

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Nadica D. Kozić

**KOOPERATIVNI KOGNITIVNI
TELEKOMUNIKACIONI SISTEMI SA BEŽIČNIM
PRENOSOM ENERGIJE
I STATISTIČKOM INFORMACIJOM
O STANJU U KANALU**

doktorska disertacija

Beograd, 2024

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Nadica D. Kozić

**COOPERATIVE COGNITIVE
TELECOMMUNICATION SYSTEMS WITH
WIRELESS ENERGY TRANSFER AND
STATISTICAL CHANNEL STATE
INFORMATION KNOWLEDGE**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024

Mentor:

dr Vesna Blagojević, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr Predrag Ivaniš, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

dr Goran Đorđević, redovni profesor,
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet

dr Dragan Olćan, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane: _____

Kooperativni kognitivni telekomunikacioni sistemi sa bežičnim prenosom energije i statističkom informacijom o stanju u kanalu

Sažetak:

Uloga telekomunikacionih sistema nove generacije je da obezbede telekomunikacione veze velikih brzina prenosa koje će omogućiti sakupljanje, prenos, kontrolu i procesiranje podataka, čime se stvara adekvatno okruženje za dalji razvoj sistema Interneta stvari (IoT, *Internet of Things*). Veliki broj prostorno raspoređenih povezanih uređaja i senzora malih dimenzija i male snage sa skromnim računskim kapacitetima zahteva prilagođene koncepte za pristup spektru, kao i za efikasno napajanje uređaja. Koncept kognitivnog pristupa spektru uveden je sa idejom povećanja spektralne efikasnosti, pri čemu se jedan od najvažnijih pristupa zasniva na kontrolisanju nivoa interferencije na mestu primarnih prijemnika. Zaštita primarnih korisnika se realizuje adaptacijom predajne snage sekundarnog korisnika u realnom vremenu, u skladu sa dostupnom informacijom o stanju u kanalu ka prijemniku primarnog korisnika spektra. Kako je ova informacija praktično uvek nesavršena u realnom dinamičnom okruženju, posebnu pažnju privlače sistemi koji se zasnivaju na statističkoj informaciji o stanju u kanalu. Ovaj pristup olakšava primenu kod uređaja male snage i skromnih računskih mogućnosti, jer su pojednostavljena kompleksna izračunavanja potrebna za adaptaciju snage. Povećanje broja korisnika u novim generacijama sistema, osim unapređenja spektralne efikasnosti, zahteva i povećanu energetska efikasnost i nova rešenja za napajanje velikog broja uređaja. Radi efikasnog napajanja velikog broja uređaja male snage uveden je koncept prikupljanja i korišćenja energije iz okruženja. Iako postoje različite vrste izvora energije koji se mogu koristiti, prikupljanje energije iz postojećih radio-frekvencijskih signala omogućuje neophodnu pouzdanost u snabdevanju energijom, kao i primenu tehnika za istovremeni prenos informacija i energije.

U ovoj disertaciji analizirane su performanse sistema koji koriste kognitivne principe pristupa spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije, bazirane na statističkoj informaciji o stanju u kanalu, pri čemu se napajanje sistema vrši primenom bežičnog prenosa energije. U tezi je razmatrana zavisnost sakupljene energije od uslova propagacije i parametara primenjenog protokola za istovremeni prenos informacija i energije. Osim toga, u sistemima sa velikim brojem uređaja koji emituju malom snagom često ne postoji direktna optička vidljivost u svim slučajevima, pa su razmatrani i scenariji kada se prenos informacija odvija posredstvom relejnog čvora u mreži.

Izvršena je analiza sistema za slučaj kada svi korisnici imaju fiksne pozicije, usled čega su rastojanja korisnika u mreži konstantna. Kako korisnike novih generacija bežičnih telekomunikacionih sistema karakteriše visok nivo mobilnosti, izvršena je i detaljna analiza uticaja kretanja korisnika na performanse sistema.

U savremenim bežičnim telekomunikacionim sistemima veliki izazov predstavlja i zaštita informacija koje se prenose. Kako su mogućnosti primene konvencionalnih tehnika zaštite informacija ograničene zbog visokog nivoa računске složenosti, u disertaciji su analizirane i mogućnosti zaštite prenosa podataka na fizičkom sloju.

Ključne reči: Bežični prenos energije, kapacitet sistema, kognitivni radio, kooperativni sistemi, statistička informacija o stanju u kanalu, Nakagami- m fading, verovatnoća otkaza

Naučna oblast: Elektrotehnika i računarstvo

Uža naučna oblast: Telekomunikacije

Cooperative cognitive telecommunication systems with wireless energy transfer and statistical channel state information knowledge

Abstract:

The role of new generation telecommunication systems is to provide high-speed telecommunication connections that will enable the collection, transmission, control and processing of data, thereby creating an adequate environment for the further development of IoT systems. A large number of spatially distributed connected small-sized devices and sensors with modest powering and computational capabilities require appropriate concepts for efficient spectrum access, as well as for efficient powering the devices. To increase spectral efficiency, the concept of cognitive radio was proposed, where underlay represents one of the most standing-out approaches, based on the controlling of the generated interference in primary user network. The protection of the primary user is performed based on real-time secondary user power adaptation, based on available channel state information. As this information is practically always imperfect in a realistic dynamic environment, systems based on statistical channel state information are of special interest. This approach enables easier implementation in systems with low-power devices and modest computational capabilities. Furthermore, the increase in number of users in new system generations requires improved energy efficiency and novel solutions for the powering of the large number of devices. In order to efficiently power the devices, the concept of energy harvesting from the sources available in the environment was introduced. Although there are several available energy types, energy harvesting from existing radio-frequency signals enables the necessary reliability in energy powering, as well as the simultaneous wireless information and power transfer.

In this dissertation, the cognitive radio system that uses underlay spectrum access approach and statistical channel state information knowledge is analyzed. The wireless energy transmission technique is used for the system powering. The thesis discusses the dependence of the harvested energy on the propagation conditions and the applied protocol parameters for the simultaneous wireless information and power transfer. In addition, due to the large number of low-power devices in the system, the scenario when there is no direct line of sight between nodes is considered and information transfer takes place through a relay node in the network.

An analysis of the system was performed for the case when all users have fixed positions and user distances in the network are consequently constant. As users of new generations of systems are characterized by a high level of mobility, the analysis is extended to the case when user is mobile and the impact of user mobility on wireless telecommunications system performance is analyzed.

In modern wireless communication systems, the security of transmitted information represents a challenge. As the possibilities of applying conventional information security techniques are limited due to the high level of computational complexity, the dissertation also analyzed the possibilities of physical layer security.

Keywords: Wireless energy transfer, system capacity, cognitive radio, cooperative systems, statistical channel state information knowledge, Nakagami- m fading, outage probability

Scientific field: Electrical and computer engineering

Scientific subfield: Telecommunications

Sadržaj

1. Uvod	1
1.1. Prikupljanje energije.....	4
1.2. Kognitivni radio.....	7
1.2.1. Oportunistički pristup spektru	8
1.2.2. Pristup spektru sa kooperacijom.....	9
1.2.3. Pristup spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije	10
1.3. Zaštita informacija.....	11
1.4. Pregled najznačajnijih istraživanja iz oblasti teme doktorske disertacije	12
1.5. Doprinis disertacije.....	14
2. Kooperativni i kognitivni sistemi	16
2.1. Kooperativni sistemi.....	16
2.1.1. Prenos signala sa jednim relejnim čvorom	17
2.1.2. Prenos signala sa više relejnih čvorova	18
2.2. Kooperativni kognitivni sistemi	19
2.2.1. Kooperativni kognitivni sistem sa savršenom CSI.....	20
2.2.2. Kooperativni kognitivni sistem sa statističkom CSI.....	21
2.3. Bežični prenos energije	22
2.3.1. Kooperativni kognitivni sistem sa statističkom CSI i bežičnim prenosom energije	22
2.3.2. Kooperativni relejni kognitivni sistem sa statističkom CSI i bežičnim prenosom energije.....	24
2.3.2.1. Protokol prenosa informacija i energije baziran na raspodeli u vremenu	25
2.3.2.2. Protokol prenosa informacija i energije baziran na raspodeli snage	28
2.4. Model kanala	29
2.4.1. Nakagami- m model kanala sa fiksnom lokacijom korisnika.....	30
2.4.2. Nakagami- m model kanala sa mobilnim korisnikom	33

3. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa bežičnim prenosom energije i statističkom informacijom o stanju u kanalu sa fiksnim položajem prijemnika.....	36
3.1. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije	36
3.1.1. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije	37
3.1.2. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije kada je zanemarljivo ograničenje kognitivne mreže.....	44
3.1.3. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema kada je uticaj interferencije primarnih korisnika dominantan.....	51
3.2. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa relejem	54
3.2.1. Performanse kognitivnog kooperativnog sistema sa relejem	56
3.2.2. Performanse kognitivnog kooperativnog sistema sa relejem kada je zanemarljivo ograničenje kognitivne mreže	58
3.2.3. Performanse kognitivnog kooperativnog sistema sa relejem kada je uticaj interferencije primarnih korisnika dominantan	59
Dodatak 3-A	74
4. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa bežičnim prenosom energije i statističkom informacijom o stanju u kanalu sa mobilnim prijemnikom	78
4.1. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom.....	78
4.1.1. Performanse kooperativnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom	79
4.1.2. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom	84
4.2. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa relejem i mobilnim prijemnikom	103
5. Uticaj mobilnosti sekundarnog prijemnika i prisluškivača u kognitivnom kooperativnom sistemu na verovatnoću otkaza poverljivosti.....	110
5.1. Verovatnoća otkaza poverljivosti u kooperativnom sistemu sa namenskim izvorom energije	110
5.1.1. Verovatnoća otkaza poverljivosti u slučaju kada sekundarni prijemnik i prisluškivač imaju fiksne pozicije	111
5.1.2. Verovatnoća otkaza poverljivosti u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan i prisluškivač ima fiksnu poziciju.....	118
5.1.3. Verovatnoća otkaza poverljivosti u slučaju kada sekundarni prijemnik ima fiksnu poziciju i prisluškivač je mobilan.....	124
5.1.4. Verovatnoća otkaza poverljivosti u slučaju kada su sekundarni prijemnik i prisluškivač mobilni.....	129

5.2. Verovatnoća otkaza poverljivosti u kooperativnom kognitivnom sistemu sa namenskim izvorom energije	131
5.3. Verovatnoća otkaza poverljivosti u kognitivnom relejnom sistemu	133
6. Zaključak	142
Literatura	145

Spisak slika

Slika 1.1.	Prikaz količine saobraćaja u telekomunikacionim sistemima na globalnom nivou	2
Slika 1.2.	Broj IoT uređaja u prethodnom periodu i predikcija broja IoT uređaja u budućnosti na globalnom nivou	3
Slika 1.3.	Ilustracija primene IoT sistema	4
Slika 1.4.	Postojeći izvori energije u okruženju	5
Slika 1.5.	SWIPT koncept.....	6
Slika 1.6.	Primena SWIPT koncepta u kooperativnom sistemu	7
Slika 1.7.	Oportunistički pristup spektru	9
Slika 1.8.	Pristup spektru sa kooperacijom	10
Slika 1.9.	Pristup spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije	10
Slika 2.1.	AF protokol.....	17
Slika 2.2.	DF protokol.....	18
Slika 2.3.	Kaskadni prenos putem releja u kooperativnom sistemu	19
Slika 2.4.	Paralelni prenos putem releja u kooperativnom sistemu	19
Slika 2.5.	Model kooperativnog kognitivnog sistema	20
Slika 2.6.	Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije	23
Slika 2.7.	Ilustracija protokola prenosa sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu	23
Slika 2.8.	Model kooperativnog relejnog kognitivnog sistema	25
Slika 2.9.	Ilustracija protokola prenosa na sekundarnom linku sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu.....	26
Slika 2.10.	Ilustracija protokola prenosa na sekundarnom linku baziranog na raspodeli snage	28
Slika 2.11.	Funkcija gustine verovatnoće trenutnog pojačanja snage u kanalu do prijemnika	31
Slika 2.12.	Funkcija raspodele trenutnog pojačanja snage u kanalu do prijemnika	32
Slika 2.13.	Model sistema sa mobilnim prijemnikom	33

Slika 2.14.	Funkcija gustine verovatnoće trenutnog pojačanja snage u kanalu do mobilnog prijemnika	34
Slika 2.15.	Funkcija raspodele trenutnog pojačanja snage u kanalu do mobilnog prijemnika	35
Slika 3.1.	Verovatnoća otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p za različite vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$	42
Slika 3.2.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji praga interferencije Q_p , za različite vrednosti snage namenskog izvora energije P_{PB}	43
Slika 3.3.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α	44
Slika 3.4.	Verovatnoća otkaza u zavisnosti od srednjeg pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika Ω_2	47
Slika 3.5.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji rastojanja D_{STxSRx} , za različite vrednosti snage namenskog izvora energije P_{PB}	48
Slika 3.6.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji koeficijenta α , za različite vrednosti Nakagami- m fedinga m_2	49
Slika 3.7.	Poređenje verovatnoće otkaza za sistem sa i bez ograničenja kognitivne mreže i različite vrednosti srednjeg pojačanja snage Ω_2	50
Slika 3.8.	Poređenje ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu za sistem sa i bez ograničenja kognitivne mreže i različite vrednosti Nakagami- m parametra fedinga m_2	51
Slika 3.9.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu za različite vrednosti srednjih pojačanja snage Ω_{iTX} i Ω_{iRX}	53
Slika 3.10.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu, za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage Λ_{STx}	54
Slika 3.11.	Model kooperativnog relejnog kognitivnog sistema sa N primarnih predajnika i M primarnih prijemnika	55
Slika 3.12.	Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže	58
Slika 3.13.	Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od snage prenosa sekundarnog predajnika.....	59
Slika 3.14.	Verovatnoća otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p za TS protokol	63
Slika 3.15.	Ostvarivi protok za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage kanala u kognitivnom relejnom sistemu	64
Slika 3.16.	Ostvarivi protok u zavisnosti od koeficijenata za prikupljanje energije α i ρ za TS/PS protokole prikupljanja energije	65
Slika 3.17.	Uticaj interferencije na sekundarnom predajniku i sekundarnom releju na vrednosti ostvarivog protoka za različite vrednosti parametara $\Omega_{STxSR} = \Omega_{SRSRx}$	66

Slika 3.18.	Ostvarivi protok u funkciji praga interferencije Q_p za TS/PS protokole prikupljanja energije	67
Slika 3.19.	Rezultati simulacije za ostvarivi protok u odnosu na prag interferencije Q_p i minimalno ograničenje praga ulazne snage na sekundarnom releju, P_o	68
Slika 3.20.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije	69
Slika 3.21.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite pozicije sekundarne mreže	70
Slika 3.22.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja	71
Slika 3.23.	Verovatnoća otkaza u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja	72
Slika 3.24.	Ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja	73
Slika 4.1.	Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom	79
Slika 4.2.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji koeficijenta α , za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika	83
Slika 4.3.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od pojačanja snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika Ω_1	84
Slika 4.4.	Verovatnoća otkaza u zavisnosti od rastojanja od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika	91
Slika 4.5.	Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika	92
Slika 4.6.	Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α	93
Slika 4.7.	Verovatnoća otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti snage namenskog izvora energije P_{PB}	94
Slika 4.8.	Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u funkciji praga interferencije Q_p , za različite vrednosti rastojanja D_{STxSRx}	95
Slika 4.9.	Ostvarivi protok u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage Λ_{STx}	96
Slika 4.10.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti rastojanja D_{STxSRx}	97
Slika 4.11.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti snage namenskog izvora energije P_{PB}	98
Slika 4.12.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže	99

Slika 4.13.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu za različite vrednosti rastojanja D_{PBSTx} i D_{STxSRx}	100
Slika 4.14.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od koeficijenta α za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika	101
Slika 4.15.	Poređenje verovatnoće otkaza za sistem sa i bez ograničenja kognitivne mreže i različita rastojanja D_{PBSTx} i D_{STxSRx}	102
Slika 4.16.	Poređenje verovatnoće otkaza za sistem sa i bez ograničenja kognitivne mreže i različite vrednosti snage P_{PB}	103
Slika 4.17.	Model kooperativnog relejnog kognitivnog sistema sa N primarnih predajnika i M primarnih prijemnika u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan.....	104
Slika 4.18.	Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite protokole za prenos energije.....	105
Slika 4.19.	Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od koeficijenta za prikupljanje energije, za različite protokole za prikupljanje energije	106
Slika 4.20.	Verovatnoća otkaza u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan	107
Slika 4.21.	Ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan	108
Slika 4.22.	Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan	109
Slika 5.1.	Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i prisluškivačem	111
Slika 5.2.	Verovatnoća otkaza poverljivosti u zavisnosti od rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx}	116
Slika 5.3.	Verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji rastojanja D_{STxSRx} za različite vrednosti parametara Nakagami- m fedinga.....	117
Slika 5.4.	Kapacitet poverljivosti u zavisnosti od srednjeg pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika	118
Slika 5.5.	Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije, mobilnim sekundarnim prijemnikom i prisluškivačem sa fiksnom pozicijom.....	119
Slika 5.6.	Verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji maksimalnog rastojanja D_{STxSRx} , za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika	122
Slika 5.7.	Verovatnoća otkaza poverljivosti za različita pojačanja snage u kanalima od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika i do priskuškivača	123
Slika 5.8.	Kapacitet poverljivosti za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika i različita maksimalna rastojanja D_{STxSRx}	124
Slika 5.9.	Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prisluškivačem	125
Slika 5.10.	Verovatnoća otkaza poverljivosti za različite obrasce kretanja mobilnog prisluškivača.....	128
Slika 5.11.	Kapacitet poverljivosti za različite parametre Nakagami- m fedinga m_2 i m_E	129

Slika 5.12.	Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije, mobilnim sekundarnim prijemnikom i mobilnim prislušivačem.....	130
Slika 5.13.	Verovatnoća otkaza poverljivosti za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika i prislušivača	131
Slika 5.14.	Verovatnoća otkaza poverljivosti u zavisnosti od rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx}	132
Slika 5.15.	Poređenje verovatnoće otkaza poverljivosti za sistem sa i bez ograničenja kognitivne mreže i različite obrasce kretanja mobilnog prislušivača	133
Slika 5.16.	Model kognitivnog relejnog sistema sa prislušivačem	134
Slika 5.17.	Verovatnoća otkaza poverljivosti u zavisnosti od praga interferencije Q_p	136
Slika 5.18.	Verovatnoća otkaza i verovatnoća otkaza poverljivosti u zavisnosti od praga interferencije Q_p	137
Slika 5.19.	Verovatnoća otkaza poverljivosti i kapacitet poverljivosti u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je pozicija prislušivača (5.5, 5).....	139
Slika 5.20.	Verovatnoća otkaza poverljivosti i kapacitet poverljivosti u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je pozicija prislušivača (5.5, 1).....	140
Slika 5.21.	Verovatnoća otkaza poverljivosti i kapacitet poverljivosti u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je pozicija prislušivača (5.5, 0).....	141

Spisak tabela

Tabela 2.1.	Koeficijenti modela različitih topologija kretanja	33
Tabela 3.1.	Parametri simulacije kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije	41
Tabela 3.2.	Parametri simulacije kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije kada je zanemarljivo ograničenje kognitivne mreže	46
Tabela 3.3.	Parametri simulacije kooperativnog kognitivnog sistema sa relejem kada je uticaj interferencije primarnih korisnika dominantan	62
Tabela 4.1.	Parametri simulacije kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom	90
Tabela 5.1.	Parametri simulacije sistema sa namenskim izvorom energije kada sekundarni prijemnik i prislušivač imaju fiksne pozicije, u slučaju zanemarljivog ograničenja kognitivne mreže.....	115
Tabela 5.2.	Parametri simulacije sistema sa namenskim izvorom energije kada je sekundarni prijemnik mobilan i prislušivač ima fiksnu poziciju	121
Tabela 5.3.	Parametri simulacije kognitivnog relejnog sistema.....	138

Spisak skraćenica

5G	Fifth Generation
AF	Amplify and Forward
AWGN	Additive White Gaussian Noise
CDF	Cumulative Distribution Function
CDMA	Code Division Multiple Access
CSI	Channel State Information
DF	Decode and Forward
EH	Energy Harvesting
eMBB	extreme Mobile Broadband
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FCC	Federal Communications Commission
IoT	Internet of Things
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
mMTC	massive Machine-Type Communications
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access
PDF	Probability Density Function
PS	Power Splitting
RD	Random Direction
RWP	Random WayPoint

RF	Radio frequency
SWIPT	Simultaneous Wireless Information and Power Transfer
TDMA	Time Division Multiple Access
TS	Time Switching
uMTC	ultra-reliable Machine-Type Communications

1. Uvod

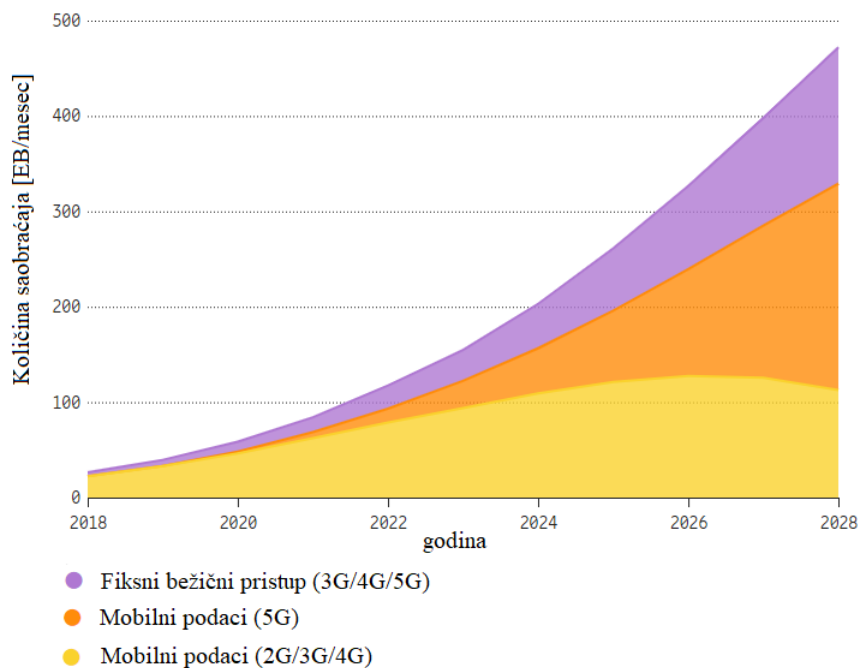
Razvoj tehnologija u oblasti bežičnih telekomunikacija doveo je i do ubrzanog porasta broja bežičnih uređaja i potrebnih servisa u ovoj oblasti. Korisnici sve češće imaju veliki broj uređaja koji su povezani na Internet, što kao rezultat daje znatno veću količinu saobraćaja. Sa porastom broja servisa i uređaja, stvara se i potreba korisnika da pristupa servisima u bilo kom trenutku, sa bilo koje lokacije i uređaja, pri čemu je potrebno obezbediti i odgovarajući kvalitet servisa. Imajući u vidu ograničene resurse koji su na raspolaganju, za zadovoljenje ovako složenih zahteva potrebno je uvođenje novih koncepata [1].

Najčešći zahtevi se javljaju u pogledu većih brzina prenosa podataka, bolje pokrivenosti, višeg nivoa pouzdanosti, uštede energije i malog kašnjenja u prenosu. Najnovije 5G (*Fifth Generation*) tehnologije pružaju visoku brzinu prenosa podataka, poboljšan kvalitet usluge, malo kašnjenje, visoku pokrivenost, visok nivo pouzdanosti, pa se očekuje da mogu da izađu u susret navedenim zahtevima [2]. Sa pojavom 5G tehnologija razvijaju se i njihove primene i mogućnosti u oblasti pametnih domova, pametnih kancelarija, pametnih škola, u poljoprivredi, industriji, medicini.

Neke od tehnologija koje omogućavaju 5G su [2], [3]:

- usmereno emitovanje radio talasa sa bazne stanice ka korisniku (*beamforming*), čijim se korišćenjem povećava efikasnost i čuva energija, a smanjuje interferencija ka ostalim korisnicima koji se nalaze u okruženju,
- korišćenje masivnih višeantenskih sistema (*massive MIMO, Multiple Input Multiple Output*) kod kojih bazna stanica poseduje veći broj antena za prijem signala od korisnika, dok se istovremeno slanje signala ka korisniku vrši usmereno sa većom predajnom snagom,
- emitovanje u frekvencijskom opsegu milimetarskih talasa (*mmWave*) sa ciljem povećanja dostupnih spektralnih resursa,
- povećanje broja ćelija u oblasti koja se pokriva i smanjenje veličine ćelije (*small cell*) radi korišćenja baznih stanica malih predajnih snaga koje mogu biti postavljene na bilo kojoj lokaciji,
- korišćenje neortogonalnog višestrukog pristupa (*NOMA, Non-Orthogonal Multiple Access*) kojim se može povećati spektralna efikasnost u bežičnim telekomunikacionim mrežama,
- koncept kognitivnog radija sa ciljem deljenja resursa spektralnog opsega i povećanja spektralne efikasnosti u bežičnim komunikacionim mrežama,
- istovremena dvosmerna komunikacija u istom frekvencijskom opsegu (*full-duplex*).

Na slici 1.1. je prikazana količina saobraćaja u telekomunikacionim sistemima u poslednjih par godina, kao i predikcija količine saobraćaja na globalnom nivou u narednim godinama [4]. Na osnovu trenda porasta količine saobraćaja pri prenosu podataka u 5G mobilnim mrežama očekuje se da će u narednih pet godina ta količina u svetu premašiti trista eksabajta (300 EB) na mesečnom nivou.

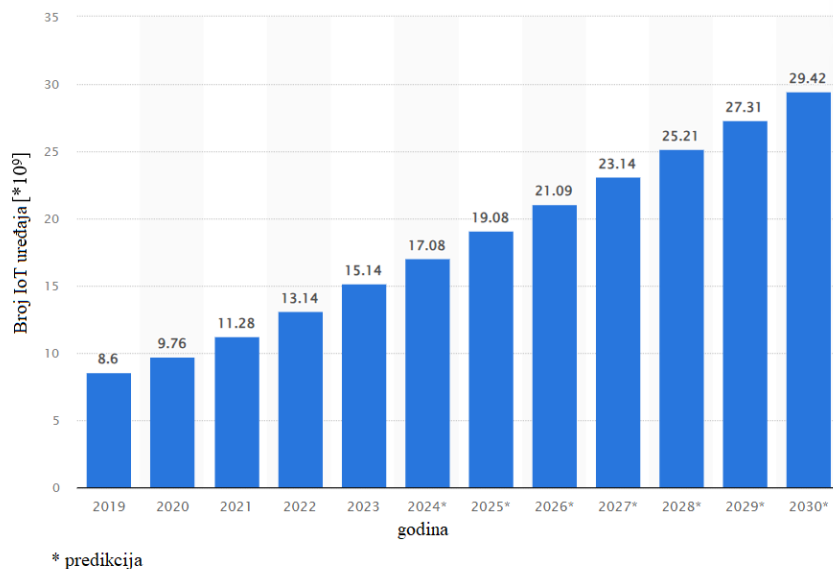


Slika 1.1. – Prikaz količine saobraćaja u telekomunikacionim sistemima na globalnom nivou [4].

Primenom 5G tehnologije, krajnjem korisniku omogućeno je korišćenje različitih servisa koji su grupisani u tri kategorije i opisani su u nastavku [2], [5]:

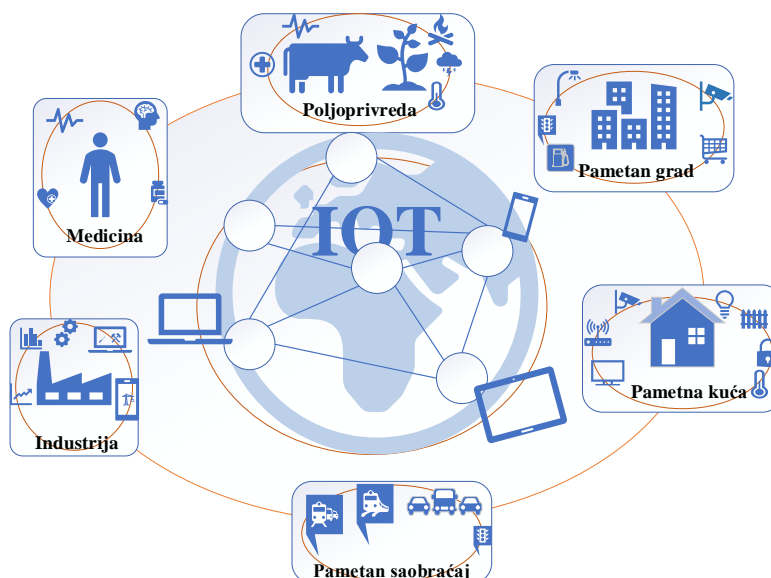
- Unapređeni širokopolasni mobilni servisi (eMBB, *extreme Mobile Broadband*) zadovoljavaju zahteve za visokim brzinama prenosa podataka, većim kapacitetom, umerenim kašnjenjem, odgovarajućim kvalitetom servisa i boljim nivoom pokrivenosti. Uloga ovih servisa je da obezbede pristup servisima u urbanim sredinama, na stadionima, u kancelarijama, konferencijskim salama, kao i pristup servisima korisnicima koji su u pokretu, na primer u automobilima, vozovima.
- Servisi za masovnu komunikaciju između uređaja (mMTC, *massive Machine-Type Communications*) su namenjeni za istovremenu širokopolasnu komunikaciju velikog broja uređaja male snage, bez posredovanja čoveka. Ova vrsta servisa je prevashodno namenjena za primenu u sve zastupljenijim IoT sistemima.
- Za sisteme u kojima je potrebno obezbediti visoku pouzdanost prenosa sa malim kašnjenjem, u planu je razvoj ultra pouzdanih servisa sa malim kašnjenjem u komunikaciji (uMTC, *ultra-reliable Machine-Type Communications*). Ovi servisi biće namenjeni za podršku rada sistema u realnom vremenu, a njihovo korišćenje imaće veliki značaj u oblasti medicine za obavljanje operacija udaljenim putem, za komunikaciju u samoupravljivim automobilima, kao i za automatizaciju procesa u industriji.

IoT sistemi su sve značajniji i podrazumevaju umrežavanje velikog broja uređaja, senzora, objekata i aplikacija sa Internetom, sa ciljem razmene senzorskih i multimedijalnih informacija [2]. Na slici 1.2. je prikazan broj IoT uređaja u prethodnih par godina, kao i predikcija broja IoT uređaja u narednim godinama [6]. Može se uočiti trend porasta broja IoT uređaja u prethodnih nekoliko godina, a očekuje se da će ovaj trend da se nastavi i u narednom periodu.



Slika 1.2. – Broj IoT uređaja u prethodnom periodu i predikcija broja IoT uređaja u budućnosti na globalnom nivou [6].

5G sistemi predstavljaju osnovu za dalji razvoj IoT sistema. Imajući u vidu da je svrha IoT sistema prikupljanje velike količine podataka od različitih uređaja i senzora, uloga 5G tehnologije je da se obezbedi veoma velika brzina Internet konekcije za prikupljanje, prenos, kontrolu i obradu tih podataka. Na slici 1.3. su ilustrovane oblasti u kojima se stiču benefiti primenom 5G tehnologija. Povezivanje velikog broja uređaja korišćenjem velikih brzina prenosa, omogućeno je korišćenjem 5G tehnologija čime se pruža mogućnost upravljanja pametnim kućnim aparatima. Na primer, prilikom izgradnje domova ugrađuju se pametni senzori u frižidere i osvetljenje koji služe za upravljanje potrošnjom energije. Dodatno, 5G je koncept koji pruža izuzetno malo kašnjenje u prenosu podataka, pa je moguće upravljati pametnim kućnim aparatima sa udaljenih lokacija. Pomoću 5G bežične mreže moguće je kontrolisati sisteme na određenoj teritoriji, na primer vršiti uštedu energije i efikasno napajanje pametnim sistemima osvetljenja, pametno upravljati vodenim resursima, vršiti kontrolu resursa u vanrednim situacijama [2]. Ideja koja je u osnovi realizacije implementacije jednog pametnog grada je da se poboljša životni stil na ekološki prihvatljiv način. U industriji, 5G tehnologija omogućava pametno pakovanje, transport, energetska efikasnost, automatizaciju procesa proizvodnje, održavanje opreme i logistiku. U poljoprivredi 5G tehnologija može doprineti poboljšanju kvaliteta useva. Primenom 5G senzora i satelitskih sistema za određivanje lokacije može se izvršiti predikcija vremenskih nepogoda i obezbediti zaštita useva od štetnih uticaja. Osim toga, zaštita useva od štetočina i insekata se može vršiti kontrolisanjem njihove prisutnosti i preduzimanjem odgovarajućih mera za njihovo suzbijanje. Pomoću pametnih senzora može se pratiti prisutnost količine vlage u zemlji i u zavisnosti od očitavanja sa senzora koristiti pametni sistemi za navodnjavanje. Veoma male vrednosti kašnjenja u komunikaciji omogućavaju primenu i u komunikaciji samoupravljivih automobila sa drugim vozilima, pametnim saobraćajnim znacima i objektima. Primena IoT sistema je zastupljena i u zdravstvenoj zaštiti ljudi. Pametni senzori se raspoređuju u telu pacijenta sa ciljem prikupljanja informacija o opštem stanju zdravlja, pri čemu se mere opšti parametri kao što su temperatura, krvni pritisak, nivo šećera u krvi, broj srčanih otkucaja, a primenom 5G omogućeno je daljinsko praćenje pacijenata od strane medicinskog osoblja.



Slika 1.3. – Ilustracija primene IoT sistema.

Kako primena IoT koncepta donosi sve veći broj uređaja male snage, jasno je da rezultujući masovni prenos podataka stvara potrebu za dodatnim energetske i spektralnim resursima, kao i njihovim efikasnijim korišćenjem. Kada je količina čvorova u mreži veoma velika, kritično je da su oni malih dimenzija i cene, robusni, sa mogućnošću samokonfiguracije i bežičnog uspostavljanja veze, jer je u tom slučaju znatno lakše održavati bežični senzorski sistem. Takođe, u slučaju senzora koji se koriste u vojne svrhe vrlo je važno da postoji mogućnost autonomnog rada u dužem vremenskom periodu.

