjili troškovi implementacije i rada ovih uređaja, za prenos energije od HAP ka IoTSN u DL smeru i prenos podataka od IoTSN ka HAP u UL smeru, usvojena je primena vremenskog dupleksiranja (TDD). Na **Sl. 1** je data realizacija WPC sistema sa jednim HAP i K IoTSN uređaja, a na **Sl. 2** je prikazana usvojena TDD organizacija rada sistema u DL smeru i UL smeru.



Sl. 1 – Koncept rada jednostavnog WPC HAP sistema, [2]



Sl. 2 Vremenska organizacija HAP linka na osnovu primene TDD, [2]

U skladu sa **Sl. 2**, HAP koristi TDD protokol tako da u DL smeru vrši bežični prenos energije tokom intervala vremena trajanja τ_0 sekundi. Svi IoTSN šalju podatke ka HAP u TDD UL smeru, u uzastopnim vremenskim slotovima trajanja τ_k sekundi, $k = 1, 2, \dots, K$, uz primenu TDMA (*Time Division Multiplex Access*), pri čemu koriste svu prethodno prikupljenu energiju. Optimizacija u cilju maksimizacije kapaciteta, zahteva ostvarivanje kompromisa između trajanja intervala za TDD DL prenos energije i trajanja intervala za TDD UL prenos podataka tokom TDD ciklusa fiksnog trajanja T . U cilju maksimizacije kapaciteta, raspoloživo vreme tokom TDD ciklusa, trajanja $T = \tau_0 + \sum_{k=1}^K \tau_k$, treba podeliti na intervale odgovarajućeg

trajanja. Ako se poveća trajanje vremenskog intervala za TDD DL prenos energije (τ_0), IoTSN prikupljaju veću količinu energije, pa prenos podataka u TDD UL smeru (u dodeljenom TDMA slotu) mogu da obave emitovanjem signala sa većom predajnom snagom, i tako ostvare povećanje kvaliteta prenosa. Ipak, usled povećanja trajanja vremenskog intervala τ_0 , zbog fiksnog trajanja TDD ciklusa, skraćuju se intervali vremena (TDMA slotovi) za prenos podataka u TDD UL smeru, pa IoTSN šalju manji broj simbola tokom TDMA slotu, usled čega se smanjuje kapacitet sistema, [2]. Navedene kontradiktorne posledice promene trajanja intervala τ_0 na kapacitet sistema, ukazuju da treba odrediti optimalnu vrednost τ_0 uz zahtev ostvarivanja maksimalnog kapaciteta u TDD UL smeru prenosa pod datim uslovima.

Kapacitet k -tog IoTSN u sistemu može se odrediti na sledeći način [2],

$$R_k = \tau_k \log_2 \left(1 + \frac{P_k |g_k|^2}{2\sigma^2} \right) = \tau_k \log_2 \left(1 + \frac{\eta |g_k|^2 |h_k|^2 P_s \tau_0}{2\sigma^2 \tau_k} \right), \quad (1)$$

gde je P_k predajna snaga k -tog IoTSN, g_k kompleksni dobitak kanala od k -tog IoTSN do HAP u TDD UL smeru, $2\sigma^2$ je varijansa kompleksnog AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) na prijemu u HAP, $\eta \in (0,1)$ je koeficijent efikasnosti konverzije energije u IoTSN, h_k je kompleksni dobitak kanala od HAP do k -tog IoTSN, a P_s je predajna snaga HAP u TDD DL smeru. Izraz (1) je dobijen uz pretpostavkom da se sva prikupljena energija u IoTSN tokom jednog TDD ciklusa, potpuno iskoristi za potrebe slanja podataka u TDD UL smeru. U realnom scenariju primene, kompleksni dobitci kanala u oba smera prenosa, h_k i g_k , $k = 1, 2, \dots, K$, su slučajne promenljive koje se za male vrednosti trajanja TDD ciklusa T , značajno menjaju samo od jednog do drugog TDD ciklusa. To posebno važi za slučaj stacionarnih IoTSN, pa se može pretpostaviti da u WPC sistemu postoji isključivo blok feding (*block fading*).

Ukupan kapacitet posmatranog WPC HAP sistema je, [2],

$$R(\tau_0, \dots, \tau_k) = \sum_{k=1}^K R_k = \sum_{k=1}^K \tau_k \log_2 \left(1 + \frac{\eta |g_k|^2 |h_k|^2 P_s \tau_0}{2\sigma^2 \tau_k} \right) \quad (2)$$

pri čemu se optimizacijom pod uslovima $\sum_{k=1}^K \tau_k \leq T$ i $\tau_k \geq 0, k = 0, 1, \dots, K$, može ostvariti maksimalni kapacitet sistema u toku trajanja jednog TDD ciklusa, čija je vrednost data izrazom,

$$R_{max} = \sum_{k=1}^K \tau_k^{opt} \log_2 \left(1 + \frac{\eta |g_k|^2 |h_k|^2 P_s \tau_0^{opt}}{2\sigma^2 \tau_k^{opt}} \right). \quad (3)$$