Životni vek bežične senzorske mreže zavisi od životnog veka senzora koji se najčešće napajaju putem baterija koje imaju ograničeno vreme upotrebe. Napajanje velikog broja uređaja predstavlja veliki izazov, a troškovi održavanja i zamene velikog broja baterija su veoma visoki. Osim toga, zagađenje životne sredine već predstavlja veliki problem, a sa pojavom novih uređaja emisija ugljenika iz baterija se dodatno povećava. Životni vek svake baterije je ograničen, a zamenom baterija se pojavljuje i velika količina štetnog otpada. Senzori se vrlo često nalaze na nepristupačnim mestima i zamena baterija u njima nosi određenu vrstu rizika. Da bi se obezbedio duži životni vek senzorske mreže, bez dodatnog ugrožavanja životne sredine i izazova koje nosi zamena baterija, od interesa je naći energetske efikasno i ekološki prihvatljivo rešenje bez dodatnog štetnog otpada. U narednom odeljku biće predstavljeni koncepti napajanja velikog broja uređaja koji nisu opremljeni baterijama koje treba periodično menjati, čime se olakšava njihova upotreba i doprinosi očuvanju životne sredine.

1.1 Prikupljanje energije

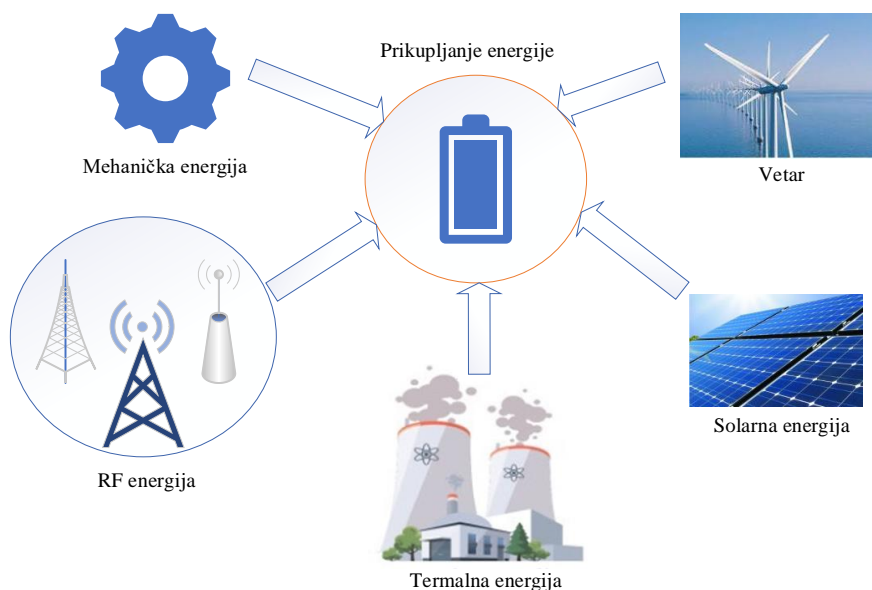
EH (*Energy Harvesting*) predstavlja proces prikupljanja energije iz okruženja i pretvaranje te energije u upotrebljivu električnu energiju čime se rešava problem zamene i dopunjavanja baterija i ograničenog trajanja senzora. To je koncept u kojem se bežični senzori u mreži neprekidno napajaju iz prirodnih izvora energije ili posebno namenjenih izvora, čime se omogućava neprekidan rad mreže sa povećanom energetske efikasnošću uz ekološki prihvatljivo rešenje sa smanjenom količinom štetnog otpada. Senzorsku mrežu bez zahteva za zamenom baterija, moguće je postaviti i na nepristupačnim mestima, poput betonskih konstrukcija ili unutar ljudskog tela.

Korišćenjem tehnika prikupljanja energije, sensorima u mreži je omogućeno da prikupljaju energiju iz različitih alternativnih izvora koji su prikazani na slici 1.4. [7]. Izvori koji se mogu koristiti za proces prikupljanja energije mogu biti solarni, vetar, vibracije i signali iz radio-frekvencijskog (RF, *Radio frequency*) opsega [8], [9]. U zavisnosti od koncepta prikupljanja energije u senzoru, energija iz ovih izvora se može koristiti za prikupljanje i skladištenje, kao i za pretvaranje u upotrebljivu električnu energiju.

U zavisnosti od toga da li sensor poseduje bateriju za skladištenje prikupljene energije, postoje tri scenarija [10]:

- U prvom scenariju sensor prvo prikuplja energiju, a potom vrši prenos informacije koristeći tu energiju. Sensor ne poseduje skladište za smeštanje prikupljene energije i prenos informacija je moguć samo ukoliko sensor u datom kratkom vremenskom okviru prikupi dovoljno energije. Ukoliko prikupljena energija nije dovoljna, sensor ostaje u neaktivnom stanju.
- U drugom scenariju sensor prvo vrši prikupljanje energije, nakon toga se vrši njeno skladištenje (najčešće je skladište baterija), a zatim se ta energija koristi za prenos informacija. Na ovaj način moguće je izvršiti prenos informacije i u slučaju kada u određenom trenutku ne postoji izvor energije, a postoji energija u skladištu.
- U trećem scenariju sensor prvo vrši prikupljanje energije, potom deo energije koristi za prenos informacije, dok preostalu energiju smešta u odgovarajuće skladište i može je koristiti ubuduće za prenos informacije.

Neograničena dostupnost energije iz okoline može se obezbediti i prirodnim izvorima energije, kao što su vetar, protok vode, talasi okeana i solarna energija. U mehaničke izvore energije se ubrajaju vibracije koje potiču od mašina, mehaničko naprezanje uređaja pod dejstvom spoljašnjih opterećenja, vibracije usled kretanja ljudi ili životinja. Toplotnu energiju stvaraju grejači i izvori trenja. Svetlosna energija se može dobijati iz svetlosnih izvora u zatvorenom prostoru i od spoljašnje Sunčeve svetlosti. Svetlosna energija se može prikupljati preko foto senzora, foto dioda i solarnih fotonaponskih panela koji su napravljeni od poluprovodničkog materijala, odnosno silicijuma. Ova tehnologija direktno pretvara Sunčevu svetlost u upotrebljivu električnu energiju. Na mestima na kojima postoji izvor Sunčeve svetlosti visoka fotonaponska ćelija predstavlja pogodno rešenje, dok se u slučaju zatvorenih prostora koriste posebni fotonaponski materijali koji su pogodniji za prigušeno svetlo.

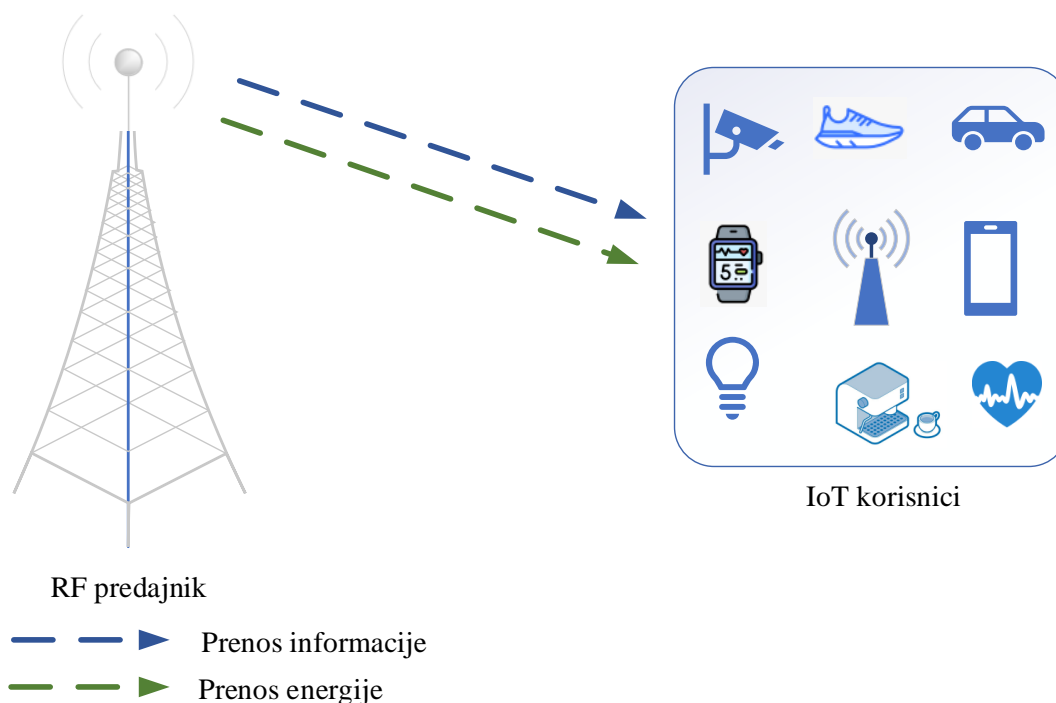


Slika 1.4. – Postojeći izvori energije u okruženju.

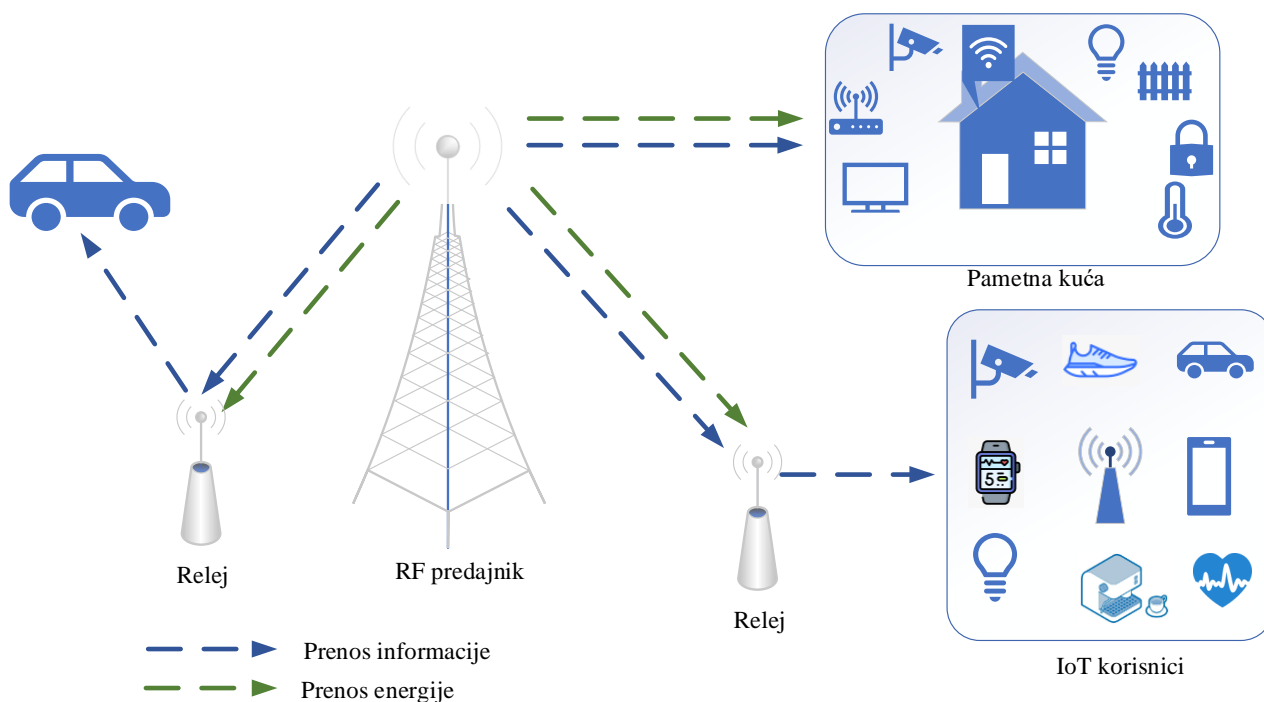
Za razliku od prethodno navedenih izvora, RF izvori energije obezbeđuju pouzdanost u napajanju, nezavisno od vremenskih uslova, geografske lokacije i rada mašina [11], [12]. Samim tim, korišćenjem RF izvora energije obezbeđeno je konzistentno napajanje. RF izvori energije su od posebnog značaja u zatvorenim prostorima, zbog nedostupnosti drugih izvora energije. Dodatnu prednost predstavlja i činjenica da je RF energija relativno lako dostupna obzirom na postojeću emisiju sa baznih stanica, televizijskih i radio predajnika, radio uređaja, mikrotalasnih peći, mrežnih rutera. Osim navedenog, napajanje uređaja može biti i iz namenskih RF izvora energije (PB, *Power Beacon*) [13], [14], [15].

Bežični prenos energije i pretvaranje bežične energije u korisnu energiju prvi je predložio Nikola Tesla 1891. godine kada je i konstruisao tzv. Teslin kalem namenjen za prenos energije na malim rastojanjima. Demonstracija mogućnosti Teslinog kalema zasnivala se na kontrolisanju rada sijalica koje su se nalazile u drugom delu prostorije. Važna prednost korišćenja RF signala za bežični prenos energije proizilazi iz njihove sposobnosti prenosa energije i informacija. Takav pristup se koristi u konceptu istovremenog bežičnog prenosa informacija i energije (SWIPT, *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*) [7], [12] koji je ilustrovan na slici 1.5. SWIPT je prvi put analiziran u [16] i predstavlja kombinaciju dva osnovna pristupa pri bežičnom prenosu: bežični prenos informacija i bežični prenos energije. Ukoliko se koriste odvojeno ova dva pristupa služe ili za komunikaciju ili za prenos energije. Korišćenjem objedinjenog pristupa moguće je obezbediti napajanje senzora koji nemaju dovoljno energije za prenos, kao i istovremeni prenos informacija.

Kooperativan prenos i primena SWIPT koncepta mogu biti od interesa za prevazilaženje sve većih izazova koji se postavljaju pri dizajnu bežičnih mreža narednih generacija, kao što su povećane brzine prenosa podataka, smanjeno kašnjenje, bolja pokrivenost, kao i rasprostranjeno povezivanje ogromnog broja uređaja uz visok nivo energetske efikasnosti [7]. Slika 1.6. ilustruje primenu SWIPT koncepta u kooperativnom sistemu [7].



Slika 1.5. – SWIPT koncept.



Slika 1.6. – Primena SWIPT koncepta u kooperativnom sistemu.

1.2 Kognitivni radio

Frekvencijski spektar je ograničen resurs čiju upotrebu kontrolišu regulatorna tela izdavanjem odgovarajućih licenci na osnovu kojih se definiše pravo korišćenja određenog frekvencijskog opsega. U Sjedinjenim Američkim Državama raspodelu spektra vrši Federalna komisija za komunikacije (FCC, *Federal Communications Commission*), dok je na nivou Evrope regulatorno telo zaduženo za raspodelu Evropski institut za standarde iz oblasti telekomunikacija (ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*). Primer licenciranih frekvencijskih opsega su opsezi dodeljeni za rad radija i televizije, za rad sistema mobilne telefonije i satelitskih sistema, opsezi dodeljeni za rad kontrole letenja. Korisnik koji poseduje licencu za određeni deo frekvencijskog opsega vrši kontrolu nivoa emitovanja, a samim tim i kontrolu interferencije između korisnika tog opsega čime se može definisati kvalitet ponuđenih servisa. U prvo vreme, licence za korišćenje spektralnog opsega su bile besplatne i dodeljivale su se na osnovu podnošenja odgovarajuće prijave. Međutim, sa porastom broja servisa, većina licenci koje nisu povezane sa javnom bezbednošću i vojnim primenama dodeljuju se korisnicima na osnovu najviše finansijske ponude.

Analiza iskorišćenosti frekvencijskog spektra od strane FCC [17] je pokazala da neiskorišćeni delovi spektra i u vremenu i prostoru postoje u velikoj meri, dok se samo mali deo spektra konstantno koristi [18]. Dodatna istraživanja [19], [20] su pokazala da je problem nedostatka dostupnih spektralnih resursa posledica pre svega nedovoljno efikasne i fleksibilne politike regulatornih tela.

Predviđeno je da buduće mreže zadovolje širok spektar zahteva u vezi sa različitim vrstama usluga, pa pristup spektru treba prilagoditi u cilju maksimiziranja ukupnog iskorišćenja spektra. Zbog sve veće potražnje, pri korišćenju ograničenih spektralnih resursa neophodno je primeniti vrlo efikasne i inovativne pristupe. Tradicionalna statička raspodela dovela je do neefikasnog korišćenja spektra (kako u vremenu, tako i na različitim lokacijama) i samim tim do nedostatka slobodnih

spektralnih resursa za ponudu novih usluga [21], [22]. Prema sadašnjoj politici raspodele resursa, veći deo spektra je već dodeljen i postoji potreba za uvođenjem novih tehnika za njegovo efikasno korišćenje [18]. Različite tehnike su uvedene sa ciljem da više korisnika koristi ograničene resurse spektra. Među tehnikama se izdvajaju višestruki pristup sa frekvencijskom raspodelom (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*), višestruki pristup sa vremenskom raspodelom (TDMA, *Time Division Multiple Access*), višestruki pristup zasnovan na primeni tehnika proširenog spektra (CDMA, *Code Division Multiple Access*) i pristup sa više prijemnih i predajnih antena.

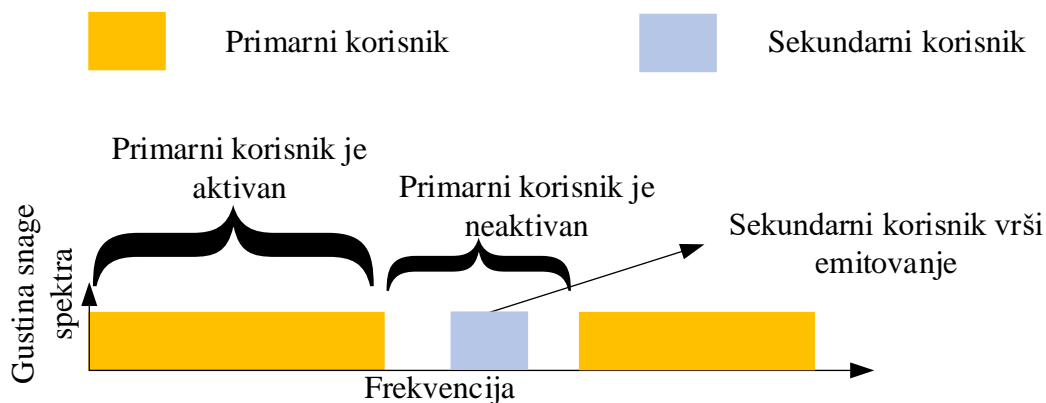
Ipak, kako IoT sistemi podrazumevaju ogroman broj prostorno raspodeljenih povezanih uređaja i senzora sa skromnim napajanjem i računskim kapacitetom, pristup spektralnim resursima treba obezbediti na način koji je prilagođen njihovim karakteristikama i ograničenjima [21], [22]. Za realizaciju odgovarajućeg informaciono-komunikacionog sistema, od interesa je istražiti mogućnosti primene kognitivnog radija, koji je prepoznat kao odgovarajuća tehnologija za primenu u IoT aplikacijama [23]. U samoupravljivim vozilima, vrši se prikupljanje informacija na senzorima, potom razmena informacija između senzora u vozilima i saobraćajnih znakova, kao i između različitih vozila, čime se omogućava bezbedna vožnja. Uslov koji je potrebno pri tome zadovoljiti je dostupnost spektralnih resursa za vozila koja su u pokretu, tako da je i u ovom primeru poželjna implementacija koncepta kognitivnog radija. Osim toga, sve su češći zahtevi za realizacijom koncepta pametne kuće, gde je potrebno ostvariti veze između većeg broja senzora koji bi vršili nadzor i upravljanje radom kućnih aparata i različitih aplikacija. S obzirom na to da već postoje određena rešenja koja se primenjuju u industriji i medicini, a koja rade na definisanim frekvencijama, potrebna je implementacija rešenja na bazi kognitivnog radija kako bi bili zadovoljeni uslovi za kontrolisanjem nivoa interferencije [24].

Koncept kognitivnog radija prvi put su predložili Mitola (*Joseph Mitola*) i Maguire (*Gerald Maguire*) 1999. godine [25]. Kognitivni radio predstavlja inteligentan uređaj koji je sposoban da vrši analizu svog okruženja i svoj rad prilagodi uslovima u okruženju. Koncept kognitivnog radija ima za cilj dinamičku raspodelu spektra, kako bi dostupni resursi bili iskorišćeni na adekvatan način i kako bi se prevazišao problem nedostatka dostupnih spektralnih resursa [26]. Koncept kognitivnog radija se bazira na postojanju dve vrste korisnika: primarnih i sekundarnih. Primarni korisnici su licencirani korisnici spektra i njima je spektar dodeljen od strane regulatornog tela. Sekundarni korisnici su nelicencirani korisnici spektra kojima spektar nije dodeljen od strane regulatornog tela, već oni koriste spektar dodeljen licenciranim korisnicima, uz obavezu poštovanja odgovarajućih pravila i ograničenja. Ovim pristupom omogućava se poboljšanje iskorišćenosti spektra [27]. U zavisnosti od pravila koja su definisana sekundarnim korisnicima za pristup spektru, postoje tri koncepta kognitivnog radija: oportunistički pristup spektru (*interweave*), pristup spektru sa kooperacijom (*overlay*) i pristup spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije (*underlay*) [24].

1.2.1 Oportunistički pristup spektru

Kod oportunističkog pristupa spektru, sekundarnim korisnicima je dozvoljeno da emituju u intervalima kada nije detektovana aktivnost primarnih korisnika spektra, kao što je prikazano na slici 1.7. Kognitivni radio u ovom konceptu pronalazi neiskorišćene delove spektra tzv. praznine u spektru za emitovanje bez ometanja primarnih korisnika. Praznine u spektru, koje se javljaju u vremenu i prostoru u zavisnosti od geografske lokacije, nazivaju se još i spektralne šupljine. Korišćenjem spektralnih šupljina od strane nelicenciranih korisnika, povećava se spektralna efikasnost. Koncept kognitivnog radija zasnovan na tehnici oportunističkog pristupa spektru predstavlja inteligentan bežični komunikacioni sistem koji je sposoban da vrši praćenje radio spektra, sa ciljem detekcije aktivnosti primarnog korisnika i pronalaska spektralnih šupljina, kako bi se realizovao oportunistički pristup spektralnim resursima i prenosile informacije koristeći šupljine u spektru bez dejstva interferencije koja degradira rad primarnog korisnika. Najčešća tehnika koja

se primenjuje za pronalaženje praznina u spektru je osluškivanje spektra [27]. Osluškivanje spektra je potrebno vršiti periodično kako bi u svakom trenutku bila dostupna informacija o raspoloživim spektralnim resursima. Nakon što detektuje prazninu u spektru, sekundarni korisnik vrši prilagođavanje parametara emitovanja, kao što su frekvencija nosioca i propusni opseg.



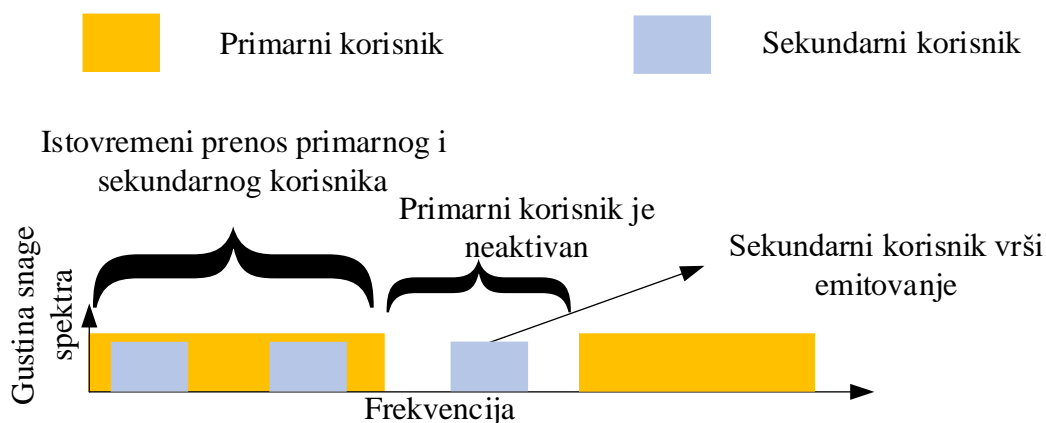
Slika 1.7. – Oportunistički pristup spektru.

Kada se ponovo detektuje aktivnost primarnog korisnika, sekundarni korisnik bi trebalo da prekine svoju aktivnost, kako bi minimizovao moguću pojavu interferencije ka primarnom korisniku spektra. Ovo je veoma težak zadatak, jer različiti primarni korisnici mogu koristiti različite modulacione postupke, brzine prenosa podataka i snage prenosa u različitim propagacionim sredinama, pri dejstvu različitog nivoa interferencije koju generišu ostali korisnici u okruženju. Takođe, sa stanovišta kognitivnih sistema, prenosi sa prekidima dovode do nekontinualnih servisa podataka i kašnjenja koje nije moguće tolerisati.

Detekcija spektralnih šupljina je dodatno otežana zbog dinamične aktivnosti licenciranih korisnika, potom zbog degradacije signala uslovljene fadingom u kanalu i efektom senke. Još jedan veliki problem za izvršenje spektralnog osluškivanja je problem skrivenog terminala koji se javlja kada je kognitivni radio u senci ili u uslovima jakog fadinga. U ovom slučaju, kognitivni radio ne može primetiti prisustvo primarnog korisnika, pa može pristupiti kanalu dok primarni korisnik još uvek vrši emitovanje.

1.2.2 Pristup spektru sa kooperacijom

U ovom konceptu pristupa spektru sekundarnom korisniku je dozvoljeno da emituje signal istovremeno sa primarnim korisnikom frekvencijskog opsega, pod pretpostavkom da primenom tehnika kooperacije takođe pomaže prenos signala primarnog korisnika. Koncept pristupa spektru sa kooperacijom prikazan je na slici 1.8. Kod ovog pristupa, sekundarni korisnik ne mora da čeka da se oslobodi određeni frekvencijski opseg, već vrši emitovanje zajedno sa primarnim korisnikom. Sekundarni korisnici moraju posedovati znanje o metodama kodiranja sekvence podataka koju prenose primarni korisnici.

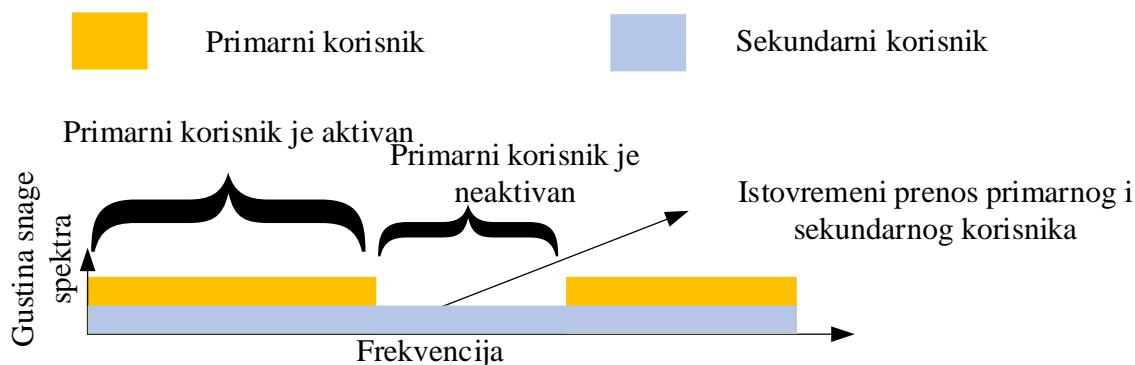


Slika 1.8. – Pristup spektru sa kooperacijom.

1.2.3 Pristup spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije

Pristup spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije dozvoljava istovremeno korišćenje istog frekvencijskog opsega licenciranim i nelicenciranim korisnicima. Za razliku od oportunističkog pristupa spektru, kod kojeg se vrši osluškivanje spektra pri čemu se troši energija, pristup spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije omogućava koegzistenciju licenciranih i nelicenciranih mreža. Sekundarni korisnik koristi iste spektralne resurse kao i primarni korisnik, bez izazivanja štetne interferencije primarnom korisniku. Sekundarni korisnik primenjuje adaptaciju emisione snage signala u realnom vremenu na osnovu dostupnih informacija o stanju kanala (CSI, *Channel State Information*), tako da nivo interferencije izazvane na prijemniku licenciranog korisnika bude unutar unapred određenih granica koje je moguće tolerisati [28]-[30]. Pri tome, ograničenje snage prenosa se može vršiti na osnovu ograničenja srednje snage i na osnovu ograničenja vršne snage.

Postavljeni uslov ograničenja nivoa generisane interferencije na prijemniku licenciranog korisnika u okviru unapred određenih granica, moguće je realizovati samo u slučaju kada je sekundarnom korisniku dostupna savršena informacija o stanju u kanalu, što u realnim okolnostima nije ostvarivo. Kako bi se obezbedila informacija o stanju u kanalu, neophodna je kooperativnost sekundarnih korisnika sa primarnim korisnicima ili posredovanje menadžera opsega.



Slika 1.9. – Pristup spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije.

Zbog vremenski promenljive prirode kanala parametri u realnom dinamičnom okruženju se stalno menjaju, pa je informacija o stanju u kanalu praktično uvek nesavršena ili zastarela, čak i kada postoji kooperativnost [31]-[35]. U slučaju nedostatka kooperativnosti, samo statistička informacija o stanju u kanalu (dugoročna informacija o stanju u kanalu) može biti dostupna [31], [36]-[38]. Važno je napomenuti da u slučaju kada savršena informacija o stanju u kanalu nije dostupna, strogo ograničenije interferencije ne može biti zadovoljeno, a prag smetnji će biti prekoračen tokom određenog procenta vremena, što će rezultirati smanjenim performansama primarnog i sekundarnog sistema. Takođe, adaptacija snage prenosa zasnovana na ažuriranju znanja o stanju u kanalu u realnom vremenu nije poželjna u slučaju kada postoji veliki broj kognitivnih korisnika sa ograničenim računskim mogućnostima. Kognitivna mreža zasnovana na statističkoj informaciji o stanju u kanalu omogućava rešenje smanjene kompleksnosti za koegzistenciju sa mrežom primarnih korisnika spektra. Pošto su IoT čvorovi obično male snage i računski ograničeni, pristup zasnovan na statističkoj informaciji o stanju u kanalu može biti koristan u pogledu energetske efikasnosti, jer pojednostavljuje opsežne proračune potrebne za adaptaciju snage u konvencionalnom konceptu.

1.3 Zaštita informacija

U savremenim bežičnim komunikacionim sistemima veliki izazov predstavlja i zaštita informacija koje se prenose. Za zaštitu informacija tipično se koriste kriptografske metode. Osnovna ideja kriptografije je korišćenje tajnog ključa za šifrovanje signala koji se prenosi kako bi bio u šifrovanom obliku. Ove metode su relativno visokog nivoa složenosti i nisu prilagođene primeni u slučaju uređaja male snage, pa su novija istraživanja usmerena na uslove bezbednosti prenosa na fizičkom sloju [39]-[42]. Stoga je analiza posmatranog kognitivnog sistema dodatno proširena i na uslove bezbednosti prenosa informacija.

Dodatno, za sisteme šifrovanja tajna razmena i upravljanje ključevima je veoma osetljiva u bežičnim mrežama, pošto prislušivači mogu lako presresti prenos tajnog ključa zbog prirode emitovanja bežičnog medija. Nasuprot tome, pristup bezbednosti na fizičkom sloju može sprečiti presretanje u prenosu podataka, korišćenjem karakteristika bežičnih kanala putem odgovarajuće signalizacije i kodiranja kanala bez šifrovanja podataka gornjeg sloja.

Kao što je pomenuto, IoT sistemi se sastoje od velikog broja uređaja, koji su zbog koncepta kognitivnog radija ograničenih snaga. Zbog ograničenih energetske resursa ograničene su i računski sposobnosti, stoga nije uvek moguće realizovati razmenu kriptografskih ključeva.

Bezbednost u bežičnim mrežama je bitna tema, a istraživanja u oblasti bezbednosti na fizičkom nivou sve više dobijaju na značaju. U literaturi su analizirani različiti tipovi pretnji i napada. Jedna od bezbednosnih pretnji je prislušivanje, što znači da je prislušivač presreo informacije koje se razmenjuju između predajnika i prijemnika. Komunikacija između senzora se odvija bežičnim putem preko nezaštićenih kanala i takve signale je relativno lako presretati. Bezbednost na fizičkom sloju je prvi put analizirana u [43] za slučaj modela prislušnog diskretnog kanala bez memorije. Vajner (*Aaron D. Wyner*) je kasnije istraživanje proširio i na bezbednost na fizičkom sloju u bežičnim kanalima. Prislušivač je najčešće pasivan, pri čemu samo vrši presretanje informacije koja je emitovana.

Stepen bezbednosti na fizičkom sloju opisuje se kapacitetom poverljivosti. Za slučaj Gausovog (*Carl Friedrich Gauss*) kanala, kapacitet poverljivosti se predstavlja razlikom Šenonovog (*Claude Elwood Shannon*) kapaciteta kanala između predajnika i prijemnika i Šenonovog kapaciteta kanala između predajnika i prislušivača. U zavisnosti od toga koliko je bezbedan prenos informacije u kognitivnim radio mrežama donosi se odluka da li su potrebne dodatne bezbednosne mere za odbranu od potencijalnih napada.

1.4 Pregled najznačajnijih istraživanja iz oblasti teme doktorske disertacije

Performanse kognitivnog radio sistema koji koristi pristup spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije i dostupnom nesavršenom informacijom o stanju u kanalu analizirane su u [32]-[34]. Korišćenjem pomenutog pristupa nije moguće zadovoljiti striktno ograničenje praga interferencije na primarnom prijemniku, pa se uvodi koncept premašenja praga interferencije. Kognitivni sistem koji koristi pristup sa kontrolisanim nivoom interferencije zasnovan na statističkoj informaciji o stanju u kanalu omogućava manje kompleksno rešenje za koegzistenciju sa primarnim sistemom [35]. Verovatnoća otkaza i ergodični kapacitet za slučaj kada se adaptacija snage prenosa vrši na osnovu informacije o stanju u kanalu koja je zastarela, kao i za slučaj kada su samo statistička svojstva kanala poznata analizirani su u radu [31]. Performanse kognitivnog sistema koji koristi pristup sa kontrolisanim nivoom interferencije analizirane su za slučaj poznavanja informacije o stanju u kanalu sa primenom kooperativnosti [36], [37] i primene prostorno-vremenskih kodova u okruženju višestrukih interferencija [38]. Primene oportunističkog pristupa i pristupa spektru sa kooperacijom u kognitivnim IoT sistemima analizirane su u [44], [45].

Bežični prenos energije predstavlja inovativni pristup za realizaciju praktično izvodljivog i energetski efikasnog napajanja čvorova [46]. Iako se energija može dobiti iz različitih prirodnih izvora, prikupljanje energije iz RF izvora predstavlja veoma poželjno rešenje, jer obezbeđuje neophodnu pouzdanost u snabdevanju energijom. U oblasti sakupljanja energije iz RF izvora, tehnologija je poslednjih godina postigla veliki napredak kako u industriji [47], tako i u akademskoj zajednici [48]. U narednom periodu očekuje se dalje unapređenje razvoja ove tehnologije [49]. Primer korišćenja bežičnog prenosa energije u kooperativnoj senzorskoj mreži pametnog grada prikazan je u [50].

Napajanje kooperativne kognitivne radio mreže namenskim signalom je analizirano u [15], dok je analiza višeslojne kognitivne mreže koja se napaja namenskim signalom predstavljena u [51]. Analiza performansi bežične mreže u kojoj predajnik prikuplja energiju od interferirajućih signala, kao i ambijentalnih RF izvora predstavljena je u [52]. Kombinovana upotreba kognitivne mreže [53], [54] sa pristupom kooperativnog prikupljanja energije [55]-[57] može dalje omogućiti koegzistenciju dve mreže u istom spektralnom opsegu sa kontrolisanom međusobnom interferencijom, što omogućava energetsku održivost mrežnih relejnih čvorova [58]. Samoodrživi kognitivni radio relejni sistem koji koristi pristup sa kontrolisanim nivoom interferencije analiziran je u radu [59], [60]. Koncept kooperativnosti sa energetski ograničenim relejem za dekodovanje i prosleđivanje, koji se napaja bežičnim prenosom energije predložen je u [56] i analiziran u okruženju sa Rejljevom (*Rayleigh*) fedingom. Analiza je proširena u [61] za slučaj Nakagami- m propagacionog okruženja i nelinearne karakteristike sakupljača energije. Bežični prenos energije je analiziran u [62] za slučaj kooperativne kognitivne mreže sa savršenom informacijom o stanju u kanalu, a u [63]-[65] za slučaj nesavršene informacije o stanju u kanalu. Analiza performansi 5G kooperativne mreže sa korisnicima koji imaju fiksne pozicije i bežičnim prenosom RF energije prikazana je u [66], dok su performanse mreže u kojoj se izvor napaja namenskim signalom za napajanje date u [67]. Performanse mreže sa bežičnim napajanjem uz pomoć namenskog signala za napajanje i prenosom sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu analizirane su u [68], za okruženje sa ograničenim nivoom interferencije. Ostvarivi kapacitet je izračunat za različite šeme prenosa i adaptacije snage i brzine, za slučaj fedinga sa Rejljevom raspodelom. Analiza performansi telekomunikacionog sistema sa bežičnim napajanjem i prenosom sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu predstavljena je u [69], za slučaj Rajsovog (*Rician*) fedinga. Analiza kognitivne radio mreže sa kontrolisanim nivoom interferencije zasnovane na istovremenom prenosu energije i informacije predstavljena je u [70], dok je scenario sa višestrukim signalima za napajanje u kognitivnoj radio mreži analiziran u [71].

Kao što je ranije naglašeno, u većini radova analizirane su performanse bežičnih sistema sa korisnicima koji imaju fiksne pozicije. Međutim, na taj način nije predstavljeno tipično ponašanje korisnika u novim generacijama bežičnih telekomunikacionih sistema gde su korisnici u većini slučajeva mobilni, na primer, mobilni korisnici u automobilima, vozovima, autobusima i pešaci na ulicama. Analiza performansi bežičnog sistema sa mobilnim prijemnikom za okruženje sa Nakagami- m fadingom izložena je u [72], gde su izvedeni izrazi u zatvorenom obliku za verovatnoću otkaza sistema i primenjeni model mobilnosti slučajnih tačaka (RWP, *Random WayPoint mobility model*). Performanse sistema sa bežičnim prenosom energije su date u [73]-[75] za okruženje sa Nakagami- m fadingom, za slučaj kada se izvor napaja namenskim signalom za napajanje, a mobilnost prijemnog čvora je opisana korišćenjem modela mobilnosti slučajnih tačaka. Uticaj mobilnosti na performanse sistema predstavljen je u [76], za složeniju raspodelu η - μ fadinga koja se koristi za modelovanje dinamičkog ponašanja nehomogenog fadinga, dok je mobilni prijemnik opisan korišćenjem modela mobilnosti slučajnih tačaka. Analitički rezultati za ergodični kapacitet kanala za generalizovanu raspodelu fadinga su predstavljeni u [77], dok su efekti mobilnosti procenjeni u [78] za k - μ generalizovani model fadinga (uključujući Nakagami- m i Rajsovu raspodelu fadinga kao specijalne slučajeve), pri čemu je u oba rada kretanje mobilnog prijemnika opisano pomoću modela mobilnosti slučajnih tačaka. Još jedna bežična mreža sa mobilnim korisnicima i Rajsovom raspodelom fadinga razmatrana je u [79], gde su za verovatnoću otkaza u okruženju sa ograničenom interferencijom izvedeni izrazi u zatvorenom obliku. U [80] je analiziran uticaj mobilnosti korisnika u okruženju koje se može opisati generalizovanom raspodelom α - μ fadinga. Autori u [76], [78], [81], [82] analiziraju efekte mobilnosti na performanse komunikacionog sistema korišćenjem modela mobilnosti slučajnih tačaka, dok je uticaj modela mobilnosti slučajnog pravca (RD, *Random Direction mobility model*) prikazan u [83], [84]. Poređenje uticaja ova dva modela na performanse sistema opisano je u [85], [86].

Rad [87] proširuje analizu sistema sa mobilnim prijemnikom u okruženju sa fadingom na slučaj kada je prenos kognitivnog čvora u skladu sa nametnutim ograničenjem primarne mreže i raspoloživom nesavršenom informacijom o stanju u kanalu. Pretpostavlja se da propagaciono okruženje podleže fadingu sa Rejljevom raspodelom, koja predstavlja poseban slučaj Nakagami- m raspodele.

Analiza poverljivosti prenosa informacija razmatrana je [88]-[100]. U radu [88] je predloženo korišćenje algoritama za prilagođenje emisione snage predajnika kako bi se povećao kapacitet kanala ka prijemniku, a smanjio kapacitet kanala od predajnika ka prislušivaču i na taj način poboljšao kapacitet poverljivosti. Kapacitet poverljivosti je jedan od najvažnijih parametara koji opisuje bezbednost na fizičkom nivou radio mreže i analiziran je u radu [89]. Kroz literaturu su analizirane performanse sistema sa ciljem da se odredi koliko je bezbedan prenos informacije u kognitivnim radio mrežama, kako bi se donela odluka da li su potrebne dodatne bezbednosne mere za odbranu od potencijalnih napada. Za određivanje poverljivosti podataka na fizičkom nivou uvedena je performansa verovatnoća otkaza poverljivosti. Analiza kapaciteta poverljivosti i verovatnoće otkaza poverljivosti izvršena je u [90]. Kooperativna komunikaciona mreža sa bežičnim prenosom energije i relejnom šemom sa dekodovanjem i prosleđivanjem u prisustvu prislušivača predstavljena je u [91]. Analiza ovakvog sistema za slučaj Nakagami- m fadinga, koji opisuje širi opseg propagacionih okruženja predstavljena je u [92]. Verovatnoća presretanja signala kao dodatna performansa koja se analizira u sistemu sa prislušivačem razmatrana je u [93], [94]. U radu [95] je predstavljena analiza verovatnoće presretanja signala u kooperativnom relejnom sistemu kada prislušivač vrši presretanje informacije sa releja i sa predajnika, koja je proširena za različite tipove relejnih protokola u radu [96].

U radovima [97], [98] je analizirana verovatnoća otkaza poverljivosti u kognitivnoj radio mreži sa bežičnim prenosom energije i pristupom spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije, pri čemu fading u svim kanalima podleže Nakagami- m raspodeli. Analiza performansi opisanog sistema je proširena i na proračun kapaciteta poverljivosti u radu [99]. Primer uticaja nelinearnog

bežičnog prenosa energije na performanse bezbednosti sistema predstavljen je u radu [100], gde su izvedeni izrazi u zatvorenom obliku za verovatnoću otkaza poverljivosti u sistemu.

1.5 Doprinos disertacije

U okviru ove doktorske disertacije predstavljena je analiza performansi kognitivnog kooperativnog radio sistema sa kontrolisanim nivoom interferencije, uz ograničenja sekundarnog korisnika definisana pragom interferencije i maksimalnom verovatnoćom otkaza rada primarnog korisnika, koji su zadovoljeni pod pretpostavkom da je sekundarnom korisniku spektra dostupna statistička informacija o stanju u kanalu.

U radu je predložen model kognitivnog radio sistema koji se napaja primenom bežičnog prenosa energije, iz posebno namenjenog izvora. Analiza je izvršena za slučaj kada je sekundarni korisnik na određenoj (fiksnoj) lokaciji, kao i za slučaj kada je sekundarni korisnik mobilan. U slučaju mobilnog korisnika, njegovo kretanje opisano je korišćenjem široko prihvaćenog modela mobilnosti slučajnih tačaka. Performanse sistema su analizirane za slučaj kada se feding u propagacionom okruženju može opisati Nakagami- m modelom. Izvedeni su analitički izrazi za verovatnoću otkaza sistema, kapacitet otkaza i ergodični kapacitet, koji predstavljaju originalni doprinos disertacije. Analitički rezultati su potvrđeni primenom nezavisnog razvijenog simulacionog modela.

Analiza je izvršena i u slučaju kada ne postoji direktna linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, već se komunikacija obavlja posredstvom releja. Analiziran je slučaj kada se prikupljanje energije u relejnom čvoru vrši iz izvora u okruženju, na osnovu prenosa zasnovanog na raspodeli intervala za prenos energije i informacija u vremenu, kao i kada se prikupljanje energije u relejnom čvoru vrši na osnovu raspodele snage. Analiziran je scenario kada raspodela fedinga u propagacionom okruženju podleže Rejlijevoj raspodeli, koja predstavlja specijalan slučaj Nakagami- m raspodele fedinga. Za slučaj kada je uticaj interferencije u okruženju dominantan izvedeni su izrazi u zatvorenom obliku za verovatnoću otkaza kognitivne mreže, kapacitet otkaza i ergodični kapacitet, koji predstavljaju originalni doprinos disertacije.

Za oba predložena modela kognitivnog sistema izvršena je analiza performansi koje opisuju bezbednost sistema na fizičkom nivou uz prisustvo prislušivača. U slučaju modela kognitivnog radio sistema koji se napaja iz posebno namenjenog izvora, izvedeni su izrazi u zatvorenom obliku za verovatnoću otkaza poverljivosti kada su sekundarni korisnik i prislušivač na fiksnoj lokaciji kao i kada je jedan od njih mobilan. Izvedeni izrazi predstavljaju originalni doprinos disertacije.

Kao rezultat istraživanja publikovani su radovi:

- N. Kozić, V. Blagojević, A. Cvetković, and P. Ivaniš, "Performance Analysis of Wirelessly Powered Cognitive Radio Network with Statistical CSI and Random Mobility," *Sensors*, vol. 23, no. 9, pp. 4518, May 2023, doi: 10.3390/s23094518., ISSN: 1424-8220, Impact Factor: 3.847 [75].
- N. Kozić, V. Blagojević, and P. Ivaniš, "Performance Analysis of Underlay Cognitive Radio System with Self-Sustainable Relay and Statistical CSI," *Sensors*, vol. 21, no. 11, pp. 3727, May 2021, doi: 10.3390/s21113727. ISSN: 1424-8220, Impact Factor: 3.847 [59].
- N. Kozić, V. Blagojević, and P. Ivaniš, "Ergodic Capacity Analysis of Cognitive System with Self-Sustainable Relay and Statistical CSI," 2021 *29th Telecommunications Forum (TELFOR)*, pp. 1-4, Belgrade, Serbia, November 2021, doi: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653387 [60].

U narednim glavama izložena je analiza opisanih sistema. Kooperativni kognitivni sistemi sa bežičnim prenosom energije su predstavljeni u glavi 2 uz opis korišćenih modela kanala. Analiza performansi kooperativnog kognitivnog sistema sa bežičnim prenosom energije i statističkom informacijom o stanju u kanalu sa prijemnikom koji ima fiksnu poziciju je data u glavi 3, dok je u glavi 4 analiza proširena na sistem sa mobilnim prijemnikom. U glavi 5 je predstavljena analiza bezbednosti informacije na fizičkom nivou u razmatranom kognitivnom sistemu, dok je zaključak izložen u glavi 6.

2. Kooperativni i kognitivni sistemi

Poznato je da bežične telekomunikacione sisteme karakteriše promena nivoa prijemnog radio signala, kao i prisustvo interferencije [101]. Fluktuacija nivoa signala na ulazu prijemnika nastaje kao posledica dejstva fadinga u kanalu i može dovesti do ograničenja u mogućnosti rekonstrukcije signala na prijemu. Prevazilaženje ovih ograničenja moguće je postići primenom neke od tehnika diverzitija. Postoji više tipova diverzitija u zavisnosti od načina prenosa signala, tako da je moguć prenos signala iz različitih prostornih pravaca (prostorni diverziti), prenos signala u različitim frekvencijskim opsezima (frekvencijski diverziti), prenos signala u različitim vremenskim slotovima (vremenski diverziti). Za razliku od vremenskog diverzitija i frekvencijskog diverzitija, prenos signala putem prostornog diverzitija moguće je ostvariti bez utroška dodatnih vremenskih i frekvencijskih resursa.

Jedan od načina za postizanje prostornog diverzitija je korišćenje MIMO tehnika. U slučaju kada su dimenzije terminala ograničene, prednosti korišćenja kolociranih MIMO sistema su takođe ograničene [102], pa je u tom slučaju pogodno korišćenje distribuiranih MIMO sistema sa terminalima opremljenim po jednom antenom. Koncept kooperativnosti između prostorno raspoređenih terminala uvodi se radi unapređenja mogućnosti njihove komunikacije.

U nastavku poglavlja opisan je opšti koncept kooperativnih sistema, nakon čega su predstavljeni modeli kanala koji se koriste za analizu performansi kooperativnih kognitivnih sistema u ovoj doktorskoj disertaciji.

2.1 Kooperativni sistemi

Koncept kooperativnosti je uveden sa idejom da se resursi u mrežama sa prostorno raspoređenim čvorovima koriste na efikasan način. Koncept releja u bežičnim mrežama je prvi uveo Van der Mullen (*Edward C. Van der Meulen*) 1971. godine [103] analizirajući kooperativan sistem koji se sastojao od predajnika, prijemnika i releja, dok je u radu [104] prvi put uveden koncept kooperativnih telekomunikacionih sistema i izvršena je analiza kapaciteta relejne mreže. U bežičnim telekomunikacionim sistemima pojam kooperativnosti podrazumeva saradnju više terminala sa ciljem da se poboljšaju performanse sistema. Na performanse sistema mogu uticati razni faktori kao što su slabljenje signala koji se prenosi od predajnika do prijemnika, efekat senke, propagacioni fading. Uloga kooperativnih komunikacija je da se smanje gubici koji nastaju u bežičnom kanalu, a da se pri tome degradirajući efekti u individualnim kanalima iskoriste za ukupno poboljšanje performansi sistema. Korišćenjem kooperativnih tehnika povećava se i oblast pokrivenosti i održava integritet bežične mreže. Kooperativnost se postiže uvođenjem releja za ostvarivanje komunikacije između terminala ili saradnjom ostalih terminala u mreži za prosleđivanje informacije ka prijemniku. Ukoliko se kooperativnost u mreži ostvaruje saradnjom

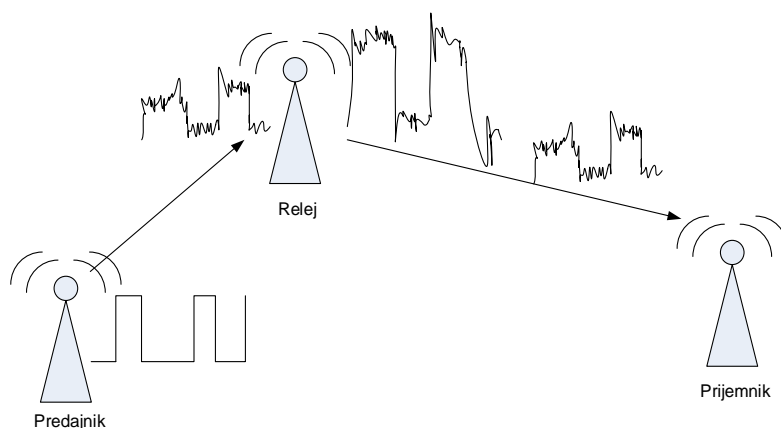
ostalim terminala nije potrebno menjati infrastrukturu mreže, ali je potrebno terminale u mreži prilagoditi za komunikaciju u odgovarajućim frekvencijskim opsezima, kao i obezbediti određeni nivo bezbednosti informacije koja se prenosi. Dodatno, terminal koji pomaže prenos informacije za to koristi sopstvene energetske i računске resurse. Sa druge strane, releji koji se uvode u mrežu koriste se isključivo za prosleđivanje informacije ka ostalim terminalima, a ne vrše prenos sopstvenih dodatnih informacija.

Ukoliko ne postoji direktna linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika komunikacija se takođe može ostvariti primenom kooperativnosti, odnosno postavljanjem releja između predajnika i prijemnika kako bi se oblast pokrivenosti proširila. Čak i u slučaju kada postoji direktna linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, performanse sistema se mogu poboljšati korišćenjem dodatnih relejnih čvorova. U sistemima koji sadrže uređaje male snage ograničena je predajna snaga, pa je za ostvarivanje komunikacije od predajnika do prijemnika potrebno koristiti dodatne releje u mreži. Dakle, osnovna ideja kooperativnih sistema je da se kroz saradnju više terminala poboljša kvalitet linka, pouzdanost i brzina prenosa podataka u sistemu.

Različiti protokoli se koriste za prosleđivanje informacije od releja do prijemnika. U nastavku će biti opisani scenariji prenosa signala sa jednim relejnim čvorom i scenariji prenosa sa više relejnih čvorova i predstavljena dva najzastupljenija protokola za prenos informacije od releja do prijemnika: protokol sa pojačavanjem i prosleđivanjem signala (AF, *Amplify and Forward*) i protokol sa dekodovanjem i prosleđivanjem signala (DF, *Decode and Forward*). Oba protokola su analizirana u [105], [106].

2.1.1 Prenos signala sa jednim relejnim čvorom

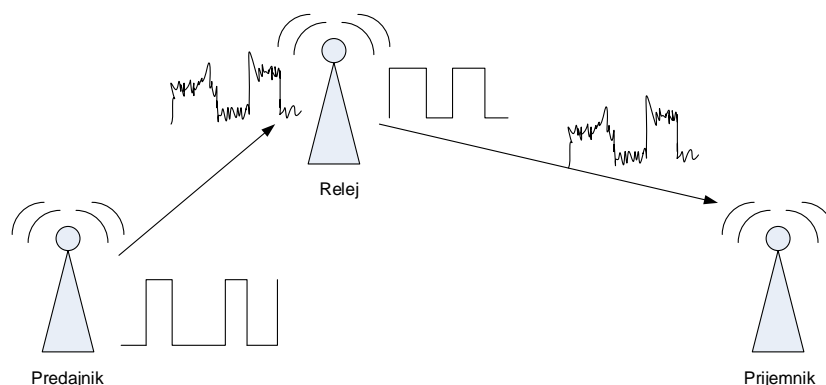
Najjednostavniji protokol, poznat kao AF, podrazumeva da relej jednostavno vrši pojačavanje i prosleđivanje signala [107]. Primena ovog protokola opisana je u radu [108], a značajno je naglasiti da primena ovog protokola podrazumeva da se osim pojačavanja korisnog signala, vrši i pojačavanje šuma, što rezultuje degradacijom performansi sistema. AF spada u grupu neregenerativnih protokola, jer ne vrši dekodovanje. Na slici 2.1. je ilustrovan prenos signala od predajnika do prijemnika u slučaju kada ne postoji direktna linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, već se komunikacija između njih odvija posredstvom releja koji koristi AF protokol.



Slika 2.1. – AF protokol.

Korišćenjem AF protokola degradiraju se performanse sistema zato što je komponenta šuma takođe pojačana u releju. Kako bi se optimizovale performanse sistema, neophodno je koeficijent za pojačavanje signala prilagoditi koeficijentima kanala. U radu [109] je izvršena analiza performansi sistema, sa primenjenim AF protokolom, u zavisnosti od položaja releja u odnosu na predajnik i prijemnik. Zaključeno je da se optimalne performanse postižu kada se relej nalazi na sredini između predajnika i prijemnika. Širenje oblasti pokrivanja dovodi do degradacije performansi sistema kada se koristi AF protokol [110]. Zbog toga je pri korišćenju AF protokola potrebno kreirati mrežu u kojoj postoji kompromis između veličine mreže i željenih performansi.

Prvi korak u primeni DF protokola je detekcija i dekodovanje primljenog signala, nakon čega se vrši prosleđivanje ponovno kodovanog signala [111]. Ovaj protokol omogućava korekciju greške u kanalima dobrog kvaliteta, dok u slučaju kada se kanal nalazi u dubokom fadingu dekodovanje dovodi do nastanka grešaka jer relej ponovo koduje netačne bite usled čega dolazi do propagacije greške i degradacije performansi sistema. Na slici 2.2. ilustrovan je princip prenosa signala u relejnoj vezi sa primenom DF protokola.



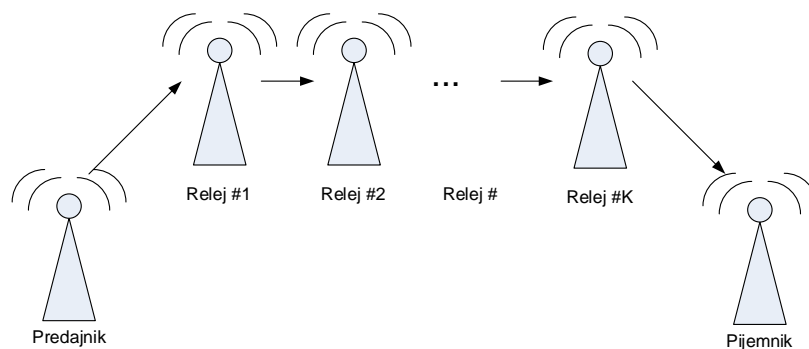
Slika 2.2. – DF protokol.

Ukoliko je DF protokol zasnovan na fiksnom dekodovanju i ponovnom kodovanju, ne postiže se potpuni diverziteti. Radi postizanja boljih performansi potrebno je posedovati informaciju o stanju u kanalu između predajnika i releja ili povratnu informaciju da li je potrebno vršiti retransmisiju paketa. Prenos signala korišćenjem releja se može vršiti i kada postoji direktna linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, čime se dodatno poboljšavaju performanse sistema.

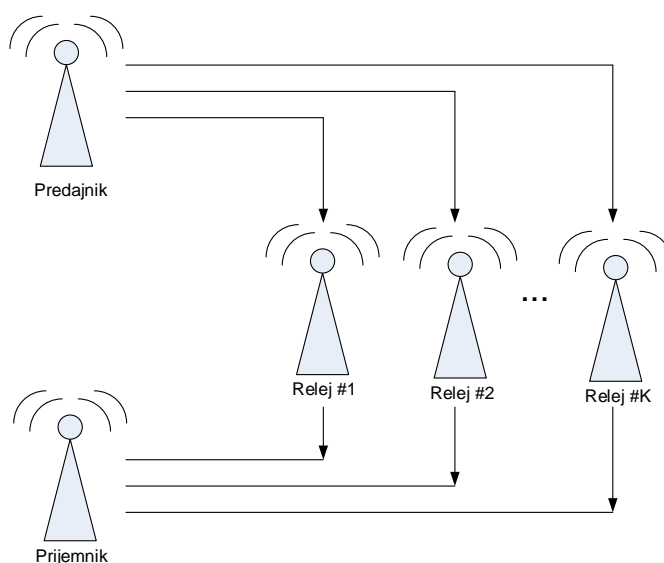
2.1.2 Prenos signala sa više relejnih čvorova

Kooperativni sistemi se u praksi mogu sastojati od više relejnih čvorova, a prenos informacije od predajnika do prijemnika se tada može obavljati preko više deonica korišćenjem releja povezanih serijski (kaskadno) ili paralelno [112]. Kada su releji povezani serijski, relej prenosi informaciju koju je primio od predajnika ili releja koji se nalazi ranije u nizu. Na slici 2.3. je prikazana šema sistema u kome se informacija od predajnika do prijemnika prenosi preko K releja povezanih serijski [113], pri čemu ne postoji direktna linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika. Uz pretpostavku da se radi o transparentnom prenosu, ekvivalentni koeficijent kanala predstavlja proizvod pojedinačnih koeficijenata kanala u sistemu prenosa.

Na slici 2.4. je prikazana šema relejnog sistema u kome se informacija od predajnika do prijemnika prenosi preko K relejnih veza u paraleli. Ni u ovom slučaju ne postoji direktna linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, pa se prenos informacije u svakoj od grana obavlja preko releja koji povezuje dve deonice.



Slika 2.3. – Kaskadni prenos putem releja u kooperativnom sistemu.



Slika 2.4. – Paralelni prenos putem releja u kooperativnom sistemu.

Takođe, moguće je korišćenje hibridne strukture mreže u kojoj predajnik vrši prenos informacije do prijemnika preko paralelnih linkova na kojima se komunikacija obavlja putem većeg broja serijski povezanih releja [114].

2.2 Kooperativni kognitivni sistemi

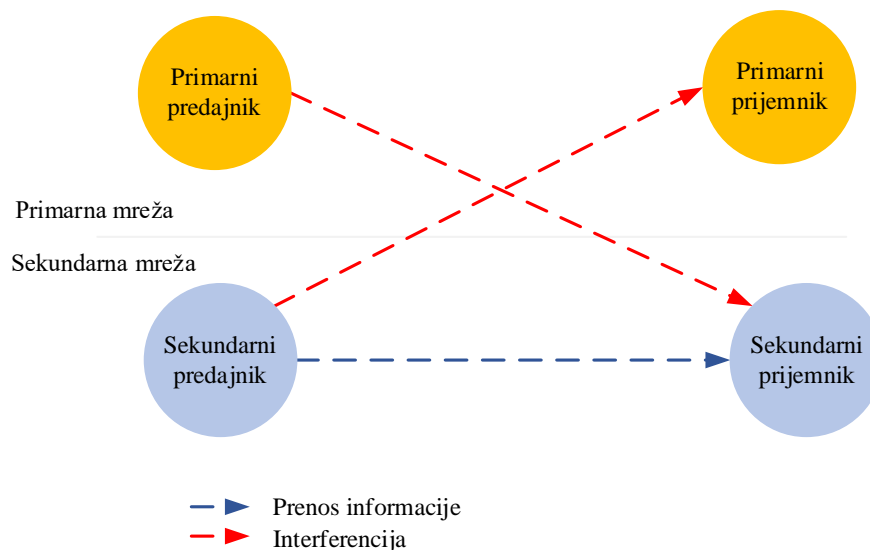
Kognitivne sisteme čine uređaji čija je predajna snaga ograničena uslovima koje definiše primarna mreža. Uređaji u sekundarnoj mreži su male snage i vrlo često ne postoji direktna linija optičke vidljivosti između predajnika i prijemnika, pa je od interesa uključiti koncept kooperativnosti. Kooperativnost između sekundarnih korisnika uvodi se i u cilju postizanja boljih performansi kognitivne mreže.

U konceptu pristupa spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije sekundarnom korisniku je omogućeno da prenos informacija vrši istovremeno sa primarnim korisnikom, koristeći isti frekvencijski opseg. Da bi se obezbedilo da nivo interferencije na mestu primarnog prijemnika bude unutar unapred definisanih granica potrebno je vršiti adaptaciju snage prenosa na sekundarnom korisniku. Adaptacija emisije snage sekundarnog korisnika vrši se na osnovu dostupne

informacije o stanju u kanalu ka primarnom prijemniku. Predajna snaga signala može se adaptirati na osnovu uslova ograničenja srednje snage interferencije i ograničenja vršne vrednosti interferencije (moguće je primeniti i oba uslova). Dozvoljene vrednosti nivoa interferencije koje definiše primarna mreža i stanje u kanalu ka primarnom korisniku imaju značajan uticaj na performanse sekundarne mreže. Sekundarni sistem koristi resurse dodeljene primarnom (licenciranom) sistemu na osnovu koncepta pristupa spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije, što znači da sekundarni korisnici mogu da obavljaju istovremeni prenos sve dok interferencija koja se stvara na mestu primarnog prijemnika ne prelazi dozvoljeni prag.

Informacija o stanju u kanalu se može dobiti na osnovu kooperativnosti sekundarnih i primarnih korisnika [115] ili korišćenjem menadžera opsega [116], [117]. Poznavanje savršene informacije o stanju u kanalu moguće je samo teorijski, dok je u realnim okolnostima kao posledica raznih efekata ova informacija nesavršena (odnosno, postoje greške u njenoj proceni).

Na slici 2.5. je prikazan model kooperativnog kognitivnog sistema sa kontrolisanim nivoom interferencije. Sekundarni sistem se sastoji od sekundarnog predajnika i prijemnika sekundarnog sistema. Koeficijent pojačanja kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika je označen sa h_{STxSRx} . Koeficijent pojačanja kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika je označen sa g_{STx} . Koeficijent pojačanja kanala od primarnog predajnika do sekundarnog prijemnika je označen sa f_{SRx} .



Slika 2.5. – Model kooperativnog kognitivnog sistema.

2.2.1 Kooperativni kognitivni sistem sa savršenom CSI

U ovom odeljku posmatra se kooperativni kognitivni sistem, pod pretpostavkom da je sekundarnoj mreži dostupna savršena informacija o stanju u kanalu ka primarnom prijemniku. Koristeći koncept pristupa spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije, sekundarnom predajniku je dozvoljeno da vrši emitovanje u istom frekvencijskom opsegu pod ograničenjem da se na primarnom prijemniku ne premašuje prag interferencije, označen sa Q_p . Maksimalna dozvoljena predajna snaga sekundarnog korisnika zavisi od vrednosti praga interferencije na primarnom prijemniku i pojačanja snage na linku od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika i predstavljena je sledećom jednačinom

$$P_{STx,\max} = \frac{Q_p}{|g_{STx}|^2}, \quad (2.1)$$

gde je $|g_{STx}|^2$ pojačanje snage na linku od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika.

Prijemni signal na sekundarnom prijemniku je dat sa

$$y_{SRx} = \sqrt{\frac{P_{STx,\max}}{D_{STxSRx}^\delta}} h_{STxSRx} x_{STx} + n_{SRx}, \quad (2.2)$$

gde je D_{STxSRx} rastojanje između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, δ eksponent propagacionih gubitaka na putanji, x_{STx} informacioni signal poslat sa predajnika i n_{SRx} komponenta aditivnog belog Gausovog šuma (AWGN, *Aditive White Gaussian Noise*) na sekundarnom prijemniku sa srednjom vrednošću snage σ_{SRx}^2 .

Odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku se može predstaviti na sledeći način

$$\gamma_{SRx} = \frac{P_{STx,\max} |h_{STxSRx}|^2}{D_{STxSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2}. \quad (2.3)$$

2.2.2 Kooperativni kognitivni sistem sa statističkom CSI

U prethodnom delu je opisano da se koncept kognitivnog radija zasniva na prilagođenju snage sekundarnog predajnika u skladu sa uslovima u propagacionom okruženju, sa ciljem kontrolisane vrednosti generisane interferencije na mestu primarnog prijemnika. U realnim okolnostima zbog čestih promena parametara kanala, nije moguće posedovati savršenu informaciju o stanju u kanalu i informacija o stanju u kanalu je praktično uvek nesavršena, odnosno sa određenim greškama u proceni. S druge strane, korišćenje statističke informacije o stanju u kanalu podrazumeva da su sekundarnoj mreži poznate srednje vrednosti pojačanja snage kanala ka primarnom prijemniku i ima osnovnu prednost u jednostavnosti usled lakše dostupnosti informacije. U tom slučaju, strogo ograničenje interferencije ne može biti zadovoljeno, a prag interferencije Q_p će biti prekoračen tokom određenog procenta vremena.

Sekundarnom predajniku je dozvoljeno da emituje u istom frekvencijskom opsegu pod ograničenjem da prag interferencije bude premašen sa verovatnoćom koja je manja od maksimalne dozvoljene vrednosti, označene sa $P_{out,PU}$. Maksimalna predajna snaga na sekundarnom predajniku, $P_{STx,\max}$, određena je dozvoljenom verovatnoćom premašenja interferencije

$$\Pr \left\{ P_{STx} |g_{STx}|^2 < Q_p \right\} = 1 - P_{out,PU}, \quad (2.4)$$

gde $\Pr\{\cdot\}$ označava verovatnoću, a $P_{out,PU}$ dozvoljenu verovatnoću otkaza primarne mreže.

Predajna snaga sekundarnog korisnika prilagođava se u skladu sa srednjim pojačanjem snage na linku od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika

$$P_{STx,\max} = k_{STx} \frac{Q_p}{\Lambda_{STx}}, \quad (2.5)$$

gde je k_{STx} koeficijent prilagođenja predajne snage sekundarnog predajnika i Λ_{STx} srednja vrednost koeficijenta pojačanja snage $|g_{STx}|^2$ na linku od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika.

Prijemni signal sekundarnog korisnika dat je sa

$$y_{SRx} = \sqrt{\frac{P_{STx,\max}}{D_{STxSRx}^\delta}} h_{STxSRx} x_{STx} + n_{SRx}. \quad (2.6)$$

Odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku se može predstaviti u obliku

$$\gamma_{SRx} = \frac{P_{STx,\max} |h_{STxSRx}|^2}{D_{STxSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2}. \quad (2.7)$$

2.3 Bežični prenos energije

Poznato je da princip kooperativnosti podrazumeva veći broj terminala koji se koriste i koji međusobno komuniciraju u cilju maksimiziranja performansi sistema. Terminali u mreži se mogu nalaziti na različitim lokacijama, na kojima primena konvencionalnih napajanja nije pogodna. Na primer, baterijsko napajanje podrazumeva stalnu promenu baterija i često nije praktično izvodljivo rešenje. Iz tog razloga, prenos energije bežičnim putem može ponuditi praktično i efikasno rešenje. Terminali u kooperativnoj mreži mogu da se napajaju primenom bežičnog prikupljanja energije od izvora u okruženju, kao i od namenskog izvora za napajanje putem bežičnog prenosa energije. U narednom delu biće razmotreno bežično napajanje terminala putem RF energije, čime se u kooperativnom sistemu omogućava istovremeni prenos informacija i energije.