B. Model HAP uz primenu TDD tehnike i mMIMO tehnologije

Opisani koncept WPC sistema sa HAP koji funkcioniše na bazi TDD tehnike, predstavlja moguće i pogodno rešenje za IoT servis masovnog prikupljanja podataka od veoma velikog broja jednostavnih i jeftinih IoTSN, koji su opremljeni sa jednom primopredajnom antenom i bežično se napajaju energijom od strane HAP. Posmatra se mMIMO zasnovan IoT senzorski sistem sa HAP kao centralnim uređajem koji koristi prethodno opisan TDD protokol, i opremljen je antenskim sistemom u formi uniformnog pravougaonog antenskog niza sa M antena. Generalno mMIMO sistem podržava rad izuzetno velikog broja IoTSN koji svoje podatke šalju tokom istog TDD ciklusa trajanja T , i gde je broj IoTSN uređaja K znatno veći od broja antena u antenskom nizu kojim je opremljen HAP (tj. $K > M$).

HAP u skladu sa TDD protokolom funkcioniše u DL smeru tako što preko antenskog niza tokom intervala trajanja τ_0 emituje signal ukupne predajne snage P_s , koja je ravnomerno raspodeljena na svih M antena. U preostalom vremenu tokom TDD ciklusa, trajanja T , IoTSN šalju svoje podatke ka HAP u TDD UL smeru, tokom G uzastopnih TDMA slotova trajanja τ_g sekundi, $g = 1, 2, \dots, G$. Tokom svakog TDMA slotu, HAP istovremeno prima tokove podataka od maksimalno M IoTSN, tj. samo od onih iz jedne od G neprekidajućih podgrupa IoTSN (tj. svaki od $K > M$ IoTSN je raspodeljen u samo jednu od G podgrupa). U posmatranom modelu sistema, usvojeno je rešenje u kome je trajanje TDMA slotova za prenos u TDD UL smeru za sve formirane podgrupe IoTSN jednako, tj. važi da je,

$$\tau_g = \frac{T - \tau_0}{G}, \forall g \in \{1, 2, \dots, G\}, \quad (4)$$

odnosno, nije posmatran slučaj optimizacije trajanja intervala vremena za prenos energije u TDD DL smeru (τ_0) i trajanja pojedinačnih TDMA slotova za prenos podataka u TDD UL smeru ($\tau_g, g = 1, 2, \dots, G$). Za razliku od prethodno opisanog sistema sa **Sl. 1**, tokom jednog TDMA slotu podatke ka HAP istovremeno šalje podgrupa sa $K_g \leq M, g = 1, 2, \dots, G$, IoTSN uz primenu MIMO tehnologije, pri čemu se K_g tokova podataka koji su nezavisno poslati od strane ovih IoTSN razdvajaju na prijemu u HAP na osnovu primene ZF (*Zero-Forcing*) tehnike digitalnog *beamforming*-a, [7], [15]-[16]. Komunikacija IoTSN sa HAP ostvaruje se primenom pogodnog signaliziranja, npr. klasičnih M -arnih linearnih digitalnih modulacija ili OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), putem koga se postiže željena energetska i spektralna efikasnost prenosa uz uslov ispunjenja zahtevanog nivoa kvaliteta prenosa.

U posmatranom modelu sistema svi složeni procesi obrade, kao što su estimacija trenutnog CSI, tj. estimacija kompleksne kanalske matrice mMIMO sistema, proces grupisanja skupa od K IoTSN u G neprekidajućih podgrupa sa najviše M članova i razdvajanje tokova podataka za trenutnu podgrupu IoTSN tokom dodeljenog TDMA slotu za TDD UL prenos uz primenu ZF tehnike, odvijaju se na strani HAP. Samim tim, IoTSN su veoma jednostavni, čime se osim rešavanja problema napajanja energijom i produženja života IoTSN, podržava realizacija sa malom složenosti, tj. smanjenom cenom uređaja.

Za TDD DL smer prenosa, kompleksnu matricu kanala mMIMO sistema, $\mathbf{H}_{DL} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K]^T \in \mathbb{C}^{K \times M}$, definiše skup vektora kanala između HAP i svakog od K IoTSN, $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}, k = 1, 2, \dots, K$, i ona se smatra fiksnom tokom perioda koherencije kanala. U TDD UL smeru prenosa, postoje posebne kompleksne matrice kanala mMIMO sistema za svaku od G podgrupa sa $K_g \leq M, g = 1, 2, \dots, G$, IoTSN, tj. kanalske matrice $\mathbf{H}_{UL,g} = [\mathbf{h}_{1,g}, \mathbf{h}_{2,g}, \dots, \mathbf{h}_{K_g,g}] \in \mathbb{C}^{M \times K_g}$, dobijene tako što se u matrici koja je rezultat transponovanja matrice kanala $\mathbf{H}_{DL}$, zadrže samo kolone koje se odnose na IoTSN iz date podgrupe. U usvojenom modelu mMIMO sistema sa jednim HAP uređajem, međuelijska interferencija iz okolnih sistema istog tipa je praktično zanemariva ili se može modelovati kao deo AWGN. Međukorisnička interferencija i greška procene CSI su glavni faktori ograničenja performansi ovog mMIMO sistema, ali se njihov uticaj potiskuje putem ZF tehnike, [7]-[8].

U sprovedenoj analizi su posmatrana dva slučaja u pogledu kvaliteta procene CSI: slučaj idealnog poznavanja CSI, kada

HAP poseduje tačnu matricu $\mathbf{H}_{DL}$, i slučaj greške procene CSI, uz primenu modela sa greškom estimacije matrice $\mathbf{H}_{DL}$, koji je definisan za parametre $\alpha = 0.1$ i $\tau = \sqrt{0.01}$ iz [13].

U TDD DL smeru (prenos energije) HAP emituje nezavisne signale preko svake od M antena, gde se ukupno raspoloživa srednja snaga na predaji P_s ravnomerno deli na M antena. Svaki od K IoTSN uređaja prikuplja energiju iz M nekoreliranih signala, i na kraju intervala trajanja τ_0 sakuplja zalihu energije,

$$E_{Rx,k} = \eta P_s \tau_0 \times 10^{-\alpha_k[dB]/10} \times \sum_{m=1}^M |H_{DL}(k, m)|^2, \quad (5)$$

gde je $\eta \in (0, 1)$ koeficijent efikasnosti konverzije energije u IoTSN, $H_{DL}(k, m)$ kompleksni dobitak kanala od m -te antene HAP do k -tog IoTSN, $\alpha_k[dB]$ je slabljenje usled prostiranja radio signala od HAP do k -tog IoTSN, gde se uzimaju u obzir razlike količina prikupljene energije IoTSN u funkciji rastojanja od HAP. Slabljenje $\alpha_k[dB]$ je posmatrano u oba smera prenosa (DL/UL), i zbog jednostavnosti je računato kao slabljenje pri prostiranju radio signala u slobodnom prostoru. Predajnu snagu k -tog IoTSN, $k = 1, 2, \dots, K$, tokom TDMA slotu, dodeljenog njegovoj podgrupi, određuje prikupljena energija $E_{Rx,k}$ kao,

$$P_{Tx,k} = \frac{\eta P_s \tau_0}{\tau_g} \times 10^{-\alpha_k[dB]/10} \times \sum_{m=1}^M |H_{DL}(k, m)|^2. \quad (6)$$

U TDD UL smeru (prenos podataka od IoTSN ka HAP), tokom svakog od TDMA slotova, HAP ostvaruje prijem signala $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{K_g \times 1}$ od svih $K_g \leq M$ IoTSN iz date podgrupe $g = 1, 2, \dots, G$, koji je definisan kao [5], [7], [15]-[16],

$$\mathbf{y}_g = \mathbf{W}_g (\mathbf{H}_{UL,g} \mathbf{d}_g + \mathbf{n}_g), \quad (7)$$

$$\mathbf{W}_g = (\mathbf{H}_{UL,g}^H \mathbf{H}_{UL,g})^{-1} \mathbf{H}_{UL,g}^H, \quad (8)$$

gde je $\mathbf{W}_g \in \mathbb{C}^{K_g \times M}$ matrica težinskih koeficijenata pri primeni ZF tehnike u UL, $\mathbf{d}_g \in \mathbb{C}^{K_g \times 1}$ je kompleksan vektor podataka za svih K_g IoTSN iz date podgrupe, a $\mathbf{n}_g \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{I}_{K_g})$ je vektor kompleksnog AWGN nulte srednje vrednosti i varijanse $2\sigma^2$, $(\cdot)^H$ je operator transponovanja sa konjugacijom. Srednja snaga informacionih signala svih IoTSN podgrupe $g = 1, 2, \dots, G$, je $P_d^g = \mathbb{E}[\mathbf{d}_g \mathbf{d}_g^H]$, a srednja snaga na prijemu za n -ti IoTSN, $n = 1, 2, \dots, K_g$, iz podgrupe g , za svaku od M antena HAP je,

$$P_{Rx,m}^{g,n} = P_{Tx}^{g,n} P_d^g H_{UL,g}(m, n) \times 10^{-\frac{\alpha_{g,n}[dB]}{10}}, \quad (9)$$

gde su $P_{Tx}^{g,n}$ i $\alpha_{g,n}[dB]$ odgovarajuće vrednosti iz izraza (6) za dati IoTSN. ZF tehnika u HAP se realizuje samo množenjem sa $\mathbf{W}_g$, bez množenja sa $1/\beta$, $\beta = (1/M) \sum_{j=1}^M 1/\lambda_j^2$, gde su λ_j sopstvene vrednosti kanalske matrice, [16]-[17], koje se inače koriste pri prenosu podataka u DL smeru MIMO sistema, [7].