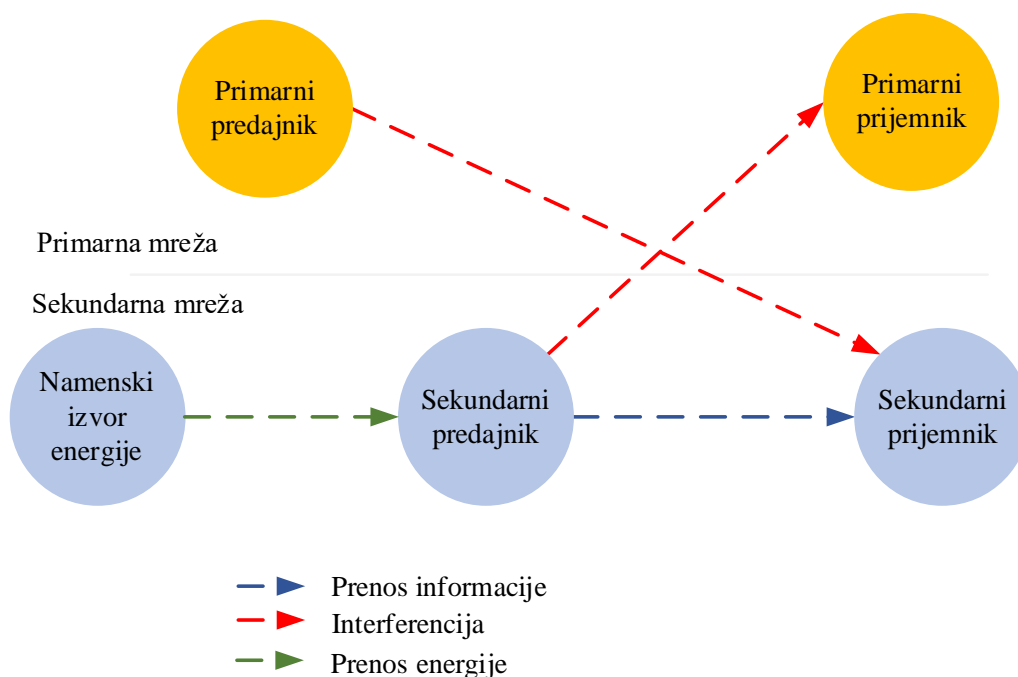
2.3.1 Kooperativni kognitivni sistem sa statističkom CSI i bežičnim prenosom energije

U kooperativnom sistemu, jedan od načina za napajanje terminala je korišćenje namenskog izvora za napajanje. U nastavku se posmatra sekundarni sistem koji se sastoji od namenskog izvora za bežični prenos energije, sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, prikazan na slici 2.6.

Signal poslat sa namenskog izvora za bežični prenos energije je na sekundarnom predajniku predstavljen sa

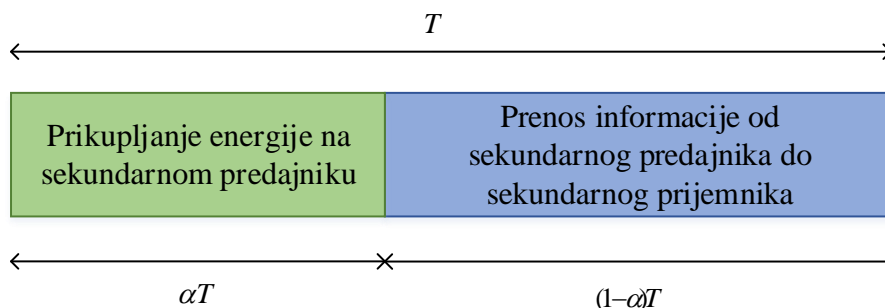
$$y_{STx} = \sqrt{\frac{P_{PB}}{D_{PBSTx}^\delta}} h_{PBSTx} x_{PB} + n_{STx}, \quad (2.8)$$

gde je x_{PB} signal koji se šalje sa izvora za napajanje, P_{PB} je snaga signala iz izvora za napajanje, D_{PBSTx} je rastojanje od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika i n_{STx} je aditivna komponenta belog Gausovog šuma na sekundarnom predajniku.



Slika 2.6. – Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije.

Za bežični prenos informacija i energije koristiti se protokol za prikupljanje energije baziran na prenosu sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu (TS, *Time Switching*), čija je ilustracija prikazana na slici 2.7. Celokupno trajanje vremenskog okvira je označeno sa T , dok αT ($\alpha \in \{0,1\}$) predstavlja deo vremenskog okvira u okviru kojeg sekundarni predajnik prikuplja energiju iz RF signala sa namenskog izvora energije. Preostalo vreme trajanja okvira $(1-\alpha)T$ koristi se za prenos informacije od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika.



Slika 2.7. – Ilustracija protokola prenosa sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu.

Energija koja se sakupi bežičnim prenosom na sekundarnom predajniku može se izraziti u sledećem obliku

$$E_H = \eta \alpha T \frac{P_{PB}}{D_{PBSTx}^\delta} |h_{PBSTx}|^2, \quad (2.9)$$

gde je η ($0 < \eta < 1$) koeficijent efikasnosti konverzije energije.

Maksimalna raspoloživa predajna snaga zavisi od prikupljene energije i vremena tokom koga se vrši prenos signala

$$P_{STx,EH} = \frac{E_H}{(1-\alpha)T} = \frac{\eta\alpha P_{PB}}{(1-\alpha)D_{PBSTx}^\delta} |h_{PBSTx}|^2. \quad (2.10)$$

Zbog ograničenja interferencije na primarnom prijemniku, potrebno je da bude ispunjen uslov da emisiona snaga sekundarnog predajnika ne prelazi maksimalnu dozvoljenu vrednost $P_{STx,max}$ definisanu jednačinom (2.5). Snaga prenosa sekundarnog korisnika se prilagođava koeficijentom k_{STx} u skladu sa pragom interferencije Q_p i srednjom vrednosti pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika, tako da se ne prekorači maksimalna verovatnoća otkaza primarne mreže.

Emisiona snaga sekundarnog predajnika zavisi od prikupljene energije i ograničena je uslovom ograničenja interferencije na primarnom prijemniku, pa se može predstaviti kao minimum vrednosti $P_{STx,EH}$ i $P_{STx,max}$

$$P_{STx} = \begin{cases} \frac{\eta\alpha P_{PB}}{(1-\alpha)D_{PBSTx}^\delta} |h_{PBSTx}|^2, & \frac{\eta\alpha P_{PB}}{(1-\alpha)D_{PBSTx}^\delta} |h_{PBSTx}|^2 \leq k_{STx} \frac{Q_p}{\Lambda_{STx}}, \\ k_{STx} \frac{Q_p}{\Lambda_{STx}}, & \frac{\eta\alpha P_{PB}}{(1-\alpha)D_{PBSTx}^\delta} |h_{PBSTx}|^2 > k_{STx} \frac{Q_p}{\Lambda_{STx}}. \end{cases} \quad (2.11)$$

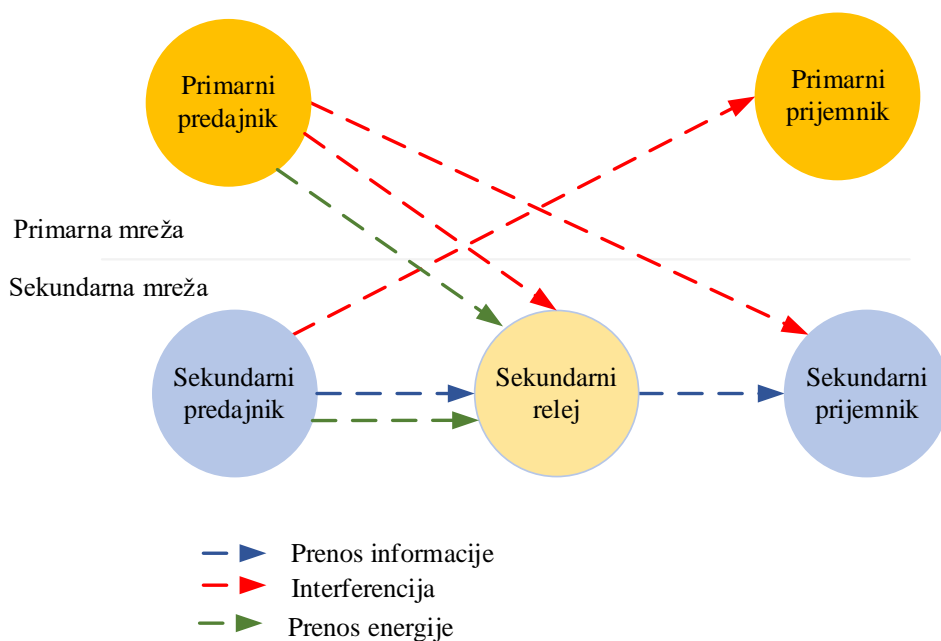
Prijemni signal sekundarnog korisnika opisan je jednačinom (2.6), pa se trenutni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku može predstaviti na sledeći način

$$\gamma_{SRx} = \frac{P_{STx} |h_{STxSRx}|^2}{D_{STxSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2} = \begin{cases} K_1 |h_{PBSTx}|^2 \frac{|h_{STxSRx}|^2}{D_{STxSRx}^\delta}, & |h_{PBSTx}|^2 \leq Q, \\ K_2 \frac{|h_{STxSRx}|^2}{D_{STxSRx}^\delta}, & |h_{PBSTx}|^2 > Q, \end{cases} \quad (2.12)$$

gde je $K_1 = \frac{\eta\alpha P_{PB}}{\sigma_{SRx}^2 (1-\alpha) D_{PBSTx}^\delta}$, $K_2 = k_{STx} \frac{Q_p}{\sigma_{SRx}^2 \Lambda_{STx}}$ i $Q = k_{STx} \frac{Q_p}{\Lambda_{STx} K_1}$.

2.3.2 Kooperativni relejni kognitivni sistem sa statističkom CSI i bežičnim prenosom energije

U drugom posmatranom scenariju, sekundarni sistem se sastoji od sekundarnog predajnika, energetske ograničenog sekundarnog releja i prijemnika kognitivnog sekundarnog sistema. Model razmatranog sistema prikazan je na slici 2.8. U posmatranom scenariju ne postoji direktna linija optičke vidljivosti između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, tako da oni mogu da komuniciraju samo uz pomoć sekundarnog releja.



Slika 2.8. – Model kooperativnog relejnog kognitivnog sistema.

Slično kao u konceptu opisanom u prethodnom odeljku, sekundarni sistem deli spektar sa primarnom mrežom na osnovu pristupa spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije, što znači da sekundarni korisnici mogu da obavljaju istovremeni prenos sve dok interferencija koja se stvara na primarnom prijemniku ne prelazi unapred definisani dozvoljeni prag. Pretpostavlja se da je sekundarnoj mreži dostupna samo statistička informacija o stanju u kanalu, odnosno da su poznate srednje vrednosti pojačanja snage kanala.

Predajna snaga sekundarnog predajnika se prilagođava korišćenjem jednačine (2.5), dok se predajna snaga sekundarnog releja prilagođava korišćenjem srednje vrednosti pojačanja snage na linku od sekundarnog releja do primarnog prijemnika

$$P_{SR,max} = k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, \quad (2.13)$$

gde je k_{SR} koeficijent prilagođenja predajne snage sekundarnog releja i Λ_{SR} srednja vrednost pojačanja snage $|g_{SR}|^2$ na linku od sekundarnog releja do primarnog prijemnika.

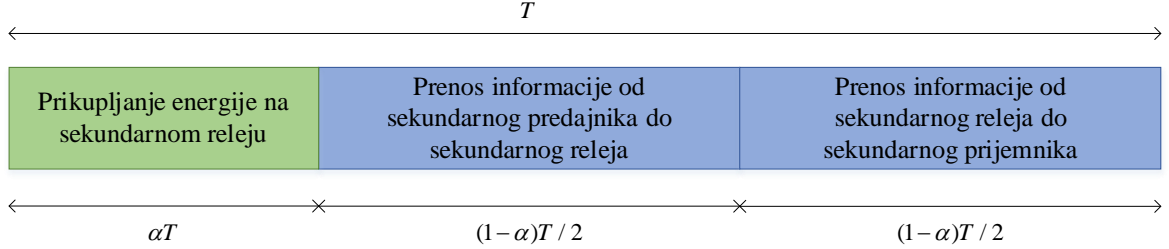
Za bežični prenos informacija i energije može se koristiti jedan od dva protokola za prikupljanje energije: protokol baziran na prenosu sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu i protokol baziran na raspodeli snage (PS, *Power Splitting*) [118].

2.3.2.1 Protokol prenosa informacija i energije baziran na raspodeli u vremenu

Princip prenosa u slučaju primenjenog TS protokola za prikupljanje energije i obradu informacija na releju ilustrovan je na slici 2.9. Vremenski interval okvira jednak je T , pri čemu αT ($\alpha \in \{0,1\}$) označava deo vremenskog okvira u kojem sekundarni relej prikuplja energiju iz RF signala sa predajnika. Preostalo vreme okvira $(1-\alpha)T$ koristi se za prenos informacija tako da se polovina tog vremena, $(1-\alpha)T/2$, koristi za prenos informacija od sekundarnog predajnika do

sekundarnog releja, dok se preostala polovina, $(1-\alpha)T/2$, koristi za prenos informacija od sekundarnog releja do sekundarnog prijemnika.

Predloženim protokolima se bežični prenos energije vrši odvojeno od bežičnog prenosa informacije jer je potrebno prvo prikupiti određenu energiju koju bi uređaj mogao da iskoristi za prenos, s obzirom na to da ne postoji beskonačno veliki bafer za skladištenje energije već se koriste baterije konačnog kapaciteta. Još jedan nedostatak bežičnog prikupljanja energije je i određeni gubitak energije usled konverzije RF energije u korisnu energiju.



Slika 2.9. – Ilustracija protokola prenosa na sekundarnom linku sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu.

Prijemni signal na sekundarnom releju može se izraziti na sledeći način

$$y_{SR} = \sqrt{\frac{P_{STx}}{D_{STxSR}^\delta}} h_{STxSR} x_{STx} + n_{SR}, \quad (2.14)$$

gde je D_{STxSR} rastojanje između sekundarnog predajnika i sekundarnog releja, h_{STxSR} koeficijent pojačanja kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja i n_{SR} komponenta aditivnog belog Gausovog šuma na sekundarnom releju sa srednjom vrednošću snage σ_{SR}^2 .

Odnos signal/šum na releju se može predstaviti u sledećem obliku

$$\gamma_{SR} = \frac{P_{STx, \max} |h_{STxSR}|^2}{D_{STxSR}^\delta \sigma_{SR}^2}. \quad (2.15)$$

U razmatranom konceptu, sekundarni relej može da prikuplja energiju od sekundarnog predajnika, ali i od signala interferencije primarnog predajnika. Sakupljena energija u releju sekundarnog sistema je

$$E_{H,R} = \eta \left(\frac{P_{STx, \max}}{D_{STxSR}^\delta} |h_{STxSR}|^2 + P_{PTx} |f_{SR}|^2 \right) \alpha T = \eta (\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \alpha T, \quad (2.16)$$

gde je P_{PTx} predajna snaga primarnog predajnika, $|f_{SR}|^2$ srednje pojačanje snage u kanalu od primarnog predajnika do sekundarnog releja, $\gamma_{STxSR} = \frac{P_{STx, \max}}{D_{STxSR}^\delta} |h_{STxSR}|^2$ i $I_{SR} = P_{PTx} |f_{SR}|^2$.

Pretpostavlja se da se ukupna energija prikupljena u releju tokom određenog vremena može uskladištiti u uređaju za skladištenje (npr. u superkondenzatoru ili u kratkoročnoj/visokoeffikasnoj bateriji), nakon čega se može koristiti za prenos u istom vremenskom okviru. Za prikupljenu energiju, maksimalna dostupna predajna snaga releja može se izraziti u obliku

$$P_{SR,EH} = \frac{E_{H,R}}{(1-\alpha)T/2}. \quad (2.17)$$

Predajna snaga sekundarnog releja sa ograničenom energijom određena je prikupljenom energijom i maksimalnom dozvoljenom snagom zbog ograničenja interferencije na primarnom prijemniku, pa se može izračunati na sledeći način

$$P_{SR} = \min\left(P_{SR,EH}, k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}\right). \quad (2.18)$$

Imajući u vidu da pri prenosu signala postoje ograničenja maksimalne dozvoljene snage i maksimalne prikupljene energije u okviru jednog vremenskog okvira, predajna snaga sekundarnog releja određena je dominantnim ograničenjem i može se izraziti na sledeći način

$$P_{SR} = \begin{cases} \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)}(\gamma_{STxSR} + I_{SR}), & \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)}(\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \leq k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, \\ k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, & \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)}(\gamma_{STxSR} + I_{SR}) > k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}. \end{cases} \quad (2.19)$$

Tada je prijemni informacioni signal na sekundarnom prijemniku jednak

$$y_{SRx} = \sqrt{\frac{P_{SR}}{D_{SRSRx}^\delta}} h_{SRSRx} x_{SR} + n_{SRx}, \quad (2.20)$$

gde je x_{SR} dekodovani informacioni signal poslat sa sekundarnog releja, a n_{SRx} je aditivna komponenta belog Gausovog šuma na sekundarnom prijemniku.

Prijemni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku se može napisati u formi

$$\gamma_{SRx} = \frac{P_{SR} |h_{SRSRx}|^2}{D_{SRSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2} = \frac{P_{SR} \gamma_{SRSRx}}{D_{SRSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2}, \quad (2.21)$$

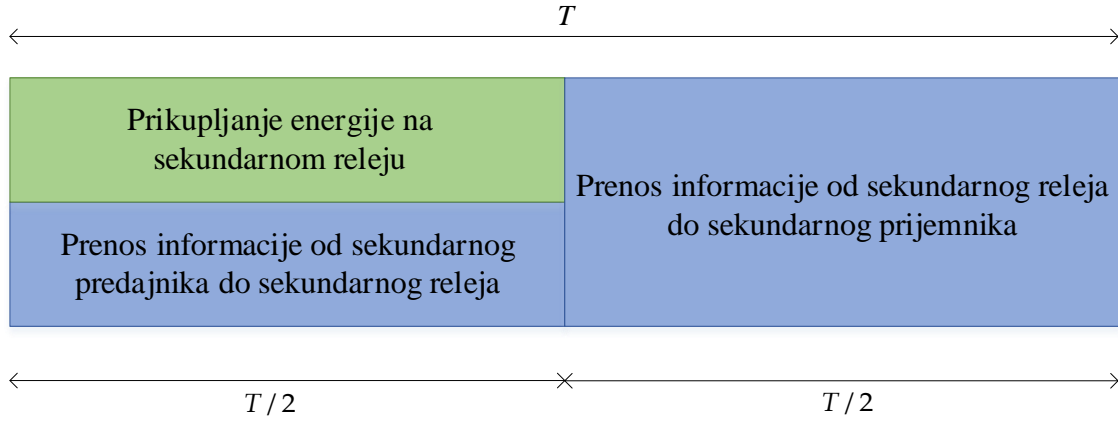
gde je $\gamma_{SRSRx} = |h_{SRSRx}|^2$.

Izraz za prijemni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku postaje

$$\gamma_{SRx} = \begin{cases} \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)}(\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \frac{\gamma_{SRSRx}}{D_{SRSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2}, & \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)}(\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \leq k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, \\ k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}} \frac{\gamma_{SRSRx}}{D_{SRSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2}, & \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)}(\gamma_{STxSR} + I_{SR}) > k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}. \end{cases} \quad (2.22)$$

2.3.2.2 Protokol prenosa informacija i energije baziran na raspodeli snage

Prenos energije i informacija u okviru jednog vremenskog okvira može se organizovati i u skladu sa protokolom baziranom na raspodeli snage. Princip prenosa informacija i energije ilustrovan je na slici 2.10. Ukupno vreme T je podeljeno na dva jednaka dela. U okviru prvog dela trajanja jednakog $T/2$, sekundarni predajnik prenosi informaciju sekundarnom releju, dok u okviru drugog dela trajanja jednakog $T/2$, sekundarni relej dalje prenosi informaciju do sekundarnog prijemnika. Pored prenosa informacija, prvi deo se koristi i za prikupljanje energije. U tu svrhu se koristi deo snage primljenog signala jednak ρP ($0 < \rho < 1$), dok se preostala snaga primljenog signala jednaka $(1-\rho)P$ koristi za prenos signala od predajnika do releja.



Slika 2.10. – Ilustracija protokola prenosa na sekundarnom linku baziranog na raspodeli snage.

Prijemni signal u osnovnom opsegu na releju je dat sa

$$y_{SR} = \sqrt{(1-\rho) \frac{P_{STx,\max}}{D_{STxSR}^\delta} h_{STxSR} x_{STx} + n_{SR}} \quad (2.23)$$

Prijemni odnos signal/šum na sekundarnom releju može se predstaviti u sledećem obliku

$$\gamma_{SR} = \frac{(1-\rho) P_{STx,\max} |h_{STxSR}|^2}{D_{STxSR}^\delta \sigma_{SR}^2}, \quad (2.24)$$

dok se energija prikupljena u sekundarnom releju može izraziti na sledeći način

$$E_{H,R} = \eta \rho \left(\frac{P_{STx,\max}}{D_{STxSR}^\delta} |h_{STxSR}|^2 + P_{PTx} |f_{SR}|^2 \right) T / 2, \quad (2.25)$$

ili u skraćenom obliku

$$E_{H,R} = \eta (\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \rho T / 2. \quad (2.26)$$

Maksimalna dostupna predajna snaga sekundarnog releja bazirana na prikupljenoj energiji može se izraziti kao

$$P_{SR,EH} = \frac{E_{H,R}}{T / 2}. \quad (2.27)$$

Pretpostavka je da sekundarni relej emituje sa maksimalnom dozvoljenom snagom, koja je ograničena količinom prikupljene energije i ograničenjem maksimalne dozvoljene interferencije na prijemniku primarnog korisnika

$$P_{SR} = \min \left(P_{SR,EH}, k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}} \right), \quad (2.28)$$

pa se predajna snaga sekundarnog releja može dalje predstaviti u sledećem obliku

$$P_{SR} = \begin{cases} \eta\rho(\gamma_{STxSR} + I_{SR}), & \eta\rho(\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \leq k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, \\ k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, & \eta\rho(\gamma_{STxSR} + I_{SR}) > k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}. \end{cases} \quad (2.29)$$

Prijemni informacioni signal na sekundarnom prijemniku je

$$y_{SRx} = \sqrt{\frac{P_{SR}}{D_{SRSRx}^\delta}} h_{SRSRx} x_{SR} + n_{SRx}. \quad (2.30)$$

Prijemni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku se može napisati u formi

$$\gamma_{SRx} = \frac{P_{SR} |h_{SRSRx}|^2}{D_{SRSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2} = \frac{P_{SR} \gamma_{SRSRx}}{D_{SRSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2}. \quad (2.31)$$

Izraz za prijemni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku postaje

$$\gamma_{SRx} = \begin{cases} \eta\rho(\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \frac{\gamma_{SRSRx}}{D_{SRSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2}, & \eta\rho(\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \leq k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, \\ k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}} \frac{\gamma_{SRSRx}}{D_{SRSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2}, & \eta\rho(\gamma_{STxSR} + I_{SR}) > k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}. \end{cases} \quad (2.32)$$

2.4 Model kanala

Bežična komunikacija između predajnika i prijemnika se obavlja preko radio kanala. Kako se predajnik i prijemnik nalaze na određenom rastojanju, signal emitovan sa predajnika na mesto prijema stiže sa određenim kašnjenjem i oslabljen. Karakteristike radio kanala su promenljive u vremenu i potrebno je naći adekvatan matematički model koji bi definisao parametre kanala koji opisuju njegov uticaj pri prenosu signala. Modelovanjem kanala za prenos informacije opisuje se prostiranje radio signala kroz okruženje. Performanse sistema koji se analizira zavise od efekata do kojih dolazi pri propagaciji signala, kao što su gubici na putanji, feding, refleksija, difrakcija, efekat senke, rasejanje, interferencija i šum u kanalu.

Nakagami- m model kanala [119] je široko rasprostranjen zbog jednostavnog matematičkog oblika. Pokazano je da je ovaj model pogodan za modelovanje radio kanala, jer rezultati dobijeni merenjima odgovaraju rezultatima dobijenim primenom Nakagami- m modela kanala [120], [121].

Veći deo publikovanih istraživanja koja se bave uticajem fedinga u kanalu odnose se na analizu performansi sistema u kojima korisnik ima fiksnu poziciju. S druge strane, u novoj generaciji bežičnih telekomunikacionih sistema korisnici su u većini slučajeva mobilni, na primer, mobilni korisnici u automobilima, vozovima, autobusima i pešaci na ulicama. Kako je mobilnost svojstvena bežičnim telekomunikacionim mrežama, signali u takvoj mreži su podložni promenljivosti jačine signala, koja se javlja kao posledica slabljenja signala zbog udaljenosti kao i višestrukog fedinga.

Formiranje realnog obrasca kretanja predstavlja veoma kompleksan zadatak, pa se u tu svrhu uvode modeli kretanja korisnika. Najzastupljeniji modeli koji se mogu koristiti za opis kretanja korisnika su: model mobilnosti slučajnog pravca i model mobilnosti slučajnih tačaka. Model mobilnosti slučajnog pravca forsira čvorove u mreži da, pre promene pravca i brzine, dođu do ivice oblasti kretanja. Kod modela mobilnosti slučajnih tačaka, korisnik ostaje određeno vreme na jednoj lokaciji, nakon koga nasumično bira sledeću lokaciju i kreće se ka njoj izabranom brzinom koja se nalazi u određenom opsegu vrednosti. Vreme između dve tačke, tj. vreme koje korisnik provede na jednoj lokaciji se posmatra kao pauza. Nakon što korisnik na određenoj lokaciji provede vreme trajanja pauze, nastavlja proces kretanja po istom pravilu [81], [122].

U narednom delu biće opisani modeli kanala koji su korišćeni pri analizi sistema u okviru ove doktorske disertacije. U odeljku 2.4.1 opisan je Nakagami- m model sa korisnikom koji ima fiksnu poziciju, a zatim je model kanala proširen na slučaj sa mobilnim korisnikom.

2.4.1 Nakagami- m model kanala sa fiksnom lokacijom korisnika

Raspodela anvelope fedinga u kanalu sa Nakagami- m fedingom može se predstaviti funkcijom gustine verovatnoće (PDF, *Probability Density Function*) u sledećem obliku

$$f_z(z) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m z^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} z^2\right), \quad z \geq 0, \quad (2.33)$$

gde Ω i m označavaju parametre Nakagami- m fedinga, a $\Gamma(\cdot)$ označava Gama funkciju [123, jednačina (6.1.1)].

Za parametre Nakagami- m fedinga važe sledeći uslovi

$$m = \frac{E^2[z^2]}{\text{Var}[z^2]}, \quad m \geq \frac{1}{2}, \quad (2.34)$$

$$\Omega = E[z^2], \quad (2.35)$$

gde je $E[\cdot]$ operator matematičkog očekivanja.

Izraz za funkciju raspodele anvelope u kanalu sa Nakagami- m fedingom se može prikazati preko funkcije raspodele (CDF, *Cumulative Distribution Function*), u sledećem obliku

$$F_z(y) = \int_0^y f_z(z) dz = 1 - \frac{\Gamma\left(m, \frac{m}{\Omega} y^2\right)}{\Gamma(m)}, \quad y \geq 0, \quad (2.36)$$

gde je $\Gamma(\cdot, \cdot)$ gornja nekompletna Gama funkcija [123, jednačina (6.5.3)].

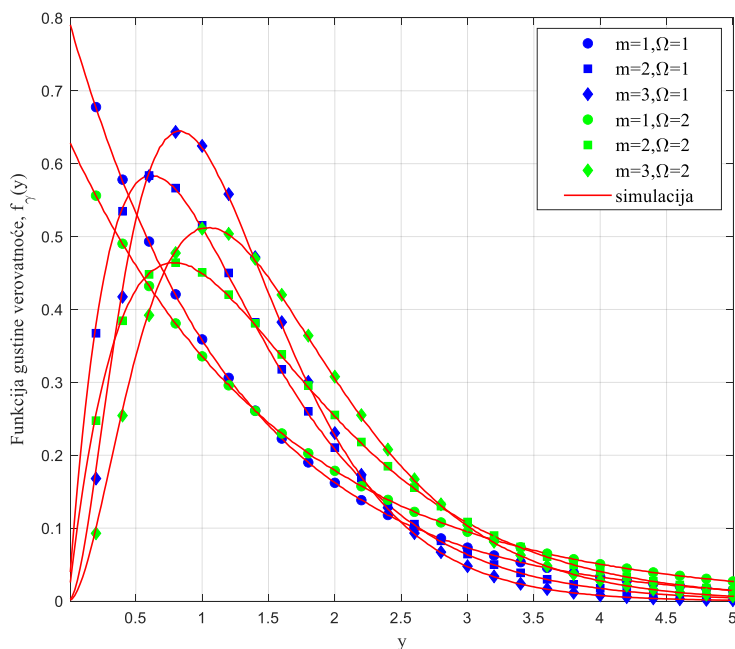
Funkcija gustine verovatnoće slučajne promenljive γ , pri čemu je γ pojačanje snage kanala sa Gama raspodelom, $\gamma = z^2$ je data sa

$$f_{\gamma}(y) = \frac{1}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m y^{m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} y\right). \quad (2.37)$$

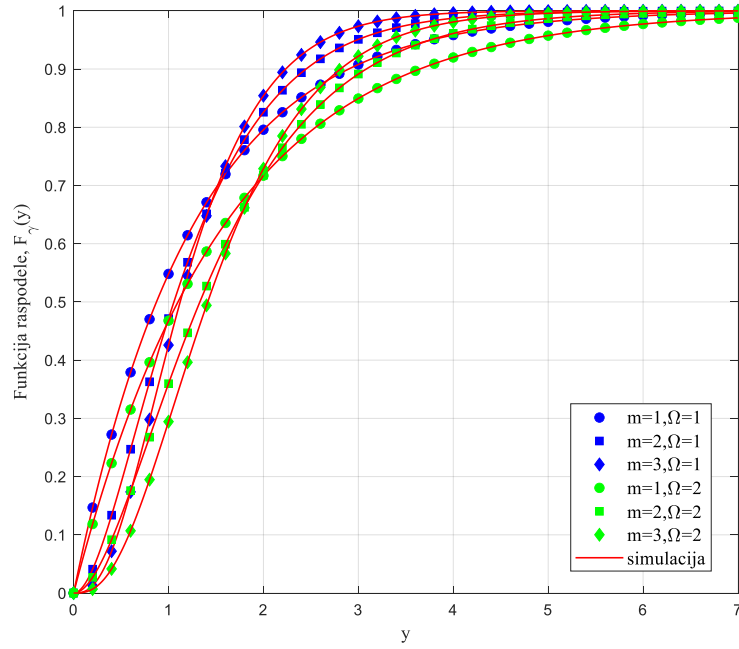
Funkcija raspodele slučajne promenljive γ se može prikazati u sledećem obliku

$$F_{\gamma}(y) = 1 - \frac{\Gamma\left(m, \frac{m}{\Omega} y\right)}{\Gamma(m)}. \quad (2.38)$$

Na slici 2.11. je prikazana vrednost funkcije gustine verovatnoće slučajne promenljive γ za različite vrednosti parametara Ω i m , dok je na slici 2.12. prikazana vrednost funkcije raspodele slučajne promenljive γ za različite vrednosti parametara Ω i m . Dobijeni analitički rezultati su potvrđeni rezultatima dobijenim primenom nezavisnog simulacionog modela.



Slika 2.11. – Funkcija gustine verovatnoće trenutnog pojačanja snage u kanalu do prijemnika.



Slika 2.12. – Funkcija raspodele trenutnog pojačanja snage u kanalu do prijemnika.

Funkcija raspodele slučajne promenljive γ , u slučaju kada je parametar m celobrojan može se predstaviti u obliku

$$F_{\gamma}(y) = 1 - \sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^k y^k \exp\left(-\frac{m}{\Omega}y\right). \quad (2.39)$$

Nakagami- m model obuhvata širok spektar scenarija propagacije, sa Rejljevim i Rajsovim modelima kao posebnim slučajevima. Kada je parametar fedinga jednak $m=1$, Nakagami- m se svodi na Rejljevu raspodelu i tada se raspodela anvelope u kanalu može predstaviti u obliku

$$f_z(z) = \frac{2}{\Omega} z \exp\left(-\frac{1}{\Omega}z^2\right), \quad z \geq 0, \quad (2.40)$$

dok je funkcija raspodele anvelope predstavljena izrazom

$$F_z(y) = \int_0^y f_z(z) dz = 1 - \Gamma\left(1, \frac{1}{\Omega}y^2\right), \quad y \geq 0. \quad (2.41)$$

Funkcija gustine verovatnoće i funkcija raspodele pojačanja snage u kanalu su opisane sledećim jednačinama

$$f_{\gamma}(y) = \frac{1}{\Omega} \exp\left(-\frac{y}{\Omega}\right), \quad (2.42)$$

$$F_{\gamma}(y) = 1 - \exp\left(-\frac{y}{\Omega}\right). \quad (2.43)$$

U slučaju kada propagacija ima jaku komponentu direktne optičke vidljivosti [124], parametar m ima veće vrednosti. Odnos snaga između komponente direktne optičke vidljivosti i rasejanih komponenti, k , i snaga rasejanih talasa predstavljaju Rajsove parametre i njihova veza sa Nakagami- m parametrima m i Ω može se izraziti relacijama $m = \frac{1+k^2}{2k+1}$ i $\sigma^2 = \frac{\Omega}{2} \left(1 - \sqrt{1-m^{-1}}\right)$.

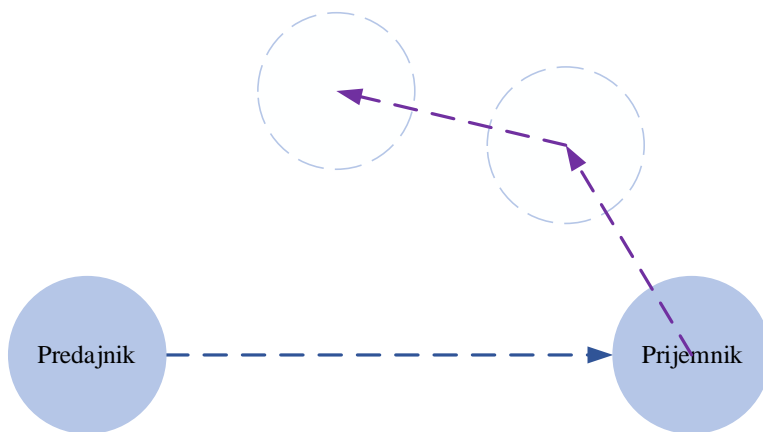
2.4.2 Nakagami- m model kanala sa mobilnim korisnikom

Prijemnik se najčešće ne nalazi na fiksnoj lokaciji, već je u pokretu što za posledicu ima promenljivost rastojanja između predajnika i prijemnika i promenljivu vrednost propagacionog slabljenja. Kako bi se prilikom analize performansi sistema uzela u obzir mobilnost prijemnika, od interesa je definisati odgovarajući obrazac kretanja. Realan obrazac kretanja korisnika je u praksi veoma teško definisati, pa se kretanje korisnika modeluje korišćenjem modela mobilnosti, pri čemu je najzastupljeniji model za modelovanje kretanja model mobilnosti slučajnih tačaka. Ovaj model se može koristiti za modelovanje putanja u tri različite mrežne topologije ili dimenzije. Na slici 2.13. je prikazana šema modela u kome se prijemnik kreće.

Kako je rastojanje između predajnika koji ima fiksnu lokaciju i mobilnog prijemnika promenljivo, ono se može predstaviti slučajnom promenljivom r . PDF slučajne promenljive r se može predstaviti sa [85]

$$f_r(r) = \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{D^{\beta_i+1}} r^{\beta_i}, \quad (2.44)$$

gde su koeficijenti B_i i β_i , $i=1, 2, 3$, koji odgovaraju različitim topologijama kretanja prijemnika u jednoj, dve ili tri dimenzije, dati u tabeli 2.1 [81], dok D predstavlja maksimalno rastojanje između predajnika i prijemnika.



Slika 2.13. – Model sistema sa mobilnim prijemnikom.

Tabela 2.1. – Koeficijenti modela različitih topologija kretanja.

Dimenzija	n	B_l	β_l
1	2	[6,-6]	[1,2]
2	3	(1/73)[324,-420,96]	[1,3,5]
3	3	(1/72)[735,-1190,455]	[2,4,6]

Anvelopa fedinga u kanalu između predajnika i mobilnog prijemnika prati Nakagami- m raspodelu. Uzimajući u obzir kretanje prijemnika i promenljivo rastojanje r između predajnika i prijemnika, PDF slučajne promenljive γ , koja predstavlja trenutno pojačanje snage u kanalu dobija se kao [72, jednačina (7)]

$$f_\gamma(x) = \frac{1}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{m-1} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m\delta + \beta_i + 1} {}_1F_1\left(m + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, 1 + m + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, -\frac{mx}{\Omega}\right), \quad (2.45)$$

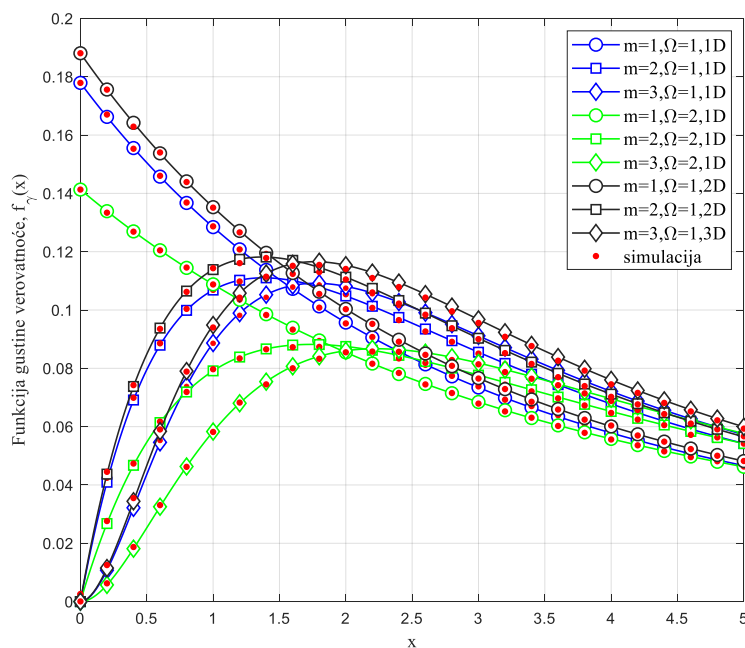
gde je ${}_1F_1(\cdot)$ Kumerova hipergeometrijska funkcija [123, jednačina (13.1.2)].

Funkcija raspodele slučajne promenljive γ je data sa

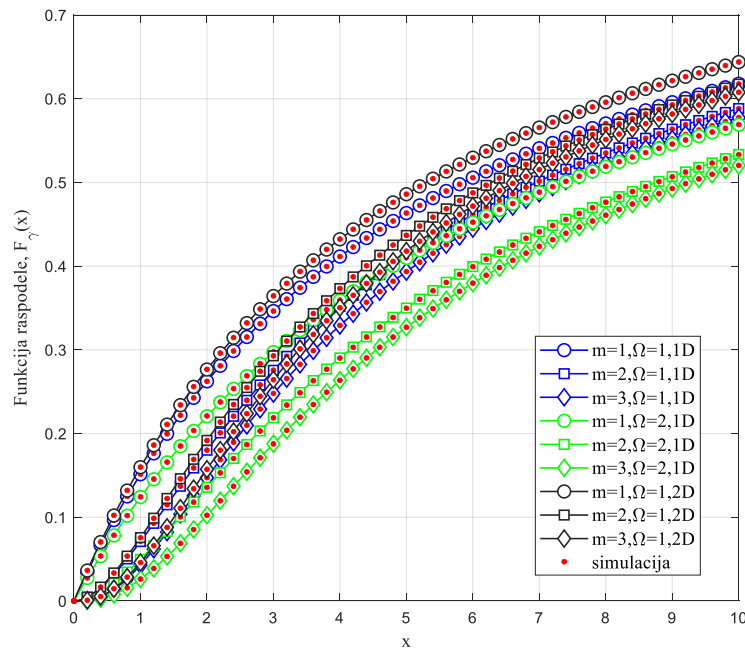
$$F_\gamma(x) = \frac{1}{\Gamma(m)} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{\beta_i + 1} \left[\gamma\left(m, \frac{m}{\Omega}x\right) - \left(\frac{m}{\Omega}x\right)^{-\left(\frac{\beta_i + 1}{\delta}\right)} \gamma\left(m + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, \frac{m}{\Omega}x\right) \right], \quad (2.46)$$

gde je $\gamma(\cdot, \cdot)$ donja nekompletna Gama funkcija [123, jednačina (6.5.2)].

Na slici 2.14. je prikazana funkcija gustine verovatnoće slučajne promenljive γ za različite vrednosti parametara Ω i m , kao i za različite topologije kretanja. Na slici 2.15. je prikazana funkcija raspodele slučajne promenljive γ za različite vrednosti parametara Ω i m , kao i za različite topologije kretanja. Dobijeni analitički rezultati su potvrđeni nezavisnom simulacijom.



Slika 2.14. – Funkcija gustine verovatnoće trenutnog pojačanja snage u kanalu do mobilnog prijemnika.



Slika 2.15. – Funkcija raspodele trenutnog pojačanja snage u kanalu do mobilnog prijemnika.

Numerički rezultati u ovoj disertaciji su dobijeni primenom izvedenih analitičkih izraza u zatvorenom obliku i potvrđeni nezavisnom metodom simulacije. Rezultati simulacije su dobijeni primenom Monte Karlo metode, zasnovane na sekvencama talasnih oblika sa $L = 10^7$ uzoraka. S obzirom na to da procenjene vrednosti verovatnoće otkaza za različite ulazne parametre nisu niže od 10^{-4} za bilo koji skup parametara sistema i kanala, dobijene procene se mogu smatrati tačnim sa visokim nivoom pouzdanosti [125].

Pojačanja kanala su predstavljena kao međusobno nezavisni slučajni procesi sa Nakagami- m raspodelom. Srednja pojačanja kanala od grupe primarnih korisnika u istom klasteru do čvora u sekundarnoj mreži imaju istu vrednost, tj. odgovarajuće slučajne promenljive su nezavisne, ali identično raspoređene. Sekvence talasa se generišu za sve koeficijente kanala korišćenjem poboljšanog Džejkovog (*Jakes*) simulatora fedinga [126], sa $M_0 = 20$ oscilatora i maksimalnom Doplerovom frekvencijom $f_{D,\max} = 20$ Hz. Doplerova frekvencija ne utiče na rezultate simulacije, pošto vremenske karakteristike fedinga u kanalu za performanse koje se analiziraju nisu relevantne kada je poznata statistička informacija o stanju u kanalu.

U okviru disertacije razmatrani su scenariji koji obuhvataju različite vrednosti parametara sistema i kanala. Imajući u vidu da se u disertaciji teorijski analiziraju mogućnosti kooperativnih kognitivnih sistema, korišćeni parametri uzimaju širok opseg vrednosti u cilju procene performansi predloženih sistema u različitim scenarijima.

3. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa bežičnim prenosom energije i statističkom informacijom o stanju u kanalu sa fiksnim položajem prijemnika

U okviru ove glave predstavljena je analiza performansi kooperativnih kognitivnih sistema sa bežičnim prenosom energije u kojima se prikupljanje energije može vršiti od namenskog RF izvora energije ili od postojećih RF izvora energije iz okruženja. Sekundarni korisnici vrše prenos signala istovremeno sa primarnim korisnicima spektra, tj. u istom spektralnom opsegu. Uslov korišćenja spektralnih resursa primarnog korisnika je da interferencija koja se stvara na primarnom prijemniku zadovoljava definisane uslove. Sekundarnoj mreži je dostupna statistička informacija o stanju u kanalu i poznate su samo srednje vrednosti pojačanja snage kanala. Kako u ovom slučaju strogo ograničenje snage interferencije na mestu primarnog prijemnika ne može biti zadovoljeno, sekundarni korisnici koriste spektralne resurse primarnih korisnika, pri čemu interferencija koja se izaziva na primarnom prijemniku sme da prelazi definisani prag samo u određenom unapred definisanom procentu vremena. Maksimalna snaga sekundarnog predajnika određena je ograničenjima interferencije koje definiše primarni korisnik spektra. Performanse sistema su analizirane za scenario u kojem korisnici primarne i sekundarne mreže imaju fiksne pozicije.

3.1 Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije

U okviru ovog odeljka analizira se scenario u kojem se sekundarna mreža sastoji od sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, pri čemu sekundarni predajnik nema sopstveno napajanje, već prikuplja energiju iz namenskog RF izvora za napajanje (prikazan na slici 2.6.), pri čemu je analiziran slučaj kada su prenos informacija i energije uređeni u skladu sa TS protokolom.

Anvelope fedinga u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika, h_{pBSTx} , i u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, h_{STxSRx} , prate Nakagami- m raspodelu, pa odgovarajuća pojačanja snage prate Gama raspodelu [75]. Shodno tome, funkcija gustine verovatnoće trenutnog pojačanja snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika može se predstaviti u sledećem obliku

$$f_{\gamma_1}(x) = \frac{1}{\Gamma(m_1)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^{m_1} x^{m_1-1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} x\right), \quad (3.1)$$

gde Ω_1 i m_1 označavaju Nakagami- m parametre fedinga u kanalu od namenskog izvora za napajanje do sekundarnog predajnika, pri čemu je $\gamma_1 = |h_{PBSTx}|^2$ i $\Omega_1 = E[|h_{PBSTx}|^2]$.

Analogno, funkcija gustine verovatnoće trenutnog pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijmnika se može predstaviti izrazom

$$f_{\gamma_2}(x) = \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_2}{\Omega_2} \right)^{m_2} x^{m_2-1} \exp\left(-\frac{m_2}{\Omega_2} x\right), \quad (3.2)$$

gde Ω_2 i m_2 označavaju Nakagami- m parametre fedinga u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijmnika, pri čemu je $\gamma_2 = |h_{STxSRx}|^2 D_{STxSRx}^{-\delta}$ i $\Omega_2 = E[|h_{STxSRx}|^2 D_{STxSRx}^{-\delta}]$.

3.1.1 Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije

U sistemu sa namenskim izvorom energije, trenutni odnos signal/šum na sekundarnom prijmniku predstavljen je jednačinom (2.12), pa se može zapisati i u sledećem obliku

$$\gamma_{SRx} = \begin{cases} \gamma_{K_1} \gamma_1, & \gamma_1 \leq Q, \\ \gamma_{K_2}, & \gamma_1 > Q, \end{cases} \quad (3.3)$$

gde je $\gamma_{K_1} = K_1 \gamma_2$, $\gamma_{K_2} = K_2 \gamma_2$, $K_1 = \frac{\eta \alpha P_{PB}}{\sigma_{SRx}^2 (1-\alpha) D_{PBSTx}^\delta}$, $K_2 = k_{STx} \frac{Q_p}{\sigma_{SRx}^2 \Lambda_{STx}}$ i $Q = k_{STx} \frac{Q_p}{\Lambda_{STx} K_1}$.

Funkcije gustine verovatnoće slučajnih promenljivih γ_{K_i} , $i = 1, 2$, mogu se odrediti na osnovu

$f_{\gamma_{K_i}}(x) = \frac{1}{K_i} f_{\gamma_i}\left(\frac{x}{K_i}\right)$ [127, jednačina (5-7)], pa imaju konačan oblik

$$f_{\gamma_{K_i}}(x) = \frac{1}{K_i^{m_2}} \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_2}{\Omega_2} \right)^{m_2} x^{m_2-1} \exp\left(-\frac{m_2}{K_i \Omega_2} x\right). \quad (3.4)$$

Kako je emisiona snaga sekundarnog predajnika ograničena uslovima interferencije na mestu primarnog prijmnika i maksimalnom raspoloživom snagom signala definisanim jednačinom (2.11), funkcija gustine verovatnoće odnosa signal/šum na sekundarnom prijmniku može se izvesti koristeći sledeći izraz

$$f_{\gamma_{SRx}}(u) = \int_0^Q f_{u,w}(u, w) dw + \int_Q^\infty f_{\gamma_{K_2}, \gamma_1}(u, w) dw, \quad (3.5)$$

gde je $f_{u,w}(u, w)$ združena funkcija gustine verovatnoće promenljivih $u = \gamma_{K_1} \gamma_1$ i $w = \gamma_1$, dok je $f_{\gamma_{K_2}, \gamma_1}(u, w)$ združena funkcija gustine verovatnoće promenljivih γ_{K_2} i γ_1 .

Združena funkcija gustine verovatnoće promenljivih $u = \gamma_{K_1} \gamma_1$ i $w = \gamma_1$ može se dobiti korišćenjem Jakobijanove (*Carl Gustav Jacob Jacobi*) transformacije

$f_{u,w}(u, w) = |J| f_{\gamma_{K_1}}\left(\frac{u}{w}\right) f_{\gamma_1}(w)$, gde je $|J| = 1/w$. Sa druge strane, združena funkcija gustine

verovatnoće statistički nezavisnih slučajnih promenljivih γ_{K_2} i γ_1 se može dobiti primenom izraza $f_{\gamma_{K_2}, \gamma_1}(u, w) = f_{\gamma_{K_2}}(u) \cdot f_{\gamma_1}(w)$. Zamenom odgovarajućih združenih funkcija gustine verovatnoće u jednačinu (3.5), izraz za funkciju gustine verovatnoće odnosa signal/šum na sekundarnom prijemu postaje

$$f_{\gamma_{SRx}}(u) = \int_0^Q |J| f_{\gamma_{K_1}}\left(\frac{u}{w}\right) f_{\gamma_1}(w) dw + \int_Q^\infty f_{\gamma_{K_2}}(u) \cdot f_{\gamma_1}(w) dw. \quad (3.6)$$

Zamenom jednačina (3.1) i (3.4) u (3.6), dobija se sledeći izraz za funkciju gustine verovatnoće

$$f_{\gamma_{SRx}}(u) = \frac{1}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} \frac{u^{m_2-1}}{K_1^{m_2}} I_1 + \frac{1}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} \frac{u^{m_2-1}}{K_2^{m_2}} \exp\left(-\frac{m_2 u}{K_2 \Omega_2}\right) I_2, \quad (3.7)$$

gde su odgovarajući integrali

$$I_1 = \int_0^Q \exp\left(-\frac{m_2 u}{K_1 \Omega_2 w}\right) w^{m_1-m_2-1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} w\right) dw \quad (3.8)$$

i

$$I_2 = \int_Q^\infty w^{m_1-1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} w\right) dw. \quad (3.9)$$

Pri rešavanju integrala I_1 koristi se transformacija elementarne funkcije u Mejerovu (*Cornelis Simon Meijer*) funkciju, pa se primenom [128, (01.03.26.0004.01)] i transformacijom [128, (07.34.17.0012.01)] dobija

$$\exp\left(-\frac{m_2 u}{K_1 \Omega_2 w}\right) = G_{0,1}^{1,0} \left(\frac{m_2 u}{w K_1 \Omega_2} \middle| 0 \right) = G_{1,0}^{0,1} \left(\frac{w K_1 \Omega_2}{m_2 u} \middle| 1 \right). \quad (3.10)$$

Dalje, primenom jednakosti [129, jednačina (1.211)] integral I_1 postaje

$$I_1 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^k \int_0^Q G_{1,0}^{0,1} \left(\frac{w K_1 \Omega_2}{m_2 u} \middle| 1 \right) w^{m_1-m_2+k-1} dw. \quad (3.11)$$

Korišćenjem izraza [128, (07.34.21.0084.01)] dolazi se do sledećeg rešenja integrala I_1 u zatvorenom obliku

$$I_1 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^k Q^{m_1-m_2+k} G_{2,1}^{0,2} \left(\frac{K_1 \Omega_2 Q}{m_2 u} \middle| \begin{matrix} 1-m_1+m_2-k, 1 \\ -m_1+m_2-k \end{matrix} \right). \quad (3.12)$$

Rešenje integrala I_2 dobija se uvođenjem smene $x = \frac{m_1}{\Omega_1} w$ i primenom [129, jednačina (8.350.2)] nakon čega se dobija sledeći izraz u zatvorenom obliku

$$I_2 = \left(\frac{\Omega_1}{m_1} \right) \Gamma \left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q \right). \quad (3.13)$$

Zamenom prethodnih izraza (3.12) i (3.13) u (3.7) dobija se konačan izraz za funkciju gustine verovatnoće trenutnog odnosa signal/šum na sekundarnom prijemniku

$$f_{\gamma_{SRx}}(u) = C \frac{u^{m_2-1}}{K_1^{m_2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^k Q^{m_1-m_2+k} G_{2,1}^{0,2} \left(\frac{K_1 \Omega_2 Q}{m_2 u} \middle| \begin{matrix} 1-m_1+m_2-k, 1 \\ -m_1+m_2-k \end{matrix} \right) \\ + C \frac{u^{m_2-1}}{K_2^{m_2}} \exp \left(-\frac{m_2 u}{K_2 \Omega_2} \right) \left(\frac{\Omega_1}{m_1} \right)^{m_1} \Gamma \left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q \right), \quad (3.14)$$

gde je $C = \frac{1}{\Gamma(m_1)} \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^{m_1} \left(\frac{m_2}{\Omega_2} \right)^{m_2}$.

Na osnovu prethodno izvedenog izraza za funkciju gustine verovatnoće, funkcija raspodele se može odrediti na sledeći način

$$F_{\gamma_{SRx}}(\gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_{SRx}}(u) du = C \frac{1}{K_1^{m_2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^k Q^{m_1-m_2+k} I_3 + C \frac{1}{K_2^{m_2}} \left(\frac{\Omega_1}{m_1} \right)^{m_1} \Gamma \left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q \right) I_4, \quad (3.15)$$

gde su odgovarajući integrali

$$I_3 = \int_0^{\gamma_{th}} u^{m_2-1} G_{2,1}^{0,2} \left(\frac{K_1 \Omega_2 Q}{m_2 u} \middle| \begin{matrix} 1-m_1+m_2-k, 1 \\ -m_1+m_2-k \end{matrix} \right) du \quad (3.16)$$

i

$$I_4 = \int_0^{\gamma_{th}} u^{m_2-1} \exp \left(-\frac{m_2 u}{K_2 \Omega_2} \right) du. \quad (3.17)$$

Integral I_3 se rešava korišćenjem izraza [128, (07.34.21.0084.01)], nakon čega se dobija

$$I_3 = \gamma_{th}^{m_2} G_{2,3}^{2,1} \left(\frac{m_2 \gamma_{th}}{K_1 \Omega_2 Q} \middle| \begin{matrix} 1-m_2, 1+m_1-m_2+k \\ m_1-m_2+k, 0, -m_2 \end{matrix} \right). \quad (3.18)$$

Integral I_4 se rešava korišćenjem transformacije [128, (01.03.26.0004.01)] i izraza [128, (07.34.21.0084.01)], pa je konačno rešenje u zatvorenom obliku

$$I_4 = \gamma_{th}^{m_2} G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_2 \gamma_{th}}{K_2 \Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1-m_2 \\ 0, -m_2 \end{matrix} \right). \quad (3.19)$$

Zamenom jednačina (3.18) i (3.19) u jednačinu (3.15) dobija se konačan izraz za funkciju raspodele odnosa signal/šum na mestu sekundarnog prijemnika, koji predstavlja i verovatnoću otkaza $P_{OUT}(\gamma_{th})$ sekundarnog sistema

$$F_{\gamma_{SRx}}(\gamma_{th}) = C \frac{1}{K_1^{m_2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^k Q^{m_1-m_2+k} \gamma_{th}^{m_2} G_{2,3}^{2,1} \left(\frac{m_2 \gamma_{th}}{K_1 \Omega_2 Q} \middle| \begin{matrix} 1-m_2, 1+m_1-m_2+k \\ m_1-m_2+k, 0, -m_2 \end{matrix} \right) \quad (3.20)$$

$$+ C \frac{1}{K_2^{m_2}} \left(\frac{\Omega_1}{m_1} \right)^{m_1} \Gamma \left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q \right) \gamma_{th}^{m_2} G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_2 \gamma_{th}}{K_2 \Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1-m_2 \\ 0, -m_2 \end{matrix} \right).$$

Na osnovu prethodno izvedenog izraza u zatvorenom obliku za verovatnoću otkaza, može se odrediti i kapacitet otkaza sekundarnog sistema. Kapacitet otkaza predstavlja značajnu meru performansi sekundarnog sistema u sistemima koji su osetljivi na kašnjenje i može se izračunati primenom jednačine [130]

$$C_{OUT} = (1 - P_{OUT}(\gamma_{th})) \log_2(1 + \gamma_{th}). \quad (3.21)$$

Kako se u opisanom konceptu u okviru svakog intervala trajanja T , deo intervala trajanja αT ($0 < \alpha < 1$) koristi za prenos energije, dok se deo intervala trajanja $(1-\alpha)T$ koristi za prenos informacija, na osnovu izraza za kapacitet otkaza može se odrediti maksimalan ostvarivi protok, zasnovan na kapacitetu otkaza, koji je jednak [68]

$$T_{OUT} = (1 - \alpha) C_{OUT}. \quad (3.22)$$

Na osnovu izraza za funkciju gustine verovatnoće prijemnog odnosa snage signala i šuma na sekundarnom prijemniku može se analizirati i ergodični kapacitet sekundarnog linka, koji predstavlja značajnu metriku performansi sistema koji nisu osetljivi na kašnjenje [131]. Ergodični kapacitet predstavlja maksimalnu srednju brzinu prenosa koja se može postići sa proizvoljno malom verovatnoćom greške [130] i može se izračunati na sledeći način

$$C_{erg} = \int_0^{\infty} \log_2(1+u) f_{\gamma}(u) du = \frac{1}{\ln 2} \int_0^{\infty} \ln(1+u) f_{\gamma}(u) du, \quad (3.23)$$

pa se dalje može odrediti vrednost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu

$$T_{erg} = (1 - \alpha) C_{erg}. \quad (3.24)$$

Rešavanje jednačine (3.23) počinje transformacijom [128, (01.04.26.0003.01)]

$$\ln(1+u) = G_{2,2}^{1,2} \left(u \middle| \begin{matrix} 1,1 \\ 1,0 \end{matrix} \right). \quad (3.25)$$

Dalje je ergodični kapacitet jednak

$$C_{erg} = \frac{1}{\ln 2} \frac{C}{K_1^{m_2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^k Q^{m_1-m_2+k} \int_0^{\infty} u^{m_2-1} G_{2,2}^{1,2} \left(u \middle| \begin{matrix} 1,1 \\ 1,0 \end{matrix} \right) G_{1,2}^{2,0} \left(\frac{m_2 u}{K_1 \Omega_2 Q} \middle| \begin{matrix} 1+m_1-m_2+k \\ m_1-m_2+k, 0 \end{matrix} \right) du \quad (3.26)$$

$$+ \frac{1}{\ln 2} \frac{C}{K_2^{m_2}} \left(\frac{\Omega_1}{m_1} \right)^{m_1} \Gamma \left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q \right) \int_0^{\infty} u^{m_2-1} G_{2,2}^{1,2} \left(u \middle| \begin{matrix} 1,1 \\ 1,0 \end{matrix} \right) G_{0,1}^{1,0} \left(\frac{m_2 u}{K_2 \Omega_2} \middle| \right) du.$$

Korišćenjem [128, (07.34.21.0011.01)] dobija se konačni izraz za ergodični kapacitet

$$C_{erg} = \frac{1}{\ln 2} \frac{C}{K_1^{m_2}} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^k Q^{m_1 - m_2 + k} G_{3,4}^{4,1} \left(\frac{m_2}{K_1 \Omega_2 Q} \middle| \begin{matrix} -m_2, 1 - m_2, 1 + m_1 - m_2 + k \\ m_1 - m_2 + k, 0, -m_2, -m_2 \end{matrix} \right) \quad (3.27)$$

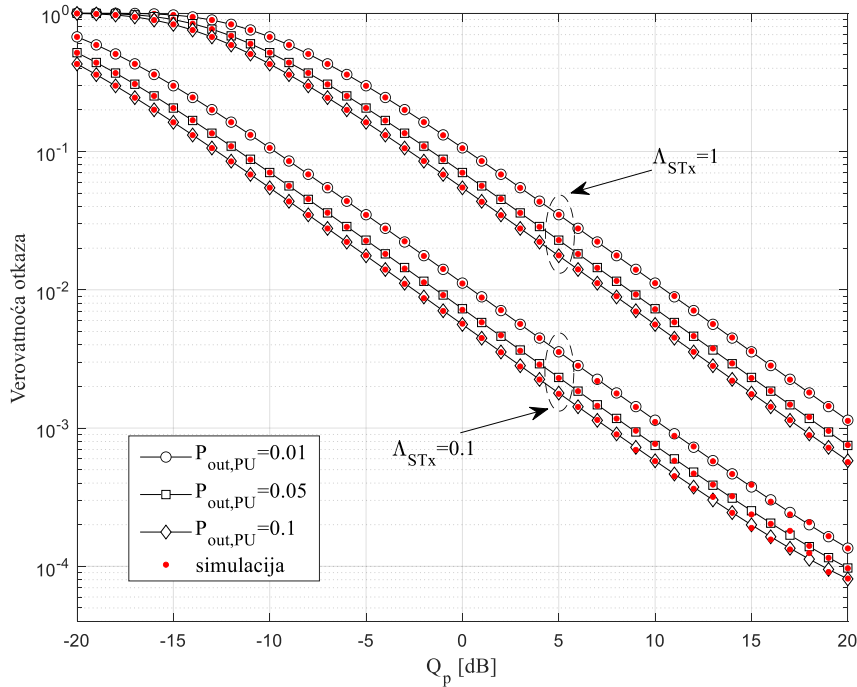
$$+ \frac{1}{\ln 2} \frac{C}{K_2^{m_2}} \left(\frac{\Omega_1}{m_1} \right)^{m_1} \Gamma \left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q \right) G_{2,3}^{3,1} \left(\frac{m_2}{K_2 \Omega_2} \middle| \begin{matrix} -m_2, 1 - m_2 \\ 0, -m_2, -m_2 \end{matrix} \right).$$

U nastavku su predstavljeni rezultati analize performansi sistema dobijeni za različite parametre sistema i kanala. Na slici 3.1. prikazana je verovatnoća otkaza, dok su na slikama 3.2.–3.3. predstavljene vrednosti ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu. Parametri koji su korišćeni u simulacijama za sve razmatrane scenarije dati su u tabeli 3.1. Svi rezultati dobijeni primenom analitičke metode i izvedenih izraza u zatvorenom obliku, potvrđeni su primenom nezavisnog razvijenog simulacionog modela.

Tabela 3.1. Parametri simulacije kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije.

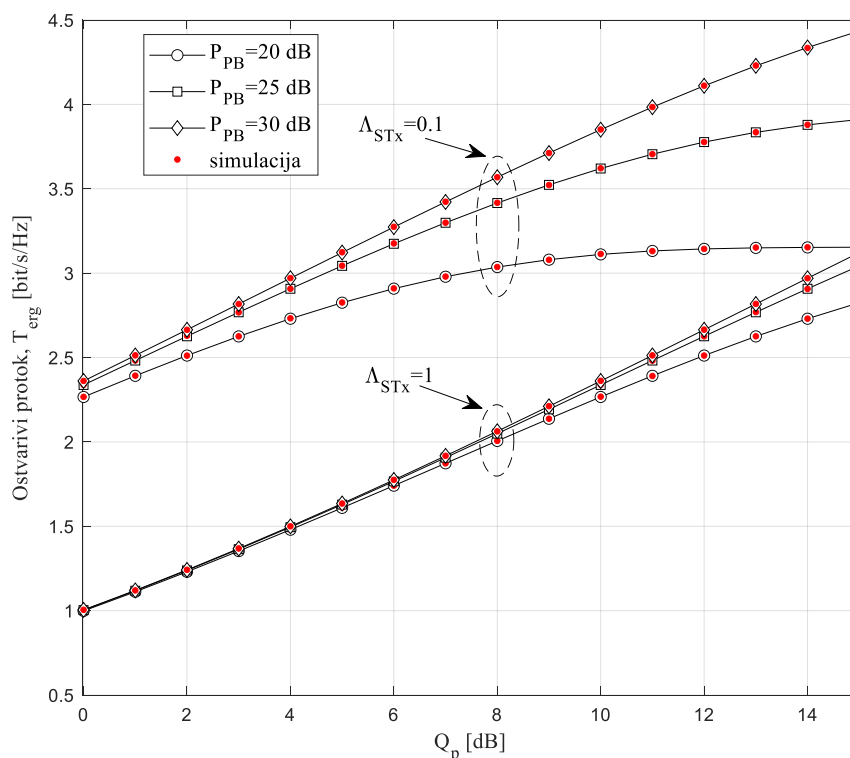
Parametar	Slika 3.1.	Slika 3.2.	Slika 3.3.
$P_{out,PU}$	0.01–0.1	0.05	0.05
$D_{PBSTx}[m]$	1	10	10
$D_{STxSRx}[m]$	5	5	5
$Q_p[dB]$	-20÷20	-20÷15	15
$P_{PB}[dB]$	20	20–30	20
$\Omega_1[dB]$	20	20	20–30
$\Omega_2[dB]$	30	30	20–30
Λ_{STx}	0.1–1	0.1–1	1
η	0.9	0.9	0.9
α	0.5	0.5	0.1–0.99
m_1	1	1	1
m_2	1	1	1
$\gamma_{th} [dB]$	-5	/	/

Zavisnost verovatnoće otkaza od praga interferencije Q_p prikazana je na slici 3.1. Razmatrani su scenariji sa različitim vrednostima verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$ i srednjeg pojačanja snage kanala Λ_{STx} od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika. Povećanjem praga interferencije Q_p dozvoljena je veća emisiona snaga sekundarnog predajnika, pa se povećava prijemni odnos signal/šum i smanjuje verovatnoća otkaza sekundarnog sistema. Verovatnoća otkaza je manja za manje vrednosti Λ_{STx} jer je u tom slučaju veća dozvoljena snaga sekundarnog predajnika. Za veće dozvoljene vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$, verovatnoća otkaza kognitivne mreže je manja, jer je sa većom maksimalno dozvoljenom vrednošću verovatnoće otkaza (kada je prag interferencije Q_p fiksiran) dozvoljena veća predajna snaga na sekundarnom predajniku, pa je odnos prijemnog signala i šuma na sekundarnom prijemniku veći.



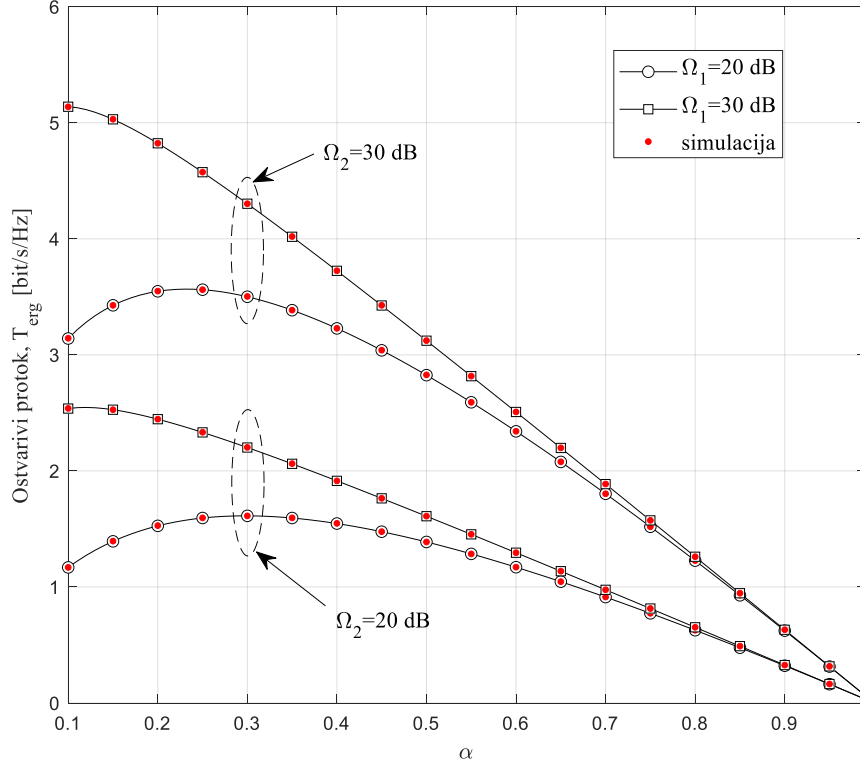
Slika 3.1. – Verovatnoća otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p za različite vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$.