Na osnovu izraza (1), i rezultata analize primene ZF tehnike u slučaju idealne CSI i pojave greške estimacije CSI (tj. $\mathbf{H}_{UL,g}$), pri prenosu podataka skupa IoTSN za podgrupu $g = 1, 2, \dots, G$, srednji očekivani kapacitet za n -ti IoTSN, $n = 1, 2, \dots, K_g$, iznosi, [8], [15]-[17],

$$R_n^g = \tau_g \log \left[1 + \frac{P_{Tx}^{g,n} P_d^g \times 10^{-\frac{\alpha_{g,n}[dB]}{10}} \times \mathbb{E}[\|\mathbf{W}_g \mathbf{n} \mathbf{H}_{UL,g,n}\|]}{\sigma_{e,n}^2 \sum_{n=1}^{K_g} \left(P_{Tx}^{g,n} P_d^g \times 10^{-\frac{\alpha_{g,n}[dB]}{10}} \right) + 2\sigma^2 \mathbb{E}[\|\mathbf{W}_g \mathbf{n}\|^2]} \right], \quad (10)$$

gde su $\mathbf{W}_{g,n}$ n -ta vrsta matrice $\mathbf{W}_g$ i $\mathbf{H}_{UL,g,n}$ n -ta kolona matrice $\mathbf{H}_{UL,g}$ koje odgovaraju n -tom IoTSN iz podgrupe, dok je $\sigma_{e,n}^2$ varijansa greške procene $\mathbf{H}_{UL,g,n}$, [17]. Za idealnu estimaciju CSI, važi da je $\sigma_{e,n}^2 = 0$. U sprovednoj analizi, sve promenljive iz izraza (9), koje predstavljaju matematičko očekivanje vektora i zavise od elemenata slučajne matrice $\mathbf{H}_{DL}$, tj. transformacija matrice (npr. $\mathbf{H}_{UL,g}$ i $\mathbf{W}_{UL,g}$), estimirane su tako što je slučajna matrica $\mathbf{H}_{DL}$ na nezavisni način generisana $N_{avg} = 100$ puta za dati skup IoTSN, na osnovu čega je izvršen njihov proračun.

Ukupan kapacitet, tzv. *Sum-Rate* (SR), posmatranog sistema pri prenosu u TDD UL smeru, za sve trenutne IoTSN u sistemu (K IoTSN) je definisan izrazom,

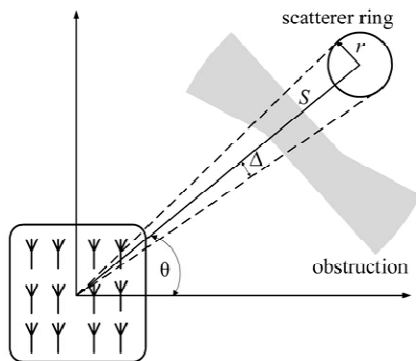
$$R_{sum} = \sum_{g=1}^G \sum_{n=1}^{K_g} R_n^g. \quad (11)$$

C. Modelovanje matrice kanala za mMIMO sistem

Za potrebe analize usvojen je mMTC (*massive Machine-Type Communications*) scenario za 5G NR sisteme, sa IoTSN u *indoor* okruženju, gde servis pruža *outdoor* HAP. Ovaj scenario primene generalno rezultuje pojavom određene prostorne korelacije NLoS (*Non-Line-of-Sight*) kanala između HAP i prostorno bliskih IoTSN, [8]. Za antenski sistem HAP se može smatrati da je postavljen visoko iznad tla, pa se ne očekuje pojava lokalnog rasejanja signala. Stoga, može se očekivati visok nivo korelacije signala pri emitovanju sa predajnih antena HAP, što se modeluje putem prostorne matrice korelacije na predaji $\mathbf{R}_{TX} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ primenom Džeksovog (*Jakes*) *one-ring MIMO channel scattering* modela, [11]-[12], datog na Sl. 3. U tom modelu θ je ugao azimuta pozicije IoTSN na rastojanju S od HAP, koja se nalazi u okruženju prstena sa reflektorima signala čiji je poluprečnik r . Rasipanje signala po uglu Δ aproksimira se kao $\Delta \approx \arctg(r/S)$, sa koeficijentom prostorne korelacije predajnih antena $1 \leq p, q \leq M$, definisanog sa, [12],

$$[\mathbf{R}_{TX}]_{p,q} = \frac{1}{2\Delta} \int_{-\Delta}^{\Delta} e^{j\mathbf{g}^T(\alpha+\theta)(\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_q)} d\alpha, \quad (12)$$

gde je $\mathbf{g}(\alpha + \theta) = -\frac{2\pi}{\lambda_c} [\cos(\alpha + \theta) \quad \sin(\alpha + \theta)]^T$ vektor ravnog talasa čiji je AoA (*Angle of Arrival*) za predajni antenski niz α , dok je λ_c talasna dužina radio signala učestanosti f_c , a $\mathbf{u}_p, \mathbf{u}_q \in \mathbb{R}^2$ su vektori pozicije antena p, q u 2D koordinatnom sistemu za planarni antenski niz koji se koristi u HAP.