Na slici 3.2. je prikazan ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji praga interferencije Q_p . Analizirani su scenariji u kojima se menja vrednost predajne snage namenskog izvora energije P_{PB} , kao i vrednost srednjeg pojačanja snage u kanalu od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika Λ_{STx} . Ostvarivi protok raste sa povećanjem praga interferencije Q_p . Za niže vrednosti praga interferencije Q_p , kada je srednja vrednost pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika $\Lambda_{STx} = 1$, ostvarivi protok ne zavisi od vrednosti snage namenskog izvora energije P_{PB} , jer je uslov ograničenja emisije snage sekundarnog predajnika dominantan u odnosu na uslov ograničene količine prikupljene energije na sekundarnom predajniku. Veće vrednosti ostvarivog protoka se dobijaju kada je srednja vrednost pojačanja snage u kanalu od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika manja, jer su u tom slučaju veće vrednosti maksimalne dozvoljene snage koje definiše primarna mreža. Veća vrednost predajne snage namenskog izvora energije P_{PB} doprinosi većoj vrednosti sakupljene energije, pa je na raspolaganju veća snaga na sekundarnom predajniku, što rezultira boljim performansama sekundarnog linka. Za veće vrednosti praga interferencije Q_p , kada je srednja vrednost pojačanja snage u kanalu od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika manja, ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu ulazi u zasićenje, jer je snaga sekundarnog predajnika ograničena dominantnim uslovom količine prikupljene energije.



Slika 3.2. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji praga interferencije Q_p , za različite vrednosti snage namenskog izvora energije P_{PB} .

Zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α prikazana je na slici 3.3. Ostvarivi protok je analiziran za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika Ω_1 , kao i od srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika Ω_2 . Za veće vrednosti pojačanja snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika Ω_1 dobijaju se bolje performanse sistema, jer se u tom slučaju više energije prikupi na sekundarnom predajniku, što rezultuje većom predajnom snagom sekundarnog predajnika. Na osnovu rezultata se može uočiti da se za veće pojačanje snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika Ω_2 mogu postići veće vrednosti ostvarivog protoka. Kada je pojačanje snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika $\Omega_1 = 20$ dB, ostvarivi protok za manje vrednosti koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije raste, potom dostiže svoj maksimum nakon čega počinje da opada. Pri tome je moguće odrediti optimalnu vrednost koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije kada je ostvarivi protok maksimalan. Za veće vrednosti koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije, vrednost ostvarivog protoka u svim posmatranim slučajevima ima bliske vrednosti, jer je maksimalna snaga dominantno određena ograničenjem kognitivne mreže.



Slika 3.3. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α .

3.1.2 Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije kada je zanemarljivo ograničenje kognitivne mreže

U slučaju kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo, maksimalna raspoloživa emisiona snaga sekundarnog predajnika zavisi isključivo od prikupljene energije i vremena tokom kojeg se vrši prenos signala, pa se izraz za trenutni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku pojednostavljuje na

$$\gamma_{SRx} = \frac{P_{STx,EH} |h_{STxSRx}|^2}{D_{STxSRx}^\delta \sigma_{SRx}^2} = K_1 |h_{PBSTx}|^2 \frac{|h_{STxSRx}|^2}{D_{STxSRx}^\delta}, \quad (3.28)$$

odnosno može se predstaviti u obliku

$$\gamma_{SRx} = \gamma_{K_1} \gamma_1, \quad (3.29)$$

gde je $\gamma_{K_1} = K_1 \gamma_2$ i $K_1 = \frac{\eta \alpha P_{PB}}{\sigma_{SRx}^2 (1-\alpha) D_{PBSTx}^\delta}$.

Funkcija gustine verovatnoće slučajne promenljive γ_{SRx} je data sa

$$f_{\gamma_{SRx}}(u) = \int_0^\infty f_{u,w}(u, w) dw. \quad (3.30)$$

Združena funkcija gustine verovatnoće iz prethodne jednačine može se odrediti primenom Jakobijanove transformacije opisane u odeljku 3.1.1, nakon čega se dobija funkcija gustine verovatnoće trenutnog odnosa signal/šum na sekundarnom prijemniku

$$f_{\gamma_{SRx}}(u) = \int_0^{\infty} |J| f_{\gamma_{K_1}}\left(\frac{u}{w}\right) f_{\gamma_1}(w) dw. \quad (3.31)$$

Koristeći jednačine (3.1) i (3.4) u (3.31), dobija se sledeći izraz

$$f_{\gamma_{SRx}}(u) = \frac{1}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} \frac{u^{m_2-1}}{K_1^{m_2}} I_1, \quad (3.32)$$

gde je integral I_1 jednak

$$I_1 = \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{m_2 u}{K_1 \Omega_2 w}\right) w^{m_1-m_2-1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} w\right) dw. \quad (3.33)$$

Integral I_1 rešava se korišćenjem transformacije elementarne funkcije u Mejerovu funkciju, [128, (01.03.26.0004.01)] i primenom [128, (07.34.17.0012.01)] nakon čega se dobija

$$I_1 = \int_0^{\infty} G_{1,0}^{0,1} \left(\frac{w K_1 \Omega_2}{m_2 u} \middle| \begin{matrix} 1 \\ - \end{matrix} \right) w^{m_1-m_2-1} G_{0,1}^{1,0} \left(\frac{m_1}{\Omega_1} w \middle| \begin{matrix} - \\ 0 \end{matrix} \right) dw. \quad (3.34)$$

Konačno, primenom izraza [128, (07.34.21.0011.01)] integral I_1 se može zapisati u sledećem obliku

$$I_1 = \left(\frac{K_1 \Omega_2}{m_2 u} \right)^{m_2-m_1} G_{0,2}^{2,0} \left(\frac{m_2 u m_1}{K_1 \Omega_2 \Omega_1} \middle| \begin{matrix} - \\ 0, m_2 - m_1 \end{matrix} \right). \quad (3.35)$$

Zamenom (3.35) u (3.32) izraz za funkciju gustine verovatnoće trenutnog odnosa signal/šum na sekundarnom prijemniku je

$$f_{\gamma_{SRx}}(u) = C \frac{u^{m_2-1}}{K_1^{m_2}} \left(\frac{K_1 \Omega_2}{m_2 u} \right)^{m_2-m_1} G_{0,2}^{2,0} \left(\frac{m_2 u m_1}{K_1 \Omega_2 \Omega_1} \middle| \begin{matrix} - \\ 0, m_2 - m_1 \end{matrix} \right). \quad (3.36)$$

Funkcija raspodele za slučajnu promenljivu γ_{SRx} se može dobiti kao

$$F_{\gamma_{SRx}}(\gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_{SRx}}(u) du = C \frac{1}{K_1^{m_1}} \left(\frac{\Omega_2}{m_2} \right)^{m_2-m_1} I_3, \quad (3.37)$$

gde je integral I_3 definisan na sledeći način

$$I_3 = \int_0^{\gamma_{th}} u^{m_1-1} G_{0,2}^{2,0} \left(\frac{m_2 u m_1}{K_1 \Omega_2 \Omega_1} \middle| \begin{matrix} - \\ 0, m_2 - m_1 \end{matrix} \right) du. \quad (3.38)$$

Korišćenjem izraza [128, (07.34.21.0084.01)] dobija se rešenje integrala I_3 u zatvorenom obliku

$$I_3 = \gamma_{th}^{m_1} G_{1,3}^{2,1} \left(\frac{m_2 m_1 \gamma_{th}}{K_1 \Omega_2 \Omega_1} \middle| \begin{matrix} 1 - m_1 \\ 0, m_2 - m_1, -m_1 \end{matrix} \right). \quad (3.39)$$

Konačno, funkcija raspodele slučajne promenljive γ_{SRx} se može izraziti na sledeći način

$$F_{\gamma_{SRx}}(\gamma_{th}) = C \frac{1}{K_1^{m_1}} \left(\frac{\Omega_2}{m_2} \right)^{m_2 - m_1} \gamma_{th}^{m_1} G_{1,3}^{2,1} \left(\frac{m_2 m_1 \gamma_{th}}{K_1 \Omega_2 \Omega_1} \middle| \begin{matrix} 1 - m_1 \\ 0, m_2 - m_1, -m_1 \end{matrix} \right). \quad (3.40)$$

Primenom jednačina (3.23) i (3.25) može se odrediti ergodični kapacitet sistema

$$C_{erg} = \frac{1}{\ln 2} C \frac{1}{K_1^{m_1}} \left(\frac{\Omega_2}{m_2} \right)^{m_2 - m_1} \int_0^\infty u^{m_1 - 1} G_{0,2}^{2,0} \left(\frac{m_2 u m_1}{K_1 \Omega_2 \Omega_1} \middle| \begin{matrix} 0, m_2 - m_1 \end{matrix} \right) G_{2,2}^{1,2} \left(u \middle| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right) du. \quad (3.41)$$

Rešavanjem integrala iz prethodne jednačine korišćenjem [128, (07.34.21.0011.01)] dobija se konačan izraz u zatvorenom obliku

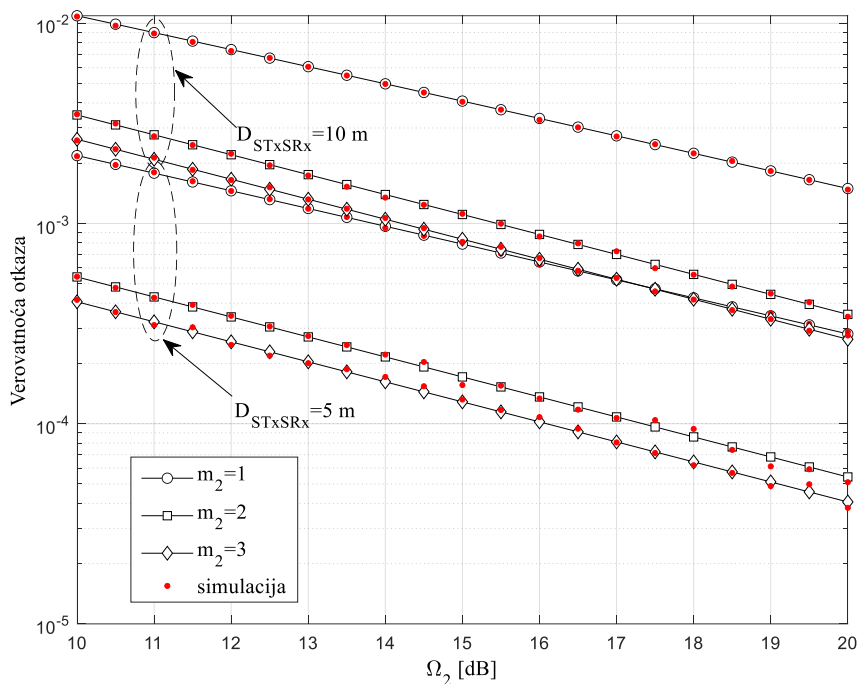
$$C_{erg} = \frac{1}{\ln 2} C \frac{1}{K_1^{m_1}} \left(\frac{\Omega_2}{m_2} \right)^{m_2 - m_1} G_{2,4}^{4,1} \left(\frac{m_2 m_1}{K_1 \Omega_2 \Omega_1} \middle| \begin{matrix} -m_1, 1 - m_1 \\ 0, m_2 - m_1, -m_1, -m_1 \end{matrix} \right). \quad (3.42)$$

U nastavku su predstavljeni numerički rezultati performansi sistema. Na slici 3.4. je prikazana verovatnoća otkaza, dok je na slikama 3.5. i 3.6. prikazan ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu. Na slikama 3.7. i 3.8. je izvršeno poređenje performansi u kooperativnom kognitivnom sistemu sa namenskim izvorom energije kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo, kao i u slučaju kada postoji ograničenje kognitivne mreže. Rezultati simulacije su u skladu sa rezultatima dobijenim analitičkim putem, primenom izvedenih izraza u zatvorenom obliku. U tabeli 3.2. definisani su parametri simulacije korišćeni za sve razmatrane scenarije.

Tabela 3.2. Parametri simulacije kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije kada je zanemarljivo ograničenje kognitivne mreže.

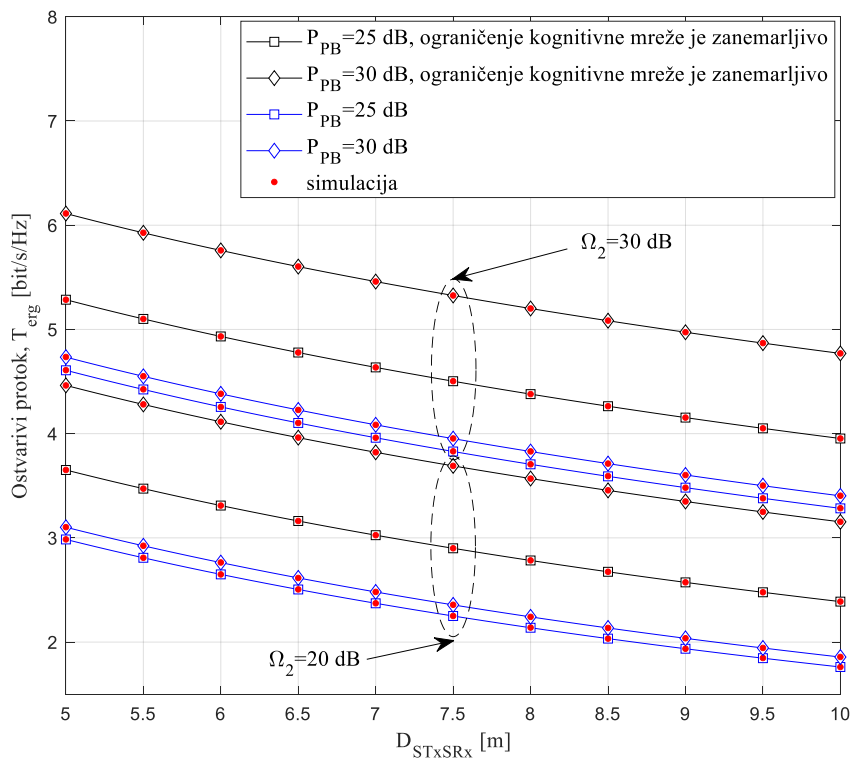
Parametar	Slika 3.4.	Slika 3.5.	Slika 3.6.	Slika 3.7.	Slika 3.8.
D_{PBSTx} [m]	1	5	5-10	1	10
D_{STxSRx} [m]	5-10	5-10	10	10	5-10
P_{PB} [dB]	20	20-30	20	20	20
Ω_1 [dB]	20	20	20	20	20
Ω_2 [dB]	10-30	20-30	20	10-30	30
η	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
α	0.5	0.5	0.1-0.99	0.5	0.5
m_1	1	1	1	1	1
m_2	1-3	1	1-3	2-3	1-3
γ_{th} [dB]	-5/	/	/	-5	/

Zavisnost verovatnoće otkaza od srednjeg pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika Ω_2 je prikazana na slici 3.4. Razmatrani su scenariji sa različitim vrednostima rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} i Nakagami- m parametra m_2 u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika. Verovatnoća otkaza je manja za veće vrednosti Ω_2 i manje vrednosti D_{STxSRx} jer je u tom slučaju veća prijemna snaga na sekundarnom prijemniku, pa je odnos snage signala i šuma na sekundarnom prijemniku veći. Najbolje performanse sistema se postižu kada je parametar m_2 maksimalne posmatrane vrednosti.



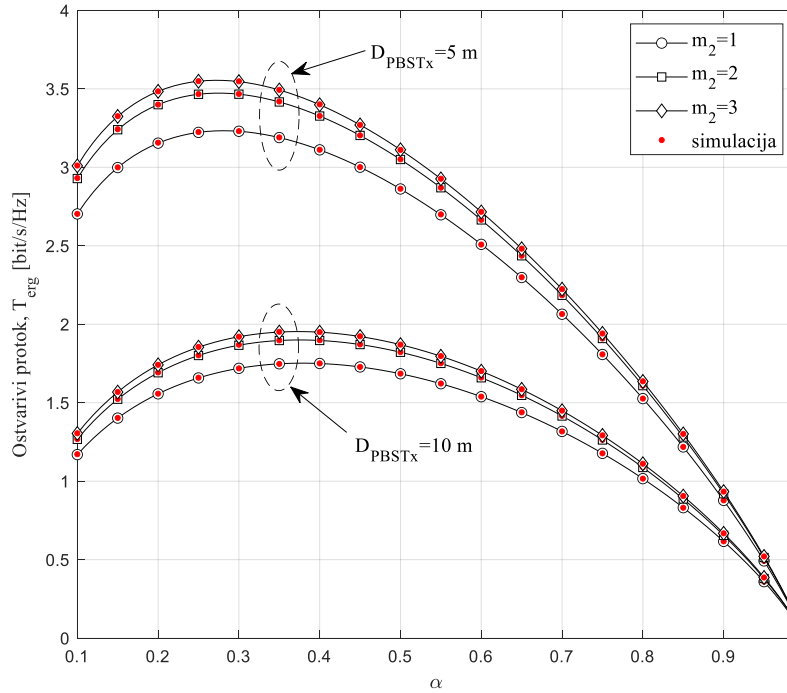
Slika 3.4. – Verovatnoća otkaza u zavisnosti od srednjeg pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika Ω_2 .

Na slici 3.5. prikazan je ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika Ω_2 i vrednosti predajne snage namenskog izvora energije P_{PB} . Srednje pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 20$ dB. Performanse sistema degradiraju sa povećanjem rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika. Bolje performanse se postižu kada namenski izvor energije emituje većom snagom, jer je u tom slučaju usled veće količine prikupljene energije omogućena veća snaga sekundarnog predajnika. Povećanje srednjeg pojačanja snage u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika dovodi do povećanja odnosa signal/šum na prijemu i povećanju ostvarivog protoka u sistemu. Na slici 3.5. izvršeno je i poređenje ostvarivog protoka u zavisnosti od rastojanja između sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika u slučaju kada postoji ograničenje kognitivne mreže i u slučaju kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo. Ograničenje primarne mreže definišu verovatnoća otkaza primarne mreže $P_{out,PU} = 0.05$, srednje pojačanje snage u kanalu između sekundarnog predajnika i primarnog prijemnika $\Lambda_{STx} = 0.1$ i prag interferencije $Q_p = 15$ dB. Na osnovu poređenja vrednosti ostvarivog protoka u slučaju kada postoji ograničenje kognitivne mreže, može se zaključiti da se veće vrednosti ostvarivog protoka postižu kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo.



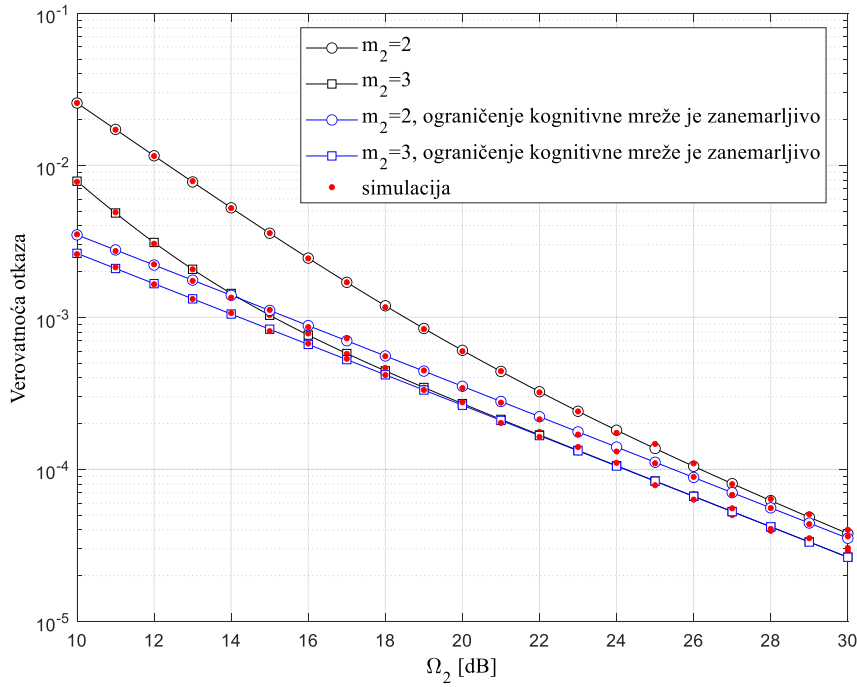
Slika 3.5. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji rastojanja D_{STxSRx} , za različite vrednosti snage namenskog izvora energije P_{PB} .

Zavisnost ostvarivog protoka od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α prikazana je na slici 3.6. Rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika je promenljivo, dok rastojanje između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika iznosi $D_{STxSRx} = 10$ m. Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu je izračunat za različite vrednosti parametra m_2 Nakagami- m fedinga u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika. U svim analiziranim scenarijima moguće je odrediti optimalnu vrednost koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije pri kojoj se maksimizira vrednost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu. Porast ostvarivog protoka je uočen i prilikom povećanja parametra m_2 . Za manju vrednost rastojanja od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika dobijaju se bolji rezultati performansi, jer kada se namenski izvor energije nalazi bliže sekundarnom predajniku, na sekundarnom predajniku se prikupi više energije. Optimalna vrednost koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije je veća ukoliko je rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika veće, jer je potrebno više vremena u okviru svakog vremenskog okvira da bi se prikupila optimalna količina energije.



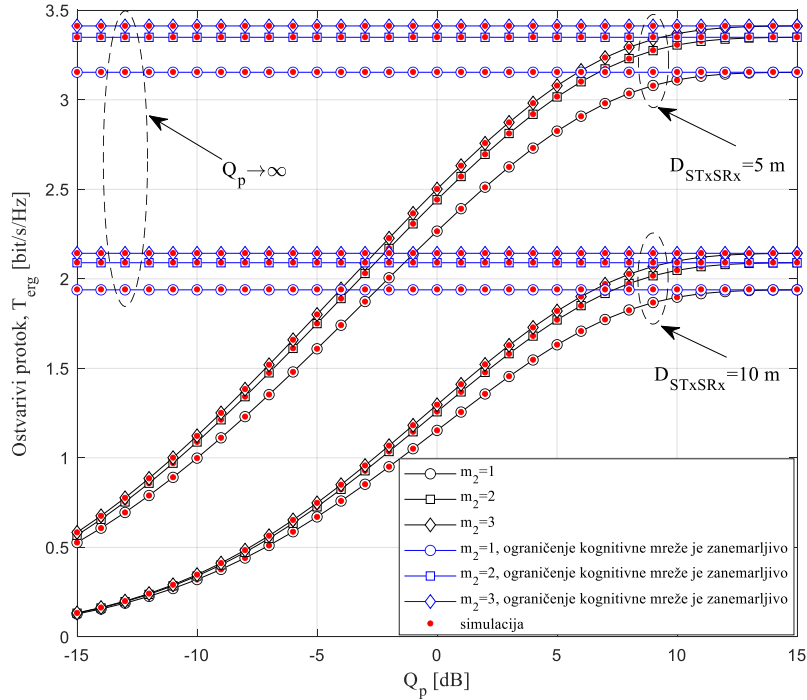
Slika 3.6. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji koeficijenta α , za različite vrednosti Nakagami- m fedinga m_2 .

Na slici 3.7. izvršeno je poređenje verovatnoće otkaza u zavisnosti od srednjeg pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika Ω_2 u slučaju kada postoji ograničenje kognitivne mreže i u slučaju kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo. Ograničenje primarne mreže definišu verovatnoća otkaza primarne mreže $P_{\text{out},PU} = 0.05$, srednje pojačanje snage u kanalu između sekundarnog predajnika i primarnog prijemnika $\Lambda_{STx} = 0.1$ i prag interferencije $Q_p = 15 \text{ dB}$. Razmatrani su scenariji sa različitim vrednostima Nakagami- m parametra m_2 u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika. Verovatnoća otkaza je manja za veće vrednosti Ω_2 jer je u tom slučaju veća prijemna snaga na sekundarnom prijemniku, pa je odnos prijemnog signala i šuma na sekundarnom prijemniku veći. U skladu sa očekivanjima, bolje performanse sistema se postižu kada je vrednost parametra m_2 veća, jer je tada dubina fedinga na sekundarnom linku manja. Na osnovu prikazanih krivih može se uočiti da je za manje vrednosti Ω_2 veća verovatnoća otkaza u slučaju kada postoji ograničenje kognitivne mreže, dok se sa povećanjem vrednosti Ω_2 ta razlika smanjuje.



Slika 3.7. – Poređenje verovatnoće otkaza za sistem sa i bez ograničenja kognitivne mreže i različite vrednosti srednjeg pojačanja snage Ω_2 .

Na slici 3.8. prikazano je poređenje ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu u funkciji praga interferencije Q_p u slučaju kada postoji ograničenje kognitivne mreže i u slučaju kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo. Performanse sistema su ispitane za slučajeve kada je rastojanje sekundarnog predajnika i prijemnika promenljivo, dok je rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika $D_{PBSTx} = 10$ m. Analiza performansi sistema je izvršena za različite vrednosti parametra m_2 Nakagami- m fedinga u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika. Ograničenje primarne mreže definišu verovatnoća otkaza primarne mreže $P_{out,PU} = 0.05$, srednje pojačanje snage u kanalu između sekundarnog predajnika i primarnog prijemnika $\Lambda_{STx} = 0.1$ i prag interferencije $Q_p = 15$ dB. Za niže vrednosti praga interferencije Q_p kada je rastojanje između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika $D_{STxSRx} = 10$ m, ostvarivi protok ne zavisi u većoj meri od vrednosti parametra m_2 Nakagami- m fedinga, dok se sa porastom praga interferencije Q_p veće vrednosti ostvarivog protoka postižu kada je vrednost parametra m_2 veća, odnosno kada je dubina fedinga na sekundarnom linku manja. U skladu sa očekivanjima, ostvarivi protok ima veće vrednosti kada se sekundarni prijemnik nalazi bliže sekundarnom predajniku. Na osnovu predstavljenih rezultata može se zaključiti da jednačina (3.42) predstavlja asimptotski izraz u slučaju kada $Q_p \rightarrow \infty$.



Slika 3.8. – Poređenje ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu za sistem sa i bez ograničenja kognitivne mreže i različite vrednosti Nakagami- m parametra fedinga m_2 .

3.1.3 Performanse kooperativnog kognitivnog sistema kada je uticaj interferencije primarnih korisnika dominantan

Ukoliko se sekundarna mreža nalazi u neposrednoj blizini predajnika primarne mreže, interferencija koja od njih potiče ne može se zanemariti pri analizi performansi sekundarnog linka. U okviru ovog odeljka, razmatra se scenario kada je dejstvo interferencije signala primarnog korisnika spektra na mestu sekundarnog prijemnika dominantno u odnosu na snagu šuma na sekundarnom prijemniku, pa se uticaj šuma može zanemariti.

Emisiona energija koja je prikupljena na sekundarnom predajniku može se izraziti u sledećem obliku

$$E_H = \eta \left(\frac{P_{PB}}{D_{PBSTx}^\delta} |h_{PBSTx}|^2 + \frac{P_{PTx}}{D_{TxSTx}^\delta} |f_{STx}|^2 \right) \alpha T = \eta (\gamma_{STx} + I_{Tx}) \alpha T, \quad (3.43)$$

gde je D_{TxSTx} rastojanje od primarnog predajnika do sekundarnog predajnika, P_{PTx} jedinična snaga interferencije sa primarnog predajnika, f_{STx} koeficijent pojačanja Nakagami- m kanala od primarnog predajnika do sekundarnog predajnika.

Maksimalna raspoloživa snaga sekundarnog predajnika zavisi od prikupljene energije i vremena tokom koga se vrši prenos signala

$$P_{STx} = \frac{E_H}{(1-\alpha)T} = \frac{\eta\alpha}{(1-\alpha)} (\gamma_{STx} + I_{Tx}). \quad (3.44)$$

Dodatno, kao i u prethodno razmatranim scenarijima, emisiona snaga sekundarnog predajnika je ograničena dozvoljenom vrednošću interferencije na primarnom prijemniku, pa je maksimalna dozvoljena vrednost emisione snage $P_{STx,max}$ određena jednačinom (2.5).

Signal na sekundarnom prijemniku može se izraziti na sledeći način

$$y_{SRx} = \sqrt{\frac{P_{STx}}{D_{STxSRx}^\delta}} h_{STxSRx} x_{STx} + \sqrt{\frac{P_{PTx}}{D_{TxSRx}^\delta}} f_{SRx} x_{PTx} + n_{SRx}, \quad (3.45)$$

gde je D_{TxSRx} rastojanje od primarnog predajnika do sekundarnog prijemnika, f_{SRx} koeficijent pojačanja Nakagami- m kanala od primarnog predajnika do sekundarnog prijemnika.

U posmatranom scenariju se smatra da je snaga interferencije koju izaziva primarni predajnik na sekundarnom prijemniku dominantna u odnosu na snagu šuma; tj. komunikacija je ograničena interferencijom. Priljeni odnos signal/interferencija na sekundarnom prijemniku se može napisati u obliku

$$\gamma_{SRx} = \frac{\frac{P_{STx}}{D_{STxSRx}^\delta} |h_{STxSRx}|^2}{\frac{P_{PTx}}{D_{TxSRx}^\delta} |f_{SRx}|^2}. \quad (3.46)$$

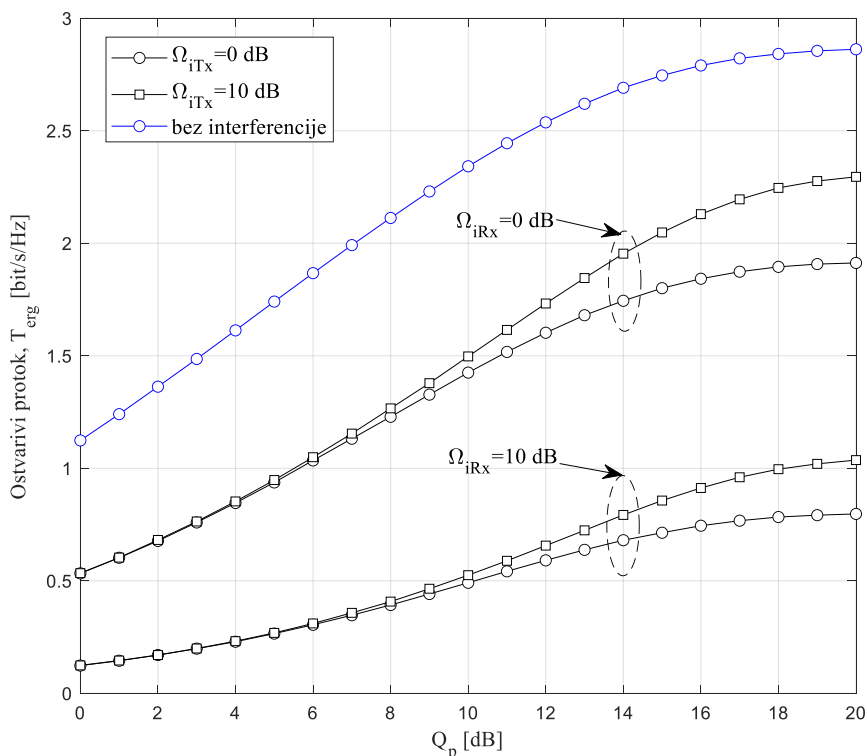
Verovatnoća otkaza se definiše kao verovatnoća da je priljeni odnos signal/interferencija na sekundarnom prijemniku niži od unapred definisanog praga γ_{th} i predstavljena je sledećim izrazom

$$P_{OUT}(\gamma_{th}) = \Pr\{\gamma_{SRx} \leq \gamma_{th}\}. \quad (3.47)$$

Koristeći jednačine (3.21) – (3.24) izračunata je vrednost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu i u nastavku su predstavljeni dobijeni numerički rezultati. U svim scenarijima verovatnoća otkaza primarne mreže jednaka je $P_{out,PU} = 0.1$, dok je koeficijent vremenskog udela pri prikupljanju energije $\alpha = 0.5$. Pojačanje snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 20$ dB, dok je pojačanje snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika $\Omega_2 = 20$ dB. Predajna snaga namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB, a koeficijent efikasnosti konverzije energije jednak 0.9. Rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 5$ m, a rastojanje između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika $D_{STxSRx} = 5$ m. Parametar Nakagami- m fedinga u kanalu između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika i kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika iznosi $m_1 = m_2 = 1$, što odgovara Rejljevom fedingu.

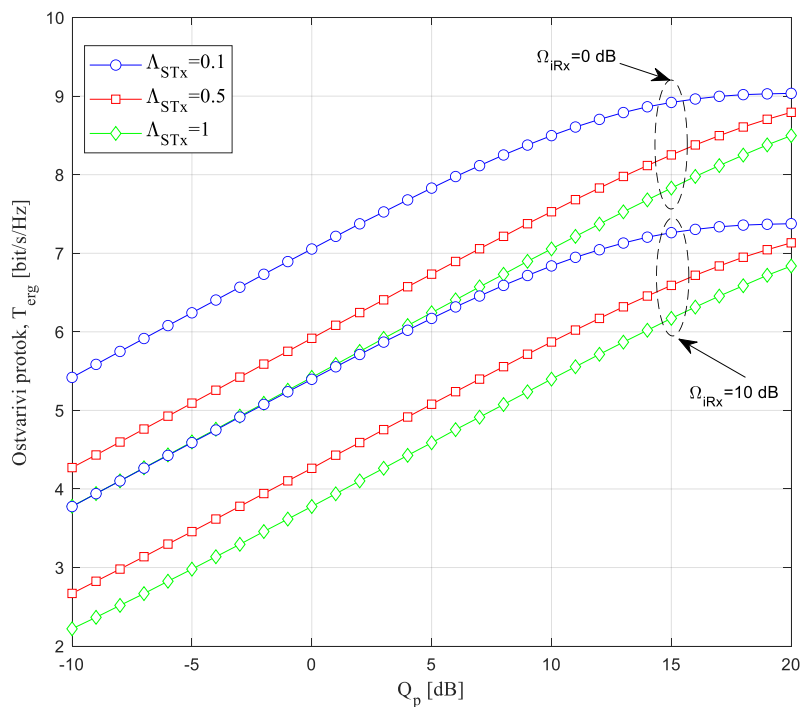
Na slici 3.9. prikazan je ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji praga interferencije Q_p , a analiza je izvršena za različite vrednosti pojačanja snage u kanalima od primarnog predajnika do sekundarnog predajnika $\Omega_{ITx} = E[|f_{STx}|^2]$ i sekundarnog prijemnika $\Omega_{IRx} = E[|f_{SRx}|^2]$, dok je snaga interferencije primarnog predajnika 10 dB. Srednje pojačanje snage u kanalu između sekundarnog predajnika i primarnog prijemnika je $\Lambda_{STx} = 0.1$. Performanse sistema se poboljšavaju sa povećanjem praga interferencije Q_p , dok za veće vrednosti praga interferencije Q_p vrednost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu ulazi u zasićenje, jer performanse sistema dominantno zavise od prikupljene energije na sekundarnom predajniku. Ostvarivi protok je veći kada je vrednost pojačanja snage u kanalu od primarnog predajnika do sekundarnog prijemnika manja, jer je u tom slučaju veći odnos signal/interferencija na sekundarnom prijemniku. Veća vrednost pojačanja snage u kanalu od primarnog predajnika do

sekundarnog predajnika dovodi do većeg ostvarivog protoka, jer je veća prikupljena energija na sekundarnom predajniku. Za manje vrednosti praga interferencije vrednost ostvarivog protoka ne zavisi od srednjeg pojačanja snage u kanalu od primarnog predajnika do sekundarnog predajnika jer je predajna snaga sekundarnog predajnika dominantno određena uslovom interferencije na primarnom prijemu. Za veće vrednosti praga interferencije vrednost ostvarivog protoka ulazi u zasićenje, jer predajna snaga sekundarnog predajnika dominantno zavisi od prikupljene energije. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se bolji rezultati dobijaju kada ne postoji uticaj interferencije sa primarnih predajnika.



Slika 3.9. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu za različite vrednosti srednjih pojačanja snage Ω_{iTx} i Ω_{iRx} .

Na slici 3.10. prikazan je ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji praga interferencije Q_p , kao i zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu od srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijema. Analiza je izvršena za različite vrednosti pojačanja snage u kanalu od primarnog predajnika do sekundarnog prijema. Srednje pojačanje snage u kanalu od primarnog predajnika do sekundarnog prijema je $\Omega_{iRx} = 0$ dB. Performanse sistema se poboljšavaju sa povećanjem praga interferencije Q_p , dok za veće vrednosti praga interferencije Q_p vrednost ostvarivog ergodičnog protoka ulazi u zasićenje, jer performanse sistema zavise od prikupljene energije na sekundarnom predajniku. Ostvarivi protok je veći kada je vrednost pojačanja kanala od primarnog predajnika do sekundarnog prijema manja, jer je u tom slučaju veći odnos signal/interferencija na sekundarnom prijemu. Iako se interferencija sa primarnog predajnika koristi za napajanje sekundarnog predajnika i time povećava ukupna predajna snaga, veće pojačanje snage u kanalu od primarnog predajnika do sekundarnog prijema ima negativniji uticaj na performanse sistema, jer se smanjuje odnos signal/interferencija na sekundarnom prijemu.



Slika 3.10. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu, za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage Λ_{STx} .

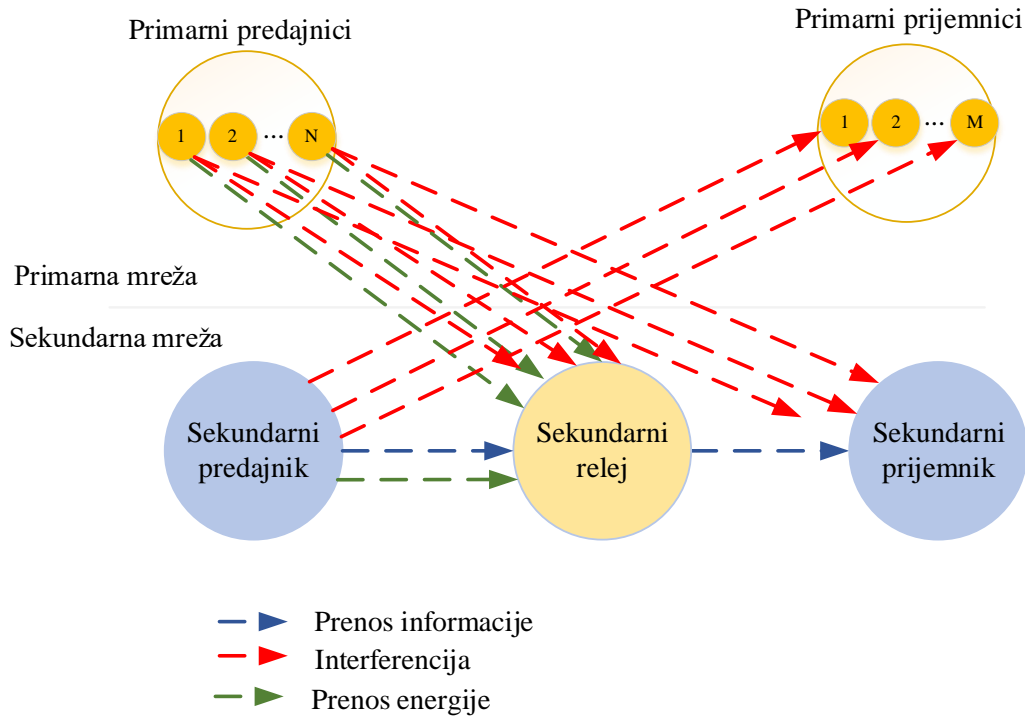
3.2 Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa relejem

U ovom poglavlju analizira se kognitivni kooperativni radio sistem prikazan na slici 3.11. u kojem se prenos informacije obavlja uz pomoć releja. Kao i u prethodnim scenarijima pretpostavlja se da sekundarni korisnici koriste isti frekvencijski opseg kao i primarni korisnici, pod unapred definisanim uslovima u pogledu dozvoljene interferencije na mestu primarnih prijemnika.

Sekundarni sistem se sastoji od sekundarnog predajnika, sekundarnog releja ograničene energije i prijemnika kognitivnog sekundarnog sistema. Analizira se scenario u kojem ne postoji direktna linija optičke vidljivosti između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika zbog pojave dubokog fedinga, tako da sekundarni predajnik i sekundarni prijemnik mogu da komuniciraju samo uz pomoć sekundarnog releja, primenom DF protokola.

Sekundarni korisnici koriste spektar na osnovu pristupa sa kontrolisanim nivoom interferencije, pri čemu je sekundarnoj mreži dostupna samo statistička informacija o stanju u kanalu, odnosno poznate su srednje vrednosti pojačanja snage kanala.

U posmatranom scenariju primarna mreža se sastoji od N predajnika i M prijemnika. Pretpostavlja se da su primarni predajnici blisko pozicionirani na jednoj lokaciji, dok su svi primarni prijemnici blisko pozicionirani na drugoj lokaciji. Ovo odgovara slučaju kooperativne distribuirane mreže gde odgovarajući primarni predajnici formiraju virtuelni antenski niz za prenos ili slučaju kada su primarni predajnici i primarni prijemnici grupisani u dva klastera bežične senzorske mreže.



Slika 3.11. – Model kooperativnog relejnog kognitivnog sistema sa N primarnih predajnika i M primarnih prijemnika.

Koeficijenti pojačanja kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja i od sekundarnog releja do sekundarnog prijemnika su označeni sa h_{STxSR} i h_{SRsRx} , respektivno. Koeficijenti pojačanja kanala od sekundarnog predajnika i sekundarnog releja do primarnih prijemnika su označeni sa g_{Tx_j} i g_{Rx_j} za $j = 1, 2, \dots, M$, respektivno. Koeficijenti pojačanja kanala od primarnih predajnika do sekundarnog predajnika, sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika su označeni sa f_{Tx_i} , f_{R_i} i f_{Rx_i} za $i = 1, 2, \dots, N$, respektivno.

Verovatnoća otkaza sekundarne relejne mreže se definiše kao verovatnoća da je jedan od linkova ispod unapred definisanog praga γ_{th} i data je sledećim izrazom

$$P_{OUT}(\gamma_{th}) = \Pr\{\gamma_{SR} \leq \gamma_{th}\} + \Pr\{\gamma_{SRx} \leq \gamma_{th}, \gamma_{SR} > \gamma_{th}\}. \quad (3.48)$$

Kapacitet otkaza relejne mreže definisan je kao maksimalna brzina podataka koja se može postići u kanalu sa verovatnoćom otkaza $P_{OUT}(\gamma_{th})$ i može se predstaviti jednačinom

$$C_{OUT} = 0.5(1 - P_{OUT}(\gamma_{th})) \log_2(1 + \gamma_{th}). \quad (3.49)$$

Ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza DF sistema za prikupljanje energije sa statističkom informacijom o stanju u kanalu zavisi od primenjenog protokola, pa se za prenos sa TS protokolom može izraziti u obliku [56], [130]

$$T_{OUT} = (1 - \alpha)C_{OUT}, \quad (3.50)$$

dok je u slučaju primene PS protokola ostvarivi protok jednak

$$T_{OUT} = C_{OUT}. \quad (3.51)$$

Ergodični kapacitet definiše se na sledeći način

$$C_{erg} = \frac{1}{2 \ln 2} \int_0^{\infty} \frac{1 - P_{OUT}(\gamma_{th})}{1 + \gamma_{th}} d\gamma_{th}. \quad (3.52)$$

Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u sistemu sa primenjenim TS i PS relejnim protokolima može se dalje izraziti, respektivno, kao

$$T_{erg} = (1 - \alpha) C_{erg}, \quad (3.53)$$

$$T_{erg} = C_{erg}. \quad (3.54)$$

Simulacija sistema je urađena na osnovu dostupne statističke informacije o stanju u kanalu, što znači da se predajna snaga sekundarnog korisnika prilagođava na osnovu srednjih vrednosti pojačanja snage kanala. Sekundarni relej sakuplja energiju od sekundarnog predajnika i od N predajnika primarne mreže, pri čemu su analizirani slučajevi kada su prenos informacija i energije uređeni u skladu sa TS, kao i PS protokolom.

Verovatnoća otkaza sekundarnog sistema se procenjuje upoređivanjem vrednosti odnosa signal/šum u sekundarnom releju i sekundarnom prijemniku sa pragom otkaza u svakom posebnom slotu.

3.2.1 Performanse kognitivnog kooperativnog sistema sa relejem

Sekundarnom predajniku je dozvoljeno da emituje u istom frekvencijskom opsegu pod ograničenjem da je prag interferencije Q_p premašen sa maksimalnom tolerisanom verovatnoćom $P_{out,PU}$. Maksimalna predajna snaga na sekundarnom predajniku, $P_{STx,max}$, određena je dozvoljenom verovatnoćom interferentnog otkaza

$$\Pr \left\{ P_{STx,max} g_{Tx_j} < Q_p \right\} = 1 - P_{out,PU}. \quad (3.55)$$

Predajna snaga sekundarnog predajnika se prilagođava u skladu sa srednjim vrednostima pojačanja snage na linkovima od sekundarnog predajnika do primarnih prijemnika

$$P_{STx,max} = k_{STx} \frac{Q_p}{\Lambda_{STx}}, \quad (3.56)$$

gde je k_{STx} koeficijent prilagođenja predajne snage sekundarnog predajnika i Λ_{STx} srednja vrednost svih koeficijenata pojačanja snage $|g_{Tx_j}|^2$ ($j = 1, 2, \dots, M$) na linkovima od sekundarnog predajnika do svakog primarnog prijemnika.

Predajna snaga sekundarnog releja se prilagođava korišćenjem srednje vrednosti pojačanja snage na linkovima od sekundarnog releja do primarnih prijemnika

$$P_{SR,max} = k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, \quad (3.57)$$

gde je k_{SR} koeficijent prilagođenja predajne snage sekundarnog releja i Λ_{SR} srednja vrednost svih koeficijenata pojačanja snage $|g_{R_j}|^2$ ($j = 1, 2, \dots, M$) na linkovima od sekundarnog releja do svakog primarnog prijemnika.

U odeljku 2.3.2.1 opisan je TS protokol u slučaju jednog primarnog predajnika i jednog primarnog prijemnika. Na osnovu jednačine (2.16), u slučaju kada postoji N primarnih predajnika, sakupljena energija u releju sekundarnog sistema postaje

$$E_{H,R} = \eta \left(\frac{P_{STx,max}}{D_{STxSR}^\delta} |h_{STxSR}|^2 + \sum_{i=1}^N P_{PTx,i} |f_{R_i}|^2 \right) \alpha T = \eta (\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \alpha T, \quad (3.58)$$

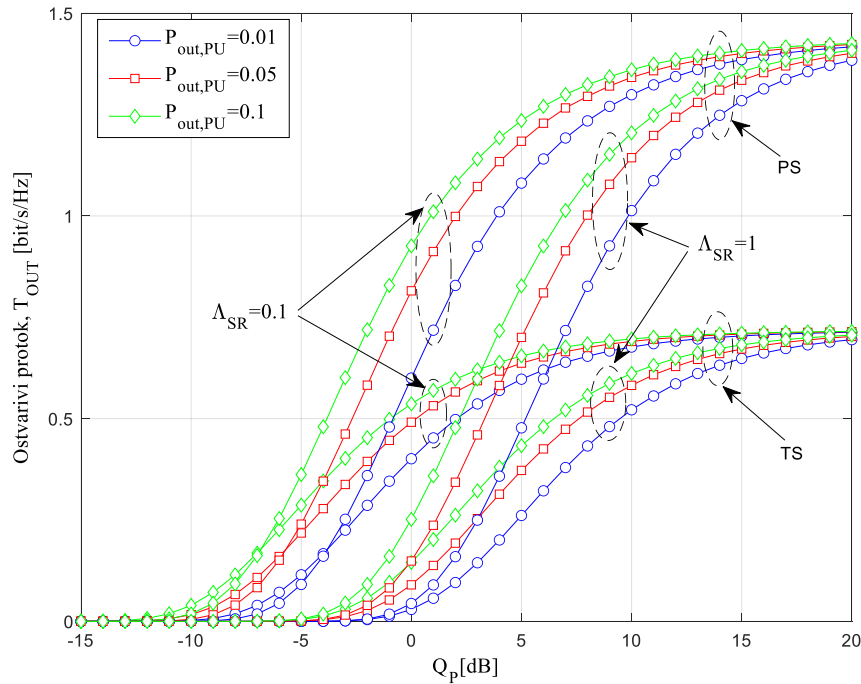
pri čemu se interferencija na sekundarnom releju može izraziti kao $I_{SR} = \sum_{i=1}^N P_{PTx,i} |f_{R_i}|^2$.

U odeljku 2.3.2.2 opisan je PS protokol u slučaju jednog primarnog predajnika i jednog primarnog prijemnika. U slučaju kada postoji N primarnih predajnika, na osnovu jednačine (2.25) sakupljena energija u releju sekundarnog sistema može se opisati sledećom jednačinom

$$E_{H,R} = \eta \rho \left(\frac{P_{STx,max}}{D_{STxSR}^\delta} |h_{STxSR}|^2 + \sum_{i=1}^N P_{PTx,i} |f_{R_i}|^2 \right) T / 2 = \eta (\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \rho T / 2. \quad (3.59)$$

Jednačinama (2.15) i (2.24) predstavljen je odnos signal/šum na sekundarnom releju kada se prenos informacija i energije vrši u skladu sa TS i PS protokolom, respektivno, dok je jednačinama (2.22) i (2.31) predstavljen odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku u oba pomenuta prenosa, u skladu sa TS i PS protokolom, respektivno.

Na slici 3.12. prikazan je ostvarivi protok baziran na kapacitetu otkaza u funkciji praga interferencije Q_p , kao i zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na kapacitetu otkaza od srednjeg pojačanja snage u kanalima između sekundarnog releja do primarnih prijemnika. Analiza je izvršena za različite vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže i za obe vrste korišćenih protokola za prenos informacija i energije. Koeficijent vremenskog udela pri prikupljanju energije je $\alpha = 0.5$, a koeficijent efikasnosti konverzije energije 0.9. Srednje pojačanje snage u kanalu između sekundarnog predajnika i primarnog prijemnika je $\Lambda_{STx} = 0.1$. Pojačanje snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja je $\Omega_{STxSR} = 10$ dB, dok je pojačanje snage kanala od sekundarnog releja do sekundarnog prijemnika $\Omega_{SRsRx} = 10$ dB. Srednja pojačanja snage signala interferencije postavljena su na 0 dB u kanalu između primarnog predajnika i sekundarnog releja, kao i u kanalu primarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, respektivno. Broj primarnih predajnika je $N=1$ i broj primarnih prijemnika je $M=1$. Performanse sistema se poboljšavaju sa povećanjem praga interferencije Q_p , dok za veće vrednosti praga interferencije Q_p vrednost ostvarivog protoka ulazi u zasićenje, jer performanse sistema zavise od prikupljene energije na sekundarnom predajniku. Ostvarivi protok je veći kada je srednje pojačanje kanala od sekundarnog releja do primarnog prijemnika manje, dok je verovatnoća otkaza primarne mreže veća, jer je uslov ograničenja predajne snage sekundarnih korisnika manje restriktivan. Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da se veći protok može ostvariti u slučajevima kada se za prenos energije i informacija koristi PS protokol.



Slika 3.12. – Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže.

3.2.2 Performanse kognitivnog kooperativnog sistema sa relejem kada je zanemarljivo ograničenje kognitivne mreže

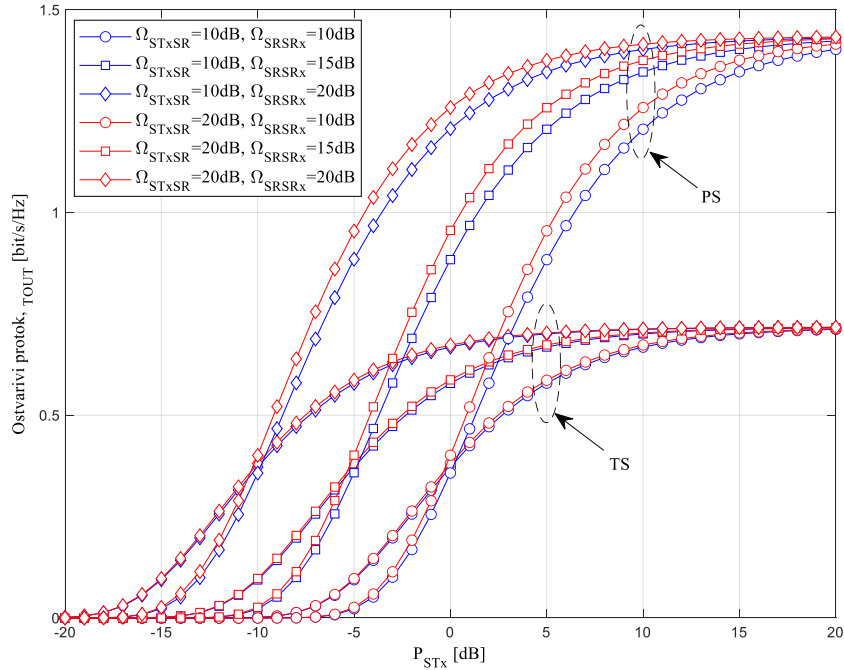
U ovom odeljku predstavljen je kognitivni kooperativni sistem u kojem predajna snaga sekundarnog releja zavisi isključivo od prikupljene energije koja je u slučaju prenosa sa TS protokolom predstavljena jednačinom (3.58), dok je u slučaju prenosa sa PS protokolom predstavljena jednačinom (3.59).

Jednačinama (2.15) i (2.24) predstavljen je odnos signal/šum na sekundarnom releju kada se prenos informacija i energije vrši u skladu sa TS i PS protokolom, respektivno, dok je jednačinama (2.22) i (2.31) predstavljen odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku u oba pomenuta prenosa.

Performanse sistema su predstavljene jednačinama (3.48) – (3.54). Predajna snaga sekundarnog predajnika nije ograničena uslovom primarne mreže, već se definiše kao parametar u setu definisanih parametara.

Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u funkciji predajne snage sekundarnog predajnika predstavljen je na slici 3.13. Na istoj slici je prikazana zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na verovatnoći otkaza od pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja i od sekundarnog releja do sekundarnog prijemnika. Koeficijent vremenskog udela pri prikupljanju energije je $\alpha = 0.5$, a koeficijent efikasnosti konverzije energije 0.9. Broj primarnih predajnika je $N=1$ i broj primarnih prijemnika je $M=1$. Srednja pojačanja snage kanala Ω_{I_r} i $\Omega_{I_{rx}}$ u kanalima interferencije od primarnog predajnika do sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika, respektivno postavljena su na 0 dB. Sa porastom predajne snage sekundarnog predajnika raste vrednost ostvarivog protoka. Bolje performanse u sistemu se postižu za veće vrednosti pojačanja snage u kanalima od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja i od sekundarnog releja do sekundarnog prijemnika. Poređenjem rezultata koji se postižu u svim

scenarijima za oba protokola za prikupljanje energije može se zaključiti da se bolji rezultati postižu kada se za prenos informacije i prikupljanje energije koristi PS protokol.



Slika 3.13. – Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od snage prenosa sekundarnog predajnika.

3.2.3 Performanse kognitivnog kooperativnog sistema sa relejem kada je uticaj interferencije primarnih korisnika dominantan

U okviru ovog odeljka razmatran je slučaj kada je dejstvo interferencije koju izaziva N primarnih predajnika na sekundarnom releju ili sekundarnom prijemniku dominantno u odnosu na odgovarajuće dejstvo šuma na prijemu. U skladu sa ovom pretpostavkom, uticaj šuma se u daljem izvođenju može zanemariti.

Odnos snage signala i interferencije u slučaju prenosa u skladu sa TS protokolom može se predstaviti u obliku

$$\gamma_{SR} = \frac{P_{STx,max} |h_{STxSR}|^2}{D_{STxSR}^\delta \sum_{i=1}^N P_{PTx,i} |f_{R_i}|^2} = \frac{\gamma_{STxSR}}{I_R}, \quad (3.60)$$

gde je $\gamma_{STxSR} = \frac{P_{STx,max}}{D_{STxSR}^\delta} |h_{STxSR}|^2$ i $I_R = \sum_{i=1}^N P_{PTx,i} |f_{R_i}|^2$.

Odnos snage signala i interferencije u slučaju prenosa baziranog na PS protokolu može se predstaviti u obliku

$$\gamma_{SR} = \frac{(1-\rho) \frac{P_{STx,max}}{D_{STxSR}^\delta} |h_{STxSR}|^2}{\sum_{i=1}^N (1-\rho) P_{PTx,i} |f_{R_i}|^2} = \frac{\frac{P_{STx,max}}{D_{STxSR}^\delta} |h_{STxSR}|^2}{\sum_{i=1}^N P_{PTx,i} |f_{R_i}|^2} = \frac{\gamma_{STxSR}}{I_R}. \quad (3.61)$$

Sakupljena energija u releju sekundarnog sistema u slučaju prenosa sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu je predstavljena jednačinom (3.58), dok je u slučaju prenosa baziranog na raspodeli snage predstavljena jednačinom (3.59). Predajna snaga releja sa ograničenom energijom određena je prikupljenom energijom i maksimalnom dozvoljenom snagom zbog ograničenja interferencije na primarnim prijemnicima i analizirana je u odeljku 3.2.1.

Prijemni odnos signala i interferencije u sekundarnom prijemniku se može napisati u obliku

$$\gamma_{SRx} = \frac{P_{SR} |h_{SRSRx}|^2}{\sum_{i=1}^N P_{PTx,i} |f_{R_{x_i}}|^2} = P_{SR} \frac{\gamma_{SRSRx}}{I_{Rx}}, \quad (3.62)$$

gde je $\gamma_{SRSRx} = |h_{SRSRx}|^2$ i $I_{Rx} = \sum_{i=1}^N P_{PTx,i} |f_{R_{x_i}}|^2$.

Koristeći jednačinu (2.19) iz odeljka 2.3.2 izraz za prijemni odnos signal/interferencija na sekundarnom prijemniku u slučaju prenosa u skladu sa TS protokolom postaje

$$\gamma_{SRx} = \begin{cases} \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)} \frac{\gamma_{SRSRx}}{I_{Rx}} (\gamma_{STxSR} + I_R), & \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)} (\gamma_{STxSR} + I_R) \leq k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, \\ k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}} \frac{\gamma_{SRSRx}}{I_{Rx}}, & \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)} (\gamma_{STxSR} + I_R) > k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}. \end{cases} \quad (3.63)$$

U slučaju kada se prenos vrši u skladu sa PS protokolom, na sličan način se može pokazati da se odnos signal/interferencija može napisati u obliku

$$\gamma_{SRx} = \begin{cases} \eta\rho \frac{\gamma_{SRSRx}}{I_{Rx}} (\gamma_{SR} + I_R), & \eta\rho (\gamma_{STxSR} + I_R) \leq k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, \\ k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}} \frac{\gamma_{SRSRx}}{I_{Rx}}, & \eta\rho (\gamma_{STxSR} + I_R) > k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}. \end{cases} \quad (3.64)$$

Odnos signal/interferencija na sekundarnom prijemniku za oba protokola, može se izraziti u jedinstvenom obliku

$$\gamma_{SRx} = \begin{cases} c \frac{\gamma_{SRSRx}}{I_D} (\gamma_{STxSR} + I_R), & c (\gamma_{STxSR} + I_R) \leq q, \\ q \frac{\gamma_{SRSRx}}{I_{Rx}}, & c (\gamma_{STxSR} + I_R) > q, \end{cases} \quad (3.65)$$

gde je $q = k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}$, $c = \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)}$ u slučaju TS protokola, dok je $c = \eta\rho$ u slučaju PS protokola.

Verovatnoća otkaza sekundarne mreže je definisana jednačinom (3.48) pa se primenom jednačina (3.48) i (3.65), dobija sledeći izraz

$$P_{OUT}(\gamma_{th}) = \Pr\left\{\frac{\gamma_{STxSR}}{I_R} \leq \gamma_{th}\right\} + \Pr\left\{c\frac{\gamma_{SRSR_x}}{I_{SR_x}}(\gamma_{STxSR} + I_R) \leq \gamma_{th}, c(\gamma_{STxSR} + I_R) \leq q, \frac{\gamma_{STxSR}}{I_R} > \gamma_{th}\right\} \\ + \Pr\left\{q\frac{\gamma_{SRSR_x}}{I_D} \leq \gamma_{th}, c(\gamma_{STxSR} + I_R) > q, \frac{\gamma_{STxSR}}{I_R} > \gamma_{th}\right\}. \quad (3.66)$$

Zamenom $u = \gamma_{STxSR} + I_R$, $v = \frac{\gamma_{STxSR}}{I_R}$ i $w = \frac{\gamma_{SRSR_x}}{I_{R_x}}$, verovatnoća otkaza se može predstaviti

$$P_{OUT}(\gamma_{th}) = \Pr\{v \leq \gamma_{th}\} + \Pr\left\{u \leq \min\left(\frac{\gamma_{th}}{cw}, \frac{q}{c}\right), v > \gamma_{th}\right\} + \Pr\left\{w \leq \frac{\gamma_{th}}{q}, u > \frac{q}{c}, v > \gamma_{th}\right\} \quad (3.67)$$

i može se dalje pisati u formi pogodnijoj za analizu koja sledi

$$P_{OUT}(\gamma_{th}) = \Pr\{v \leq \gamma_{th}\} + \Pr\left\{u \leq \frac{\gamma_{th}}{cw}, w > \frac{\gamma_{th}}{q}, v > \gamma_{th}\right\} + \Pr\left\{w \leq \frac{\gamma_{th}}{q}, v > \gamma_{th}\right\} = I_1 + I_2 + I_3. \quad (3.68)$$

Kanali između primarnih i sekundarnih predajnika i prijemnika podležu Rejljevoj raspodeli fedinga. U slučaju kada se feding u okruženju može opisati Rejljevom raspodelom, funkcija gustine verovatnoće ima oblik Nakagami- m raspodele za $m=1$ i predstavljena je jednačinom (2.42). Prema tome, slučajne promenljive γ_{STxSR} i γ_{SRSR_x} prate Gama raspodelu, a odgovarajuće funkcije gustine verovatnoće se mogu zapisati u sledećem obliku

$$p_{\gamma_{STxSR}}(x) = \frac{1}{\Omega_{STxSR}} \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{STxSR}}\right), \quad (3.69)$$

i

$$p_{\gamma_{SRSR_x}}(x) = \frac{1}{\Omega_{SRSR_x}} \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{SRSR_x}}\right), \quad (3.70)$$

sa matematičkim očekivanjima jednakim $\Omega_{STxSR} = E\left[P_{STx,\max} |h_{STxSR}|^2\right]$ i $\Omega_{SRSR_x} = E\left[|h_{SRSR_x}|^2\right]$, respektivno.

Dalji proračuni sa odgovarajućim matematičkim operacijama dovode do konačnog izraza u zatvorenom obliku za verovatnoću otkaza i prikazani su u Dodatku 3-A.

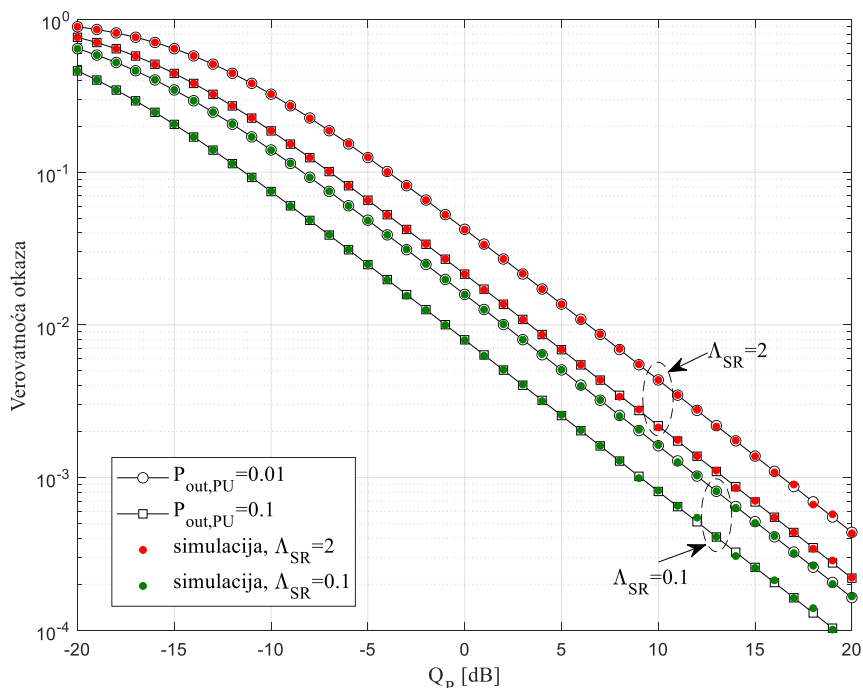
U narednom delu su predstavljeni numerički rezultati za verovatnoću otkaza i ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza u posmatranom kognitivnom relejnom sistemu. Rezultati su predstavljeni za različite parametre sistema koji su prikazani u tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Parametri simulacije kooperativnog kognitivnog sistema sa relejem kada je uticaj interferencije primarnih korisnika dominantan.

Parametar	Slika 3.14	Slika 3.15	Slika 3.16	Slika 3.17	Slika 3.18	Slika 3.19
$P_{out,PU}$	0.01–0.1	0.05	0.05	0.05	0.01–0.1	0.05
Q_p [dB]	–20÷20	10	5–15	10	–15÷20	–15÷20
Λ_{SR}	0.1–2	0.1–1	1	1	1	1
Λ_{STx}	0.01	0.1–10	1	1	1	1
Ω_{I_R} [dB]	0	0	0	–10÷0	0	0
$\Omega_{I_{Rx}}$ [dB]	–10	–10	–10	–10÷0	–10	–10
Ω_{STxSR} [dB]	10	–10÷20	10	–10÷30	10	10
Ω_{SRSRx} [dB]	10	–10÷20	10	–10÷30	10	10
γ_{th} [dB]	–5	8	8	8	8	8
η	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
α	0.5	0.5	0.01–0.99	0.5	0.2	0.5
ρ	0.5	0.5	0.01–0.99	0.5	0.2	0.5
N	1	1	1–2	1	1	1

Zavisnost verovatnoće otkaza od praga interferencije Q_p je prikazana na slici 3.14. u slučaju kada se prenos informacije i energije odvija putem TS protokola. Razmatrani su scenariji sa različitim vrednostima verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$ i srednjeg pojačanja snage kanala Λ_{SR} od sekundarnog releja do primarnog prijemnika. Povećanjem praga interferencije Q_p smanjuje se verovatnoća otkaza, s obzirom na to da povećanje praga interferencije Q_p dopušta veće dozvoljene predajne snage na sekundarnom predajniku i sekundarnom releju. Veća dozvoljena predajna snaga na sekundarnom predajniku obezbeđuje i više prikupljene energije na sekundarnom releju.

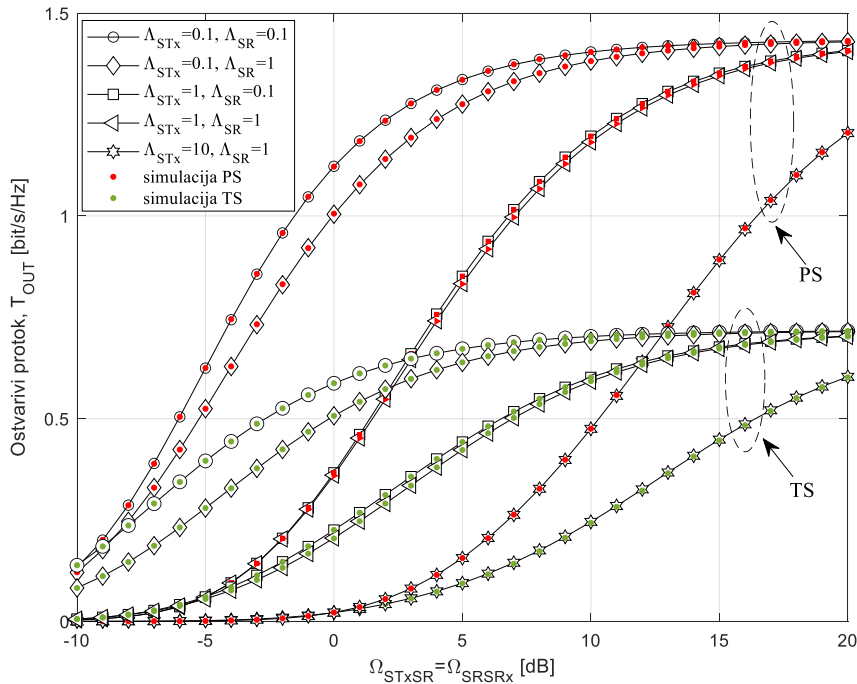
Za manje vrednosti Λ_{SR} dozvoljena predajna snaga sekundarnog releja je veća, pa je verovatnoća otkaza manja. Verovatnoća otkaza kognitivne mreže je manja za veće vrednosti dozvoljene verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$, jer su sa većom maksimalno dozvoljenom vrednošću verovatnoće otkaza (kada je prag interferencije Q_p fiksiran) dozvoljene veće predajne snage na sekundarnom predajniku i sekundarnom releju, pa su odnosi prijemnog signala i interferencije na sekundarnom releju i na prijemniku veći. Slični rezultati su dobijeni u slučaju kada se prenos informacije i energije odvija putem PS protokola korišćenjem istih scenarija.



Slika 3.14. – Verovatnoća otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p za TS protokol.