Sl. 3 - Ilustracija *one-ring MIMO channel scattering* modela, [9]

$\mathbf{R}_{TX}$ predstavlja normalnu matricu definisanu izrazom, [11],

$$\mathbf{R}_{TX} = \mathbf{U}_{TX} \mathbf{\Sigma}_{TX} \mathbf{U}_{TX}^H, \quad (13)$$

gde $\mathbf{U}_{TX} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ predstavlja kvadratnu matricu čije su kolone sopstveni vektori matrice $\mathbf{R}_{TX}$, a $\mathbf{\Sigma}_{TX} \in \mathbb{R}^{M \times M}$ dijagonalnu matricu čiji su elementi sopstvene vrednosti matrice $\mathbf{R}_{TX}$.

Prijem radio signala sa *indoor* IoTSN, zbog uticaja prepreka propagacije duž putanje prostiranja (*shadow fading*) karakteriše fluktuacija snage signala na prijemu. Kanali bliskih IoTSN su značajno korelisani usled dejstva istih prepreka propagacije u zajedničkom okruženju, a prostorna korelacija kanala za svaka dva IoTSN $1 \leq i, j \leq K$ po Gudmudsonovom modelu, [13], je

$$[\mathbf{R}_{RX}]_{i,j} = \frac{\sigma_s^2}{d_{cor}} e^{-\frac{|d_{i,j}|}{d_{cor}}} \quad (14)$$

gde je $|d_{i,j}|$ rastojanje i i j IoTSN, d_{cor} je rastojanje na kome vrednost korelacije pada ispod vrednosti 0.5, a σ_s je standardna devijacija usled pojave *shadow fading*-a. Matrica $\mathbf{R}_{RX} \in \mathbb{C}^{K \times K}$ je normalna matrica, koja se slično sa $\mathbf{R}_{TX}$, može prikazati kao,

$$\mathbf{R}_{RX} = \mathbf{U}_{RX} \mathbf{\Sigma}_{RX} \mathbf{U}_{RX}^H, \quad (15)$$

gde 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 $\mathbf{R}_{RX}$, respektivno. Usvojen je Kronekerov korelacioni model, [14], tj. potpuno razdvajanje korelacije na predaji i prijemu, pa je ukupna matrica kanala $\mathbf{H}_{DL}$ za TDD DL smer određena kao,

$$\mathbf{H}_{DL} = \mathbf{R}_{RX}^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{iid} \mathbf{R}_{TX}^{\frac{1}{2}} = \mathbf{U}_{RX} \mathbf{\Sigma}_{RX}^{\frac{1}{2}} \mathbf{H}_{iid} \mathbf{\Sigma}_{TX}^{\frac{1}{2}} \mathbf{U}_{TX}, \quad (16)$$

gde je $\mathbf{H}_{iid}$ nekorelisana matrica kanala čiji elementi imaju Rejliljevu raspodelu, tj. predstavljaju međusobno nezavisne slučajne promenljive sa identičnom kompleksnom Gausovom raspodelom jedinične varijanse i nulte srednje vrednosti.

D. Metode za grupisanje korisnika u nepreklapajuće podgrupe

Za grupisanje korisnika u UL smeru mMIMO sistema nije pogodno koristiti postojeće metode grupisanja korisnika za DL smer. U metodama grupisanja za DL smer prenosa u mMIMO sistemima, [5], [8], [17], jedan od zahteva je da se grupisanje korisnika u podgrupe u cilju maksimizacije ukupnog kapaciteta sistema za sve korisnike, izvodi uz uslov ograničene snage na predaji centralnog uređaja i njenu raspodelu na sve IoTSN po podgrupama. Za UL smer mMIMO sistema imamo nezavisno emitovanje signala različitih IoTSN, i važi prethodno navedeni uslov optimizacije. U posmatranom mMIMO sistemu, srednja snaga na predaji za IoTSN određena je energijom prikupljenom tokom intervala trajanja τ_0 za prenos energije u TDD DL smeru. Procena ukupnog kapaciteta sistema za TDD UL smer obavlja se za unapred poznate tačne vrednosti predajne snage svih IoTSN, tj. smatra se da su one konstantne za TDD ciklus.

Usvojenu ZF tehniku u HAP za prijem signala IoTSN iz iste podgrupe karakteriše pogoršanje performansi (tj. smanjivanje kapaciteta) pri porastu međusobne korelacije kanala različitih korisnika (IoTSN) u podgrupi. Stoga pogodan metod grupisanja IoTSN na podgrupe treba da obezbedi da se u istoj podgrupi nalaze IoTSN sa minimalno korelisanim kanalima. Posmatrana su dva vrlo jednostavna metoda grupisanja korisnika, [8], [17],

- metod slučajnog grupisanja korisnika (tj. *Random Selection* metod), gde se u svaku od G podgrupa na slučajan način bira isti broj IoTSN uređaja $K_g = \text{mod}(K/G)$, a eventualno preostali uređaji se redom dodaju (po jedan) u podgrupe;

- metod grupisanja korisnika na osnovu vrednosti međusobne korelacije vektora kanala IoTSN $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}, k = 1, 2, \dots, K$, iz matrice $\mathbf{H}_{DL}$. Određuju se vrednosti međusobne korelacije za sve parove $(\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j), i, j \in \{1, 2, \dots, K\}$, i srednja vrednost međusobne korelacije svakog vektora sa ostalima. Bira se vektor kanala sa najmanjom srednjom korelacijom sa ostalim vektorima, kao i $G - 1$ vektora kanala sa najvećom vrednošću korelacije sa ovim vektorom kanala, uz uslov male srednje korelacije (npr. 0.5). Ovih G vektora kanala se na slučajan način ubacuju u G podgrupa (po jedan), pa se redom, uz slučajan izbor naredne podgrupe, u svaku od njih bira po jedan od preostalih vektora kanala, i to onaj sa najmanjom srednjom korelacijom sa članovima podgrupe. Proces se ponavlja dok se ne grupišu svi IoTSN u sistemu.

III. PREGLED REZULTATA ANALIZE

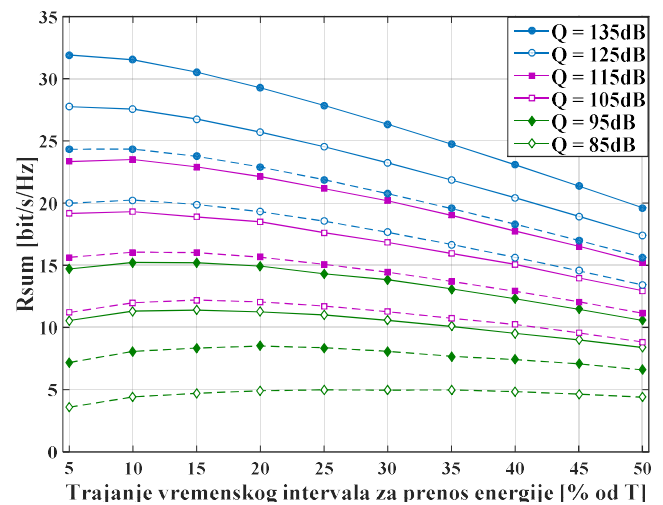
Posmatrana je jedna ćelija mMIMO sistema u kome se HAP sa $M = 8 \times 8 = 64$ omnidirekcionih antena nalazi u centru, pri čemu se prenos od/ka $K = 160$ IoTSN odvija u RF opsegu 3.5 GHz (globalni IMT-2020 opseg za 5G NR, [1]), uz razmak antena od 1/2 talasne dužine signala nosioca. Korišćen je model sistema opisan u poglavlju II, gde su parametri modela preuzeti iz [8], [10]-[11]. Pozicije svih IoTSN se generišu slučajno sa uniformnom prostornom raspodelom u prstenu oko HAP između rastojanja 100 m i 300 m. Za svaki skup sa K IoTSN, generisano je $N_{avg} = 100$ nezavisnih realizacija matrice kanala $\mathbf{H}_{DL}$ u cilju estimacije slučajnih promenljivih iz izraza (10), i određene su podgrupe za oba metoda grupisanja. Potom je za oba metoda grupisanja procenjena vrednost ukupno ostvarenog kapaciteta sistema (SR), za slučaj idealne procene CSI i greške estimacije CSI, i to kada postoje uzajamno korelisani kanali između IoTSN i HAP (model iz podnaslova II.D) i nekorelisani kanali (tj. za $\mathbf{R}_{TX} = 0$ i $\mathbf{R}_{RX} = 0$). Procena SR za sve slučajeve je vršena za skup vrednosti τ_0 od 5% vrednosti T do 50% vrednosti T sa korakom 5%, i za različitu vrednost odnosa srednje snage na predaji u HAP za TDD DL smer (P_S) i srednje snage AWGN na ulazu antena u HAP za prijem u TDD UL smeru ($2\sigma^2$), i to za skup vrednosti od 85 dB do 135 dB sa korakom 10 dB, radi analize zavisnosti SR od dužine intervala za dopunu energije IoTSN i/ili odnosa $Q = P_S/2\sigma^2$ [dB]. Izvršeno je $N_{sim} = 100$ Monte-Carlo simulacija sa nezavisnim slučajnim generisanjem pozicija IoTSN, uz ponavljanje opisane analize i usrednjavanjem vrednosti SR za različite scenarije rada. Pregled usvojenih parametara modela dat je u **Tabeli I**.

Na **Sl. 4** su date vrednosti R_{sum} [bit/s/Hz] u zavisnosti od τ_0 (kao procenta trajanja TDD ciklusa) i $Q = P_S/2\sigma^2$ [dB], za slučajeve kada postoji i ne postoji međusobna korelacija kanala između IoTSN i HAP, pri čemu je primenjena metoda grupisanja korisnika na osnovu vrednosti međusobne korelacije vektora kanala za slučaj idealnog poznavanja CSI. U vrednost R_{sum} nije uračunat dobitak usled primene M -arne modulacije. Na osnovu **Sl. 4** se jasno zapaža pojava značajnog gubitka kapaciteta za slučaj kada postoji međusobna korelacija kanala između IoTSN i HAP u odnosu na slučaj kada su ovi kanali nekorelisani, što je i očekivano usled pojave gubitaka pri primeni ZF tehnike pri povećanju korelacije između kanala. Dodatno, usled smanjivanja vrednosti $Q = P_S/2\sigma^2$ [dB] javlja se značajno pogoršanje performansi za sve prikazane slučajeve, gde se za različite vrednosti Q maksimalna vrednost R_{sum} javlja za različite vrednosti trajanja τ_0 . Za velike vrednosti Q (npr. 135 dB i 125 dB) maksimalna vrednost R_{sum} dobija se za

minimalnu vrednost τ_0 , pošto je i tada prikupljena energija u IoTSN dovoljna za potreban nivo SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) na prijemu u HAP, a porast kapaciteta se dobija povećanjem trajanja TDMA slotova (tj. za manje τ_0). Za manje vrednosti Q , potrebna vrednost τ_0 se povećava, kako bi IoTSN prikupili veću količinu energije od HAP i ostvarili dovoljnu vrednost SNR na prijemu. Kako se u slučaju međusobno korelisanih kanala između IoTSN i HAP ostvaruju lošije performanse, vrednost τ_0 za koju se postiže maksimalni kapacitet za datu vrednost Q se brže povećava pri smanjivanju vrednosti Q u odnosu na slučaj sa nekorelisanim kanalima.

TABELA I. USVOJENI PARAMETRI MODELA mMIMO SISTEMA

PARAMETAR	VREDNOST	PARAMETAR	VREDNOST
θ	$[-180^\circ, 180^\circ]$	f_c	3.5 GHz
Δ	$[5^\circ, 15^\circ]$	M	64
d_{cor}	20 m	K	160
r	30 m	T	25 ms
D	0.5	σ_s	0.4

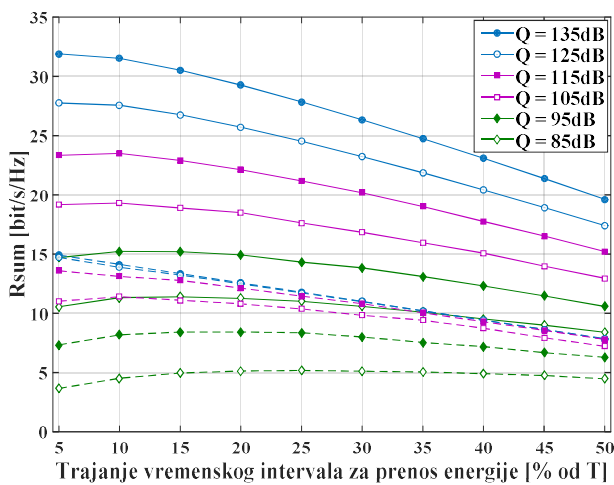


Sl. 4 - R_{sum} u funkciji τ_0 i Q kada postoji međusobna korelacija kanala IoTSN (isprekidana linija na slici) i kada ne postoji međusobna korelacija kanala IoTSN (puna linija na slici), za slučaj idealnog poznavanja CSI

Pri primeni metoda slučajnog grupisanja korisnika u slučaju kada postoje nekorelisani *fading* kanali između IoTSN i HAP, dobijeni su veoma slični rezultati kao oni na **Sl. 4**, pošto je međusobna korelacija kanala mala za uspešnu primenu metoda grupisanja korisnika na osnovu vrednosti međusobne korelacije vektora kanala (tj. ne može se ostvariti bitan porast kapaciteta putem grupisanja IoTSN). U slučaju kada postoji međusobna korelacija kanala između IoTSN i HAP, pri primeni metoda slučajnog grupisanja korisnika ostvaruju se 4% do 5% lošije vrednosti kapaciteta u odnosu na primenu metoda grupisanja korisnika na osnovu vrednosti međusobne korelacije vektora kanala. Pri tome, rezultati dobijeni primenom slučajnog metoda grupisanja korisnika ovde nisu dati zbog preglednosti.

Na **Sl. 5** su date vrednosti R_{sum} [b/s/Hz] u zavisnosti od τ_0 (kao procenta trajanja TDD ciklusa) i $Q = P_S/2\sigma^2$ [dB], za idealnu procenu CSI i kada imamo grešku procene CSI, i to u slučaju kada ne postoji međusobna korelacija kanala između IoTSN i HAP, uz primenu metoda slučajnog grupisanja korisnika. Na osnovu prikazanih vrednosti, jasno se vidi da se usled pojave grešaka procene CSI (matrica kanala za podgrupe) javlja izuzetno veliko pogoršanje performansi sistema (ukupnog

kapaciteta sistema) za istu vrednost Q u odnosu slučaj idealne procene CSI. Usled toga za veće vrednosti Q , kada je uticaj AWGN na prijemu zanemarljiv u odnosu na međukorisničku interferenciju koja nastaje usled greške procene CSI i netačnog određivanja matrica $\mathbf{W}_g$ pri primeni ZF tehnike, javlja se brzo opadanje kapaciteta sa porastom τ_0 , pošto se tada povećava snaga na predaji IoTSN, a time i međukorisnička interferencija. Za manje vrednosti Q , uticaj AWGN postaje dominantan, pa sa opadanjem vrednosti Q imamo sve brži porast τ_0 za koji se ostvaruje maksimalni kapacitet, tj. sada se porast kapaciteta dominantno ostvaruje na račun povećanja SNR na prijemu u HAP (tj. povećanjem količine prikupljene energije od IoTSN) kada se i pored smanjivanja trajanja TDMA slotova (kojim se skraćuje period prenosa, a time i kapacitet) obezbeđuje porast ukupnog kapaciteta sistema. Nisu prikazani rezultati pri primeni metoda grupisanja korisnika na osnovu vrednosti međusobne korelacije vektora kanala, pošto za nekorelisane kanale ovaj metod ne omogućava dodatno poboljšanje.



Sl. 5 - R_{sum} u funkciji τ_0 i Q kada ne postoji međusobna korelacija kanala IoTSN, za slučaj idealnog poznavanja CSI (puna linija na slici) i za slučaj greške procene CSI (isprekidana linija na slici)

IV. ZAKLJUČAK

Izvršena je početna analiza performansi za predloženi oblik IoT senzorskog sistema za prikupljanje podataka putem velikog broja IoTSN, koji je definisan kao kombinacija WPC koncepta sa HAP koji radi na bazi TDD i mMIMO tehnologije za prenos podataka u UL smeru primenom ZF tehnike i metoda za grupisanje korisnika. Razvijen je simulacioni model sistema, čijom primenom su dobijeni osnovni rezultati analize i utvrđena je zavisnost ukupnog kapaciteta sistema za različite scenarije rada u pogledu korelacije kanala, kvaliteta estimacije CSI, primene ZF tehnike i metoda za grupisanje korisnika, kao i parametara HAP (trajanja intervala za prenos energije, odnos srednje snage za prenos energije i nivo šuma na prijemu).

Rezultati analize ukazuju na to da postoji mogućnost izbora parametara HAP kojima se maksimizuje kapacitet sistema za različite scenarije primene. Izvršena analiza i izvedeni zaključci omogućavaju sagledavanje osnovnih sposobnosti posmatranog sistema, i stoga predstavljaju dobar osnov za dalji razvoj ovog sistema i istraživanje u predmetnoj oblasti.

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] C. Yunfei, *Energy Harvesting Communications*, Wiley - IEEE Press New York, USA, 2019, pp. 135-138.
- [3] S. Zeadally, F. K. Shaikh, A. Talpur, and Q. Z. Sheng, "Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 128, Aug. 2020, Art. no. 109901.
- [4] S. M. A. Huda, M. Y. Arafat, and S. Moh, "Wireless Power Transfer in Wirelessly Powered Sensor Networks: A Review of Recent Progress," *Sensors*, vol. 22, no. 8, 2022. [Online]
- [5] E. Castañeda, A. Silva, A. Gameiro, and M. Kountouris, "An Overview on Resource Allocation Techniques for Multi-User MIMO Systems," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 239-284, 2017.
- [6] T. Kebede, Y. Wondie, J. Steinbrunn, H. B. Kassa, and K. T. Kornegay, "Precoding and Beamforming Techniques in mmWave-Massive MIMO: Performance Assessment," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 16365-16387, 2022.
- [7] 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.
- [8] Đ. 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.
- [9] W. C. Jakes, *Microwave Mobile Communications*, Wiley - IEEE Press New York, USA, 1974, pp. 60-65.
- [10] 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.
- [11] M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems," *Electronics Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 2145-2146, Nov. 1991.
- [12] 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.
- [13] 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, pp 1-22.
- [14] Y. Li, Y.-H. Nam and B. L. Ng, "Zero-forcing receiver in uplink massive MIMO," *IEEE Globecom Workshops*, Atlanta, GA, USA, 9-13 December 2013, pp. 140-144.
- [15] P. Chandhar, D. Danev and E. Larsson, "On the Zero-Forcing Receiver Performance for Massive MIMO Systems With Imperfect Channel State Information," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 5, September 2008, pp. 2856-2866.
- [16] M. Huang, S. Zhou, and J. Wang, "Analysis of Tomlinson-Harashima Precoding in Multiuser MIMO Systems With Imperfect Channel State Information," *IEEE Transaction on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 5, September 2008, pp. 2856-2866.
- [17] R. Tian, Y. Liang, X. Tan, and T. Li, "Overlapping user grouping in IoT oriented massive MIMO systems," *IEEE Access*, vol. 5, 2017, pp. 14177–14186.

ABSTRACT

An Internet of Things (IoT) sensor system is considered that supports vast number of simple IoT devices powered wirelessly from a Hybrid Access Point (HAP). HAP performs power transfer to IoT devices (in downlink) and data reception from IoT devices (in uplink) during Time-Division Duplex cycles. The massive MIMO technology is applied for uplink communication. A simulation model was developed and an analysis was performed for uplink transmission under different operating conditions in terms of channel correlation, channel state estimation quality, the ratio of HAP transmit power to the duration of the energy transfer interval. The results and conclusions are presented in terms of the total system capacity for different operating scenarios, along with a presentation of possible HAP parameters optimization.

Performance analysis for the uplink of IoT mMIMO system with wireless power transfer using TDD-based HAP
L. Mitrović, Đ. Lukić, V. Blagojević, G. Marković