Na slici 3.15. predstavljen je ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza u funkciji srednjih pojačanja snage kanala Ω_{STxSR} i $\Omega_{SR SRx}$ za oba analizirana protokola za prikupljanje energije. Pretpostavka je da su srednje vrednosti pojačanja snage kanala na linkovima sekundarni predajnik-sekundarni relej i sekundarni relej-sekundarni prijemnik jednake. Analiza je izvršena za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog izvora do primarnih prijemnika Λ_{STx} i srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog releja do primarnih prijemnika Λ_{SR} . Kao što je prikazano na slici 3.15. u svim razmatranim slučajevima vrednosti ostvarenog protoka se povećavaju sa porastom srednjeg pojačanja snage kanala $\Omega_{STxSR} = \Omega_{SR SRx}$ kada su ove vrednosti ispod 10 dB, dok se za veće vrednosti srednjeg pojačanja snage kanala javlja efekat zasićenja.

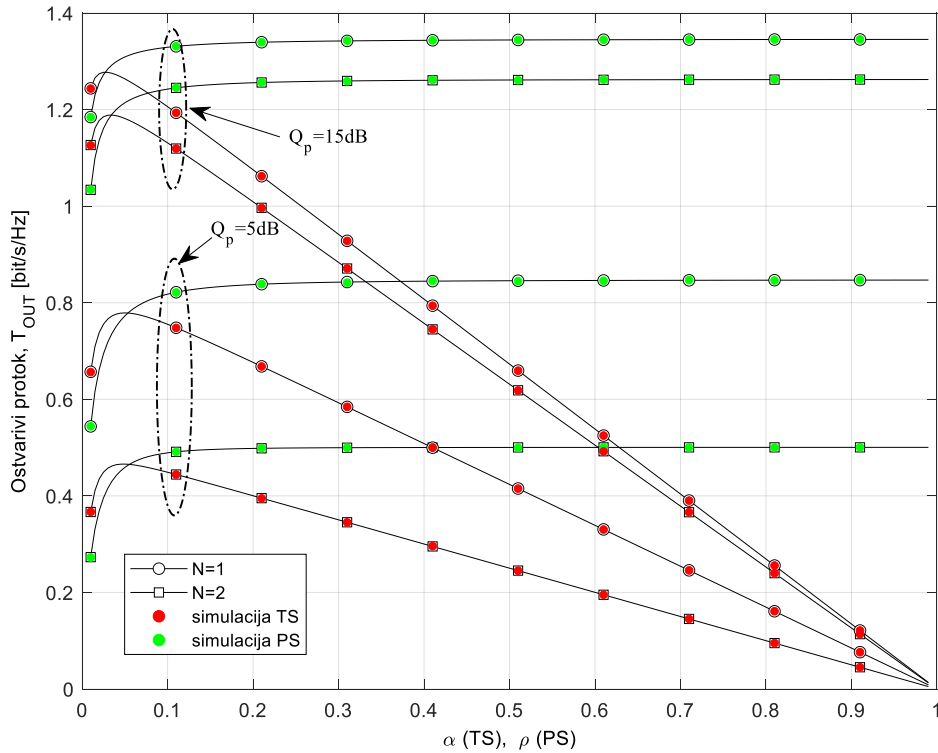
Zasićenje se javlja za veće vrednosti $\Omega_{STxSR} = \Omega_{SR SRx}$ kada je srednje pojačanje snage kanala Λ_{STx} veće, pošto je predajna snaga sekundarnog releja tada dominantno određena ograničenjem interferencije primarnog prijemnika. Za veće srednje pojačanje snage kanala Λ_{STx} maksimalna dozvoljena predajna snaga sekundarnog predajnika je manja, pa ograničenje predajne snage releja zbog interferencije na primarnom prijemniku postaje dominantno za veće srednje pojačanje snage kanala Ω_{STxSR} . U svim analiziranim slučajevima, veće vrednosti ostvarenog protoka se postižu u slučaju primene PS protokola za prikupljanje energije, što je u skladu sa očekivanjima. Ostvarivi protok se povećava sa smanjenjem srednjeg pojačanja snage kanala Λ_{STx} , jer je u tom slučaju dozvoljena veća predajna snaga sekundarnog predajnika. Slično, vrednosti ostvarivog protoka se povećavaju za manje vrednosti Λ_{SR} , jer je u tom slučaju veća dozvoljena predajna snaga sekundarnog releja. Međutim, u slučaju kada je $\Lambda_{STx} = 10$, razlika između slučajeva različitih vrednosti Λ_{SR} se smanjuje, pošto je verovatnoća otkaza dominantno ograničena linkom sekundarni predajnik-sekundarni relej.



Slika 3.15. – Ostvarivi protok za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage kanala u kognitivnom relejnom sistemu.

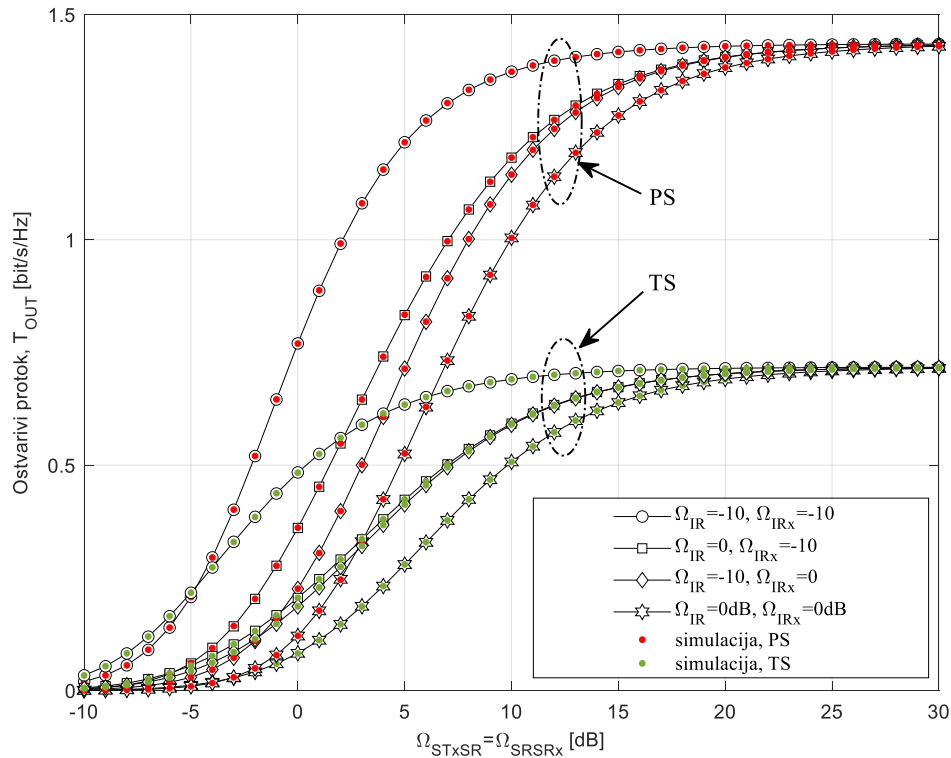
Zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na kapacitetu otkaza kognitivnog sistema od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α i koeficijenta udela snage pri prikupljanju energije ρ prikazana je na slici 3.16. Ostvarivi protok je analiziran za različite vrednosti praga interferencije primarnog korisnika Q_p i broja primarnih predajnika N . Razmatrana su oba protokola za skupljanje energije, sa koeficijentom efikasnosti konverzije energije $\eta = 0.9$. U slučaju kada se primenjuje prenos sa TS protokolom, može se odrediti optimalna vrednost koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α kada je ostvarivi protok maksimalan. Ostvarivi protok se povećava za vrednosti $\alpha < 0.05$, dok dalje povećanje koeficijenta α dovodi do smanjenja ostvarivog protoka. U slučaju prenosa sa PS protokolom, ostvarivi protok se povećava sa koeficijentom ρ za male vrednosti ρ , jer se tada više snage koristi za prikupljanje energije, pa se predajna snaga sekundarnog releja povećava. Međutim, u slučaju daljeg povećanja dolazi do zasićenja, pošto je maksimalna predajna snaga releja određena sa strožijim ograničenjem koje zahteva primarna mreža, a srednji odnos signal/interferencija na sekundarnom releju je nezavisan od ρ .

Bolje performanse sistema se postižu sa manjim brojem predajnika u primarnoj mreži za oba protokola za prikupljanje energije. Ovo se može objasniti činjenicom da je degradirajući efekat interferencije na primarnim prijemnicima dominantniji, iako se interferencija iz primarne mreže, sa primarnih predajnika koristi za prikupljanje energije. Na osnovu rezultata može se zaključiti da ostvarivi protok uvek raste sa povećanjem dozvoljenog praga interferencije Q_p . Veća vrednost Q_p povećava i ukupnu predajnu snagu na sekundarnom predajniku, kao i dozvoljenu predajnu snagu na sekundarnom releju, što dovodi do većeg ostvarivog protoka sistema.



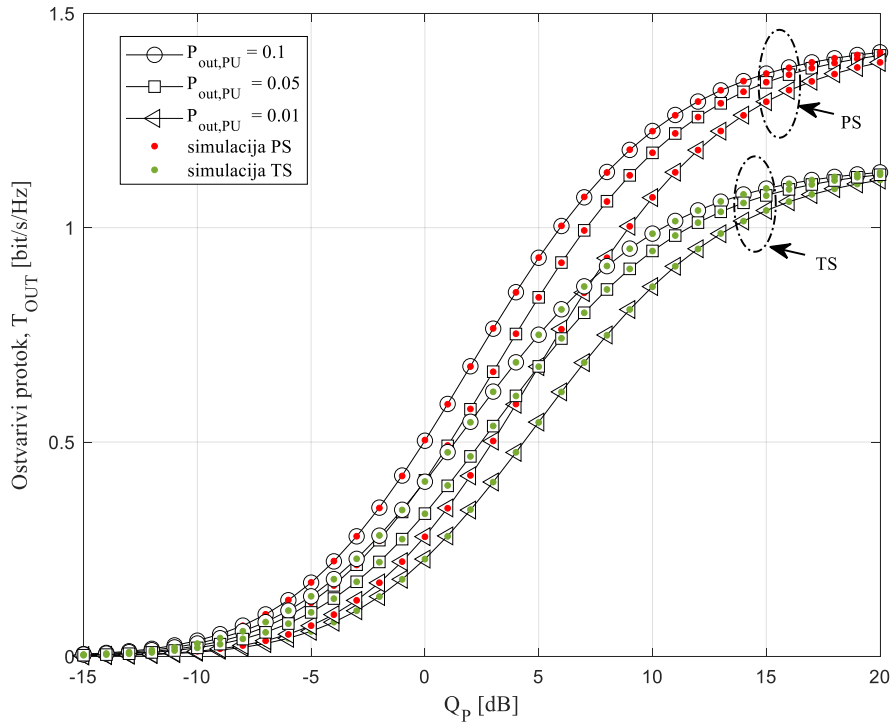
Slika 3.16. – Ostvarivi protok u zavisnosti od koeficijenta za prikupljanje energije α i ρ za TS/PS protokole prikupljanja energije.

Na slici 3.17. prikazana je zavisnost ostvarivog protoka u funkciji od Ω_{STxSR} i Ω_{SRSRx} za oba analizirana protokola za prikupljanje energije. Analiza je izvršena za različite vrednosti srednjih pojačanja snage kanala Ω_{I_R} i $\Omega_{I_{Rx}}$ u kanalima interferencije od primarnog predajnika do sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika, respektivno. Najbolje performanse sistema se postižu za najmanje vrednosti Ω_{I_R} i $\Omega_{I_{Rx}}$, za oba analizirana protokola. Povećanje Ω_{I_R} i $\Omega_{I_{Rx}}$ negativno utiče na performanse sistema. U slučaju PS protokola dobijeni rezultati su bolji kada je $\Omega_{I_R} = 0\text{ dB}$ i $\Omega_{I_{Rx}} = -10\text{ dB}$ nego kada je $\Omega_{I_R} = -10\text{ dB}$, $\Omega_{I_{Rx}} = 0$, dok je u slučaju TS protokola razlika manja, a ove krive se skoro preklapaju. Ovaj efekat se može objasniti činjenicom da interferencija na određitu ima samo degradirajući efekat, dok interferencija na sekundarnom releju povećava ukupnu prikupljenu energiju. Ostvarivi protok raste sa povećanjem $\Omega_{STxSR} = \Omega_{SRSRx}$, a u oblasti visokih vrednosti isti je za sve analizirane vrednosti Ω_{I_R} i $\Omega_{I_{Rx}}$. To je zato što je predajna snaga energetski ograničenog sekundarnog releja određena prikupljenom energijom i maksimalnom snagom koja je dozvoljena zbog ograničenja verovatnoće premašenja interferencije. Taj efekat je primetan i u slučaju PS protokola za vrednosti pojačanja snage veće od 25 dB.



Slika 3.17. – Uticaj interferencije na sekundarnom predajniku i sekundarnom releju na vrednosti ostvarivog protoka za različite vrednosti parametara $\Omega_{STxSR} = \Omega_{SRSRx}$.

Vrednosti ostvarivog protoka su predstavljene na slici 3.18. u funkciji dozvoljenog praga interferencije Q_p za oba protokola za prikupljanje energije i različite vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže. Za male vrednosti Q_p ukupna predajna snaga na sekundarnom predajniku je veoma niska, količina prikupljene energije na sekundarnom releju je ograničena, i samim tim predajna snaga sekundarnog releja je niska, pa su i vrednosti ostvarivog protoka veoma male, za oba protokola i sve analizirane vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže. Povećanjem dozvoljenog praga interferencije Q_p , vrednosti ostvarivog protoka u sistemu rastu, jer se osim dozvoljene predajne snage sekundarnog predajnika povećava i dozvoljena predajna snaga sekundarnog releja. Za veće vrednosti Q_p , bolje performanse sistema se dobijaju sa primenjenim PS protokolom u odnosu na prenos sa TS protokolom. Bolje performanse se postižu za veće vrednosti dozvoljene verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$. Sa višom maksimalnom dozvoljenom vrednošću verovatnoće otkaza primarne mreže, kada je prag interferencije Q_p fiksiran, raste i predajna snaga sekundarnog predajnika i dozvoljena predajna snaga na sekundarnom releju, i veći su odnos prijernog signala i interferencije na sekundarnom releju i sekundarnom prijemniku.



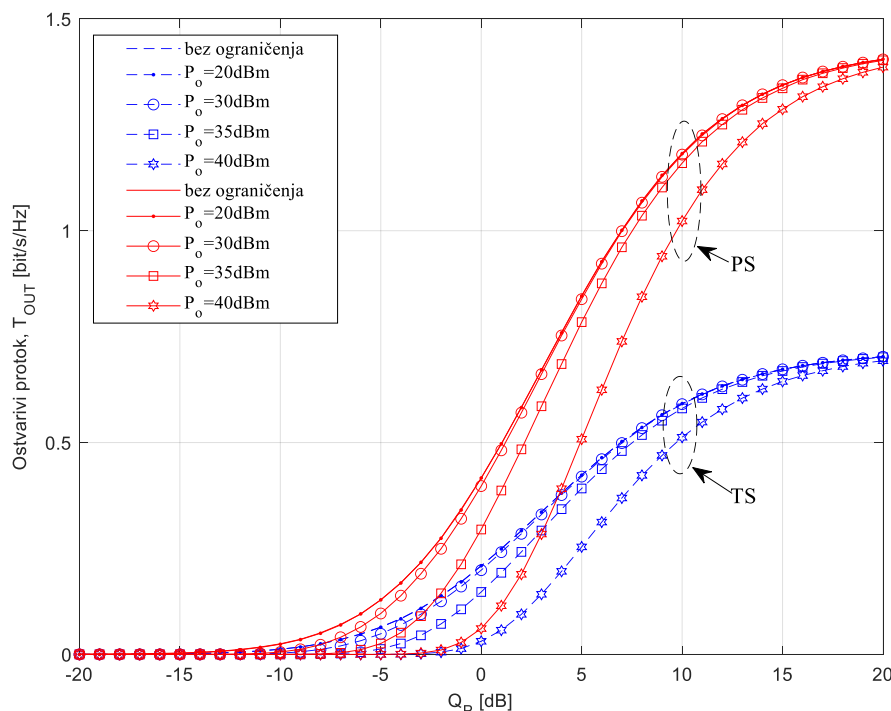
Slika 3.18. – Ostvarivi protok u funkciji praga interferencije Q_p , za TS/PS protokole prikupljanja energije.

Realan model prikupljanja energije koristi minimalnu količinu energije neophodnu za taj proces, jer se i u procesu prikupljanja troši deo energije [132]. Zbog toga su na slici 3.19. predstavljeni rezultati simulacije za različite vrednosti minimalnog ograničenja ulazne snage u sekundarni relej, P_o , koja je potrebna za realizaciju procesa prikupljanja energije.

Vrednosti ostvarivog protoka procenjenih korišćenjem metode Monte Karlo simulacije prikazane su na slici 3.19., u funkciji dozvoljenog praga interferencije Q_p za oba protokola za prikupljanje energije, pri čemu su koeficijenti prikupljanja energije jednaki $\alpha = \rho = 0.5$, i različite vrednosti P_o . Za niske vrednosti Q_p , vrednosti ostvarenog protoka su veoma niske, za oba protokola i sve analizirane vrednosti P_o . Ovo se može objasniti činjenicom da je za male vrednosti Q_p , ukupna ulazna snaga na sekundarnom releju veoma niska, tako da je teško dostići definisani minimalni prag ulazne snage koji je potreban za realizaciju procesa prikupljanja energije. Povećanjem dozvoljenog praga interferencije Q_p , ukupna ulazna snaga na sekundarnom releju se takođe povećava, sakuplja se više energije, predajna snaga sekundarnog releja je veća, što rezultira poboljšanim vrednostima ostvarivog protoka u sistemu. Dozvoljena vrednost predajne snage na sekundarnom releju raste za veći prag interferencije Q_p . Za veće vrednosti Q_p , bolje performanse sistema se dobijaju sa primenjenim PS protokolom u odnosu na TS protokol.

Kao što je i očekivano, bolje performanse se postižu za niže vrednosti minimalnog praga P_o , jer je veća verovatnoća da ukupna ulazna snaga sekundarnog releja pređe ove vrednosti. U slučaju kada je ukupna ulazna snaga sekundarnog releja ispod P_o , na sekundarnom releju se ne vrši prikupljanje energije, a izlazna snaga sekundarnog releja je jednaka nuli. Kada je vrednost minimalnog ograničenja ulazne snage sekundarnog releja jednaka 20 dBm, performanse sistema su uporedive sa onima dobijenim u slučaju kada nema ograničenja praga (tj. $P_o = 0$ W). Važno je

istaći da su sve razmatrane vrednosti značajno veće od vrednosti koje su ranije korišćene u literaturi ($P_o = -12$ dBm ili $64 \mu\text{W}$ u [91]).



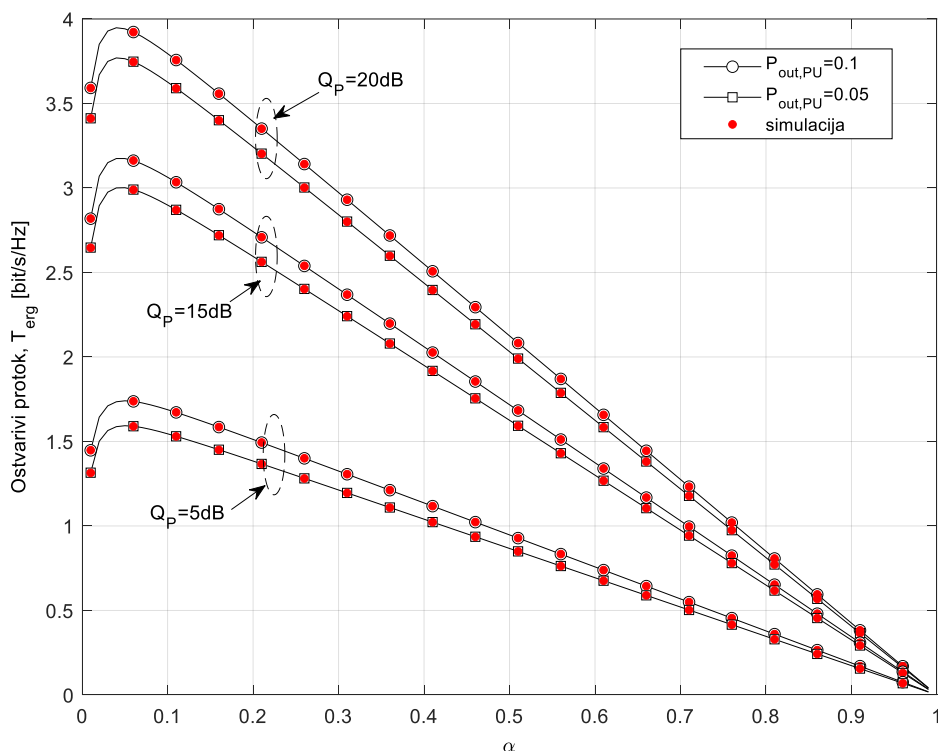
Slika 3.19. – Rezultati simulacije za ostvarivi protok u odnosu na prag interferencije Q_p i minimalno ograničenje praga ulazne snage na sekundarnom releju, P_o .

Na slikama 3.20. – 3.22. predstavljena je analiza protoka baziranog na ergodičnom kapacitetu, dok su na slikama 3.23. i 3.24. prikazane analiza verovatnoće otkaza i analiza ostvarivog protoka zasnovanog na kapacitetu otkaza kognitivnog kooperativnog sistema, respektivno. U analiziranim scenarijima pojačanje snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja je $\Omega_{STxSR} = 2$ dB dok je pojačanje snage kanala od sekundarnog releja do sekundarnog prijemnika $\Omega_{SRSRx} = 0$ dB. Srednje pojačanje snage u kanalu interferencije od primarnog predajnika do sekundarnog releja je $\Omega_{I_R} = 2$ dB, dok je srednje pojačanje snage u kanalu interferencije od primarnog predajnika do sekundarnog prijemnika $\Omega_{I_{Rx}} = 0$ dB.

Na slici 3.20. ostvarivi protok baziran na ergodičnom kapacitetu kognitivnog korisnika je predstavljen kao funkcija koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α , za različite vrednosti praga interferencije Q_p i verovatnoće otkaza $P_{out,PU}$. Pretpostavlja se da postoji jedan primarni predajnik postavljen na poziciji (0,0) Dekartovog koordinatnog sistema i jedan primarni prijemnik postavljen na poziciji (1,0) Dekartovog koordinatnog sistema. Sekundarni predajnik, sekundarni relej i sekundarni prijemnik su postavljeni na pozicije (0,1), (0,5,1) i (1,1), respektivno. Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da je ostvarivi protok kognitivnog sistema veći za veće vrednosti praga interferencije Q_p , jer su u ovom slučaju dozvoljene veće vrednosti predajne snage sekundarnog predajnika i sekundarnog releja.

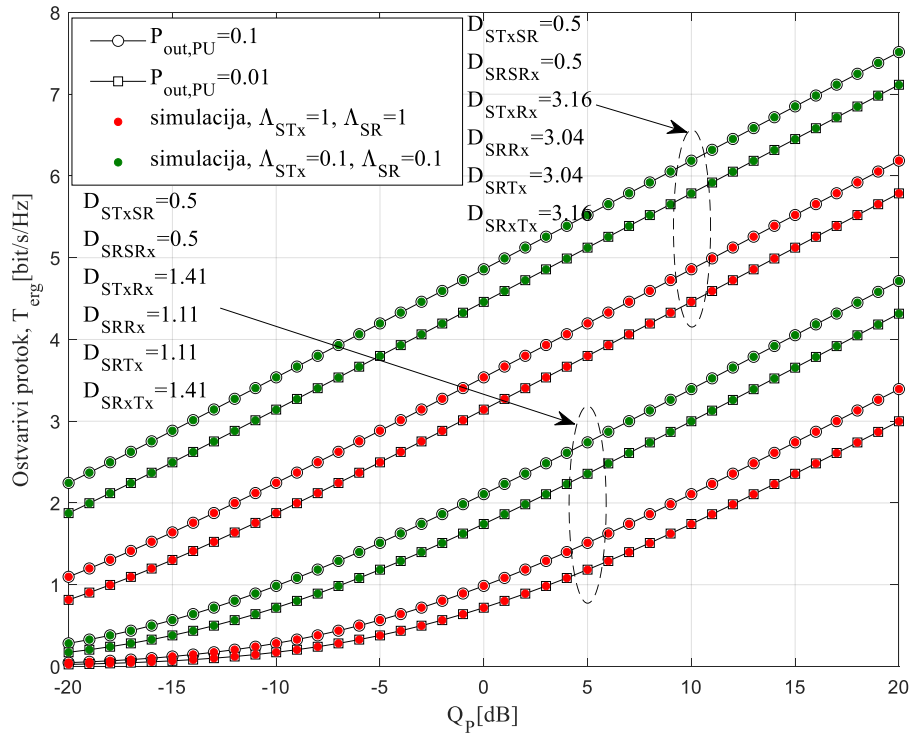
Pored toga, za veće vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$, ostvarivi protok sekundarnog sistema takođe raste, jer veće vrednosti dozvoljene verovatnoće otkaza primarne

mreže kada je prag interferencije Q_p konstantan omogućavaju veće dozvoljene vrednosti predajne snage na sekundarnom predajniku i sekundarnom releju. Kao posledica toga, odnos snage signala i interferencije na sekundarnom releju i na sekundarnom prijemu je veći. Za sve slučajeve koji se posmatraju, mogu se proceniti optimalne vrednosti koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α kada je ostvarivi protok maksimalan. Za vrednosti koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α niže od 0.05, ostvarivi protok raste dok dalje povećanje parametra α dovodi do smanjivanja ostvarivog protoka.



Slika 3.20. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije.

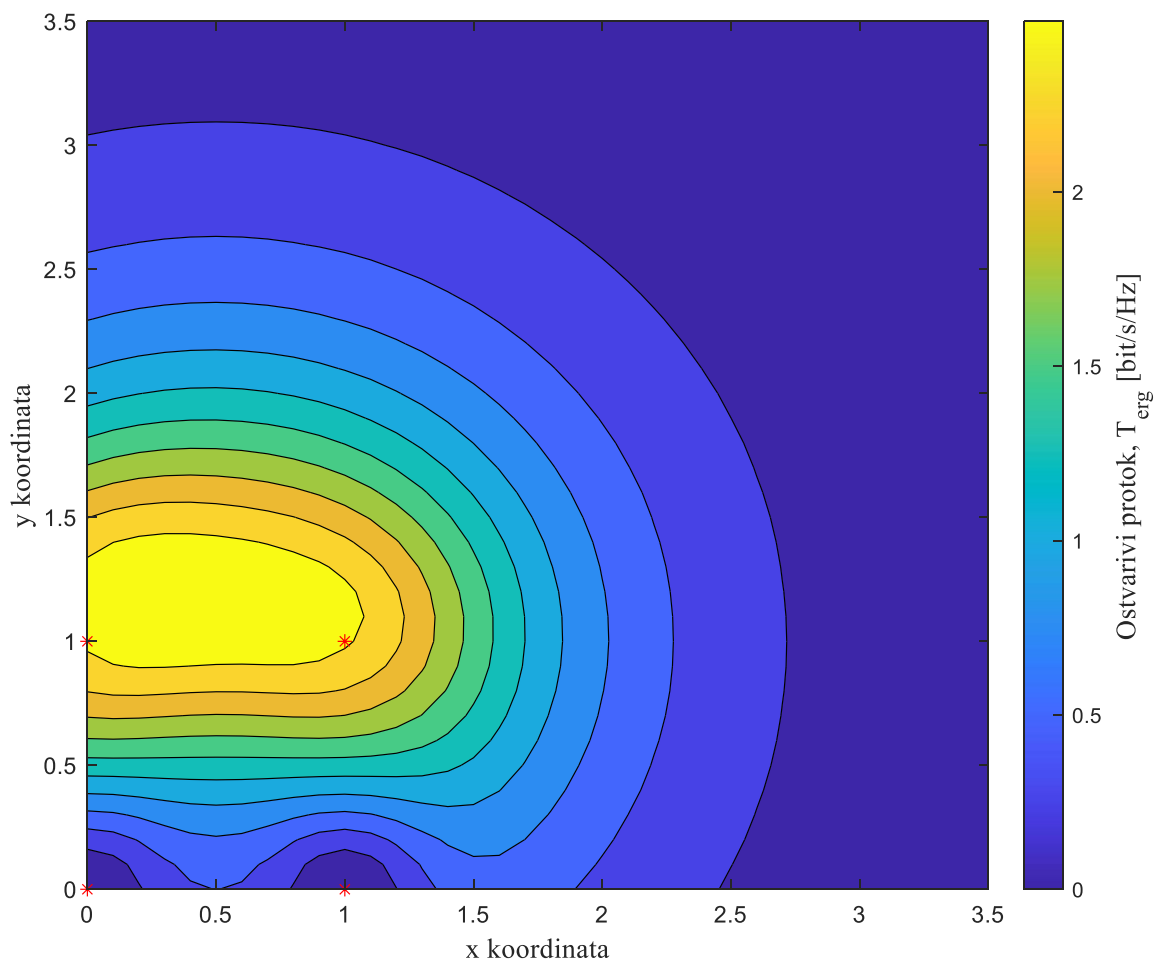
Zavisnost ostvarivog protoka, zasnovanog na ergodičnom kapacitetu, od praga interferencije Q_p predstavljena je na slici 3.21. za različite srednje vrednosti pojačanja snage u kanalima od sekundarnog predajnika i sekundarnog releja do jednog primarnog prijemnika Λ_{STx} i Λ_{SR} . Za manje vrednosti parametara Λ_{STx} i Λ_{SR} , ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu je veći jer su veće maksimalno dozvoljene predajne snage sekundarnog predajnika i sekundarnog releja. Analiziran je i uticaj zavisnosti ostvarivog protoka od rastojanja između čvorova. Razmatrana su dva scenarija sa pozicijama čvorova u sistemu koji definišu rastojanje između primarne i sekundarne mreže. U prvom scenariju pozicije čvorova su definisane kao i u scenariju za sliku 3.20. dok je u drugom scenariju sekundarna mreža na većem rastojanju od primarne mreže. Na slici 3.21. su definisane vrednosti rastojanja između čvorova u mreži, gde je D_{STxRx} rastojanje između sekundarnog predajnika i primarnog prijemnika, D_{SRRx} rastojanje između sekundarnog releja i primarnog prijemnika, D_{SRTx} rastojanje između sekundarnog releja i primarnog predajnika i D_{SRxTx} rastojanje između sekundarnog prijemnika i primarnog predajnika. Zaključeno da se bolje performanse sistema postižu kada je sekundarna mreža na većem rastojanju od primarne mreže, jer je u tom slučaju interferencija na primarnom prijemu manja zbog većeg gubitka na putanji od sekundarne mreže.



Slika 3.21. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite pozicije sekundarne mreže.

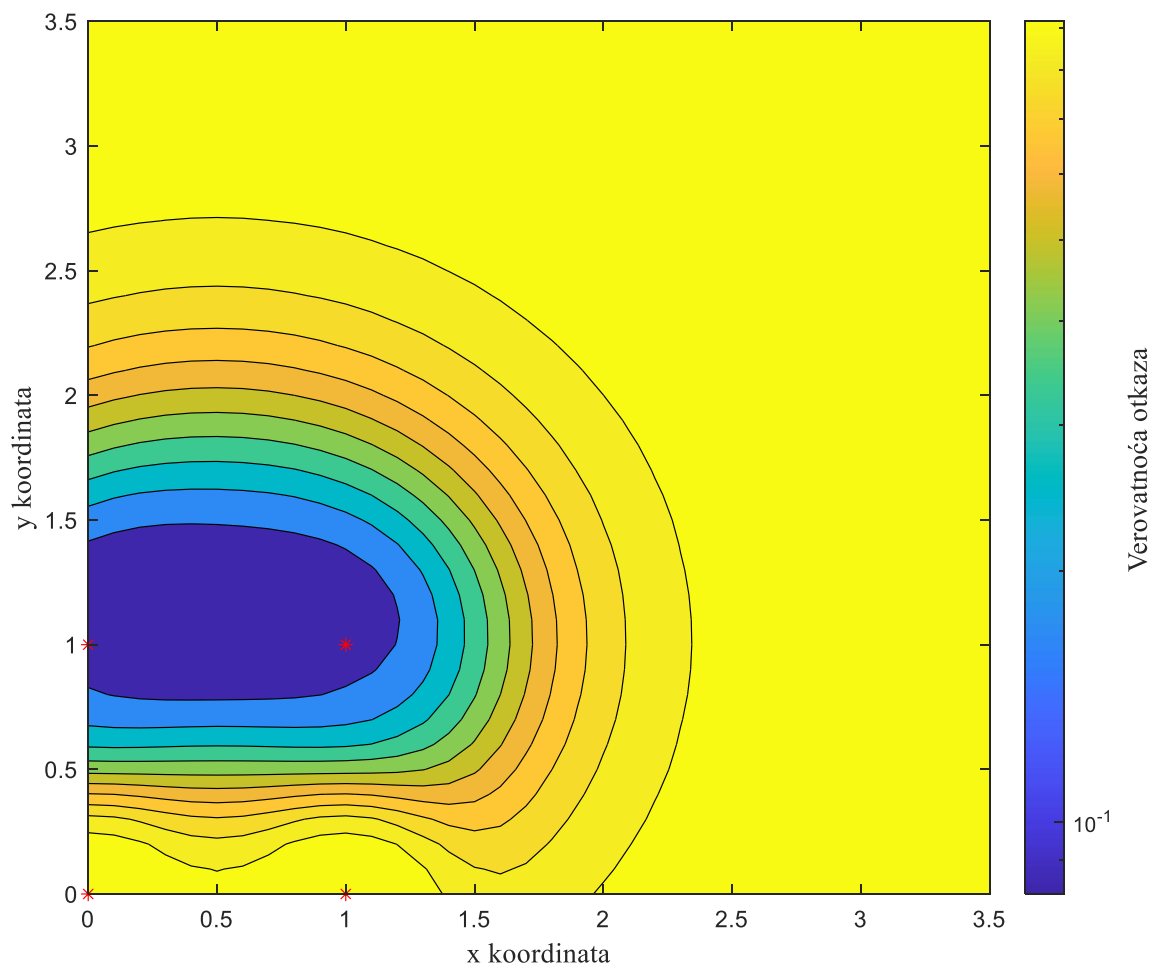
Uticaj položaja sekundarnog releja na performanse sistema prikazan je na slikama 3.22.-3.24. Posmatra se sistem kod kojeg su položaji primarnog i sekundarnog predajnika/prijemnika definisani u Dekartovom koordinatnom sistemu. Položaji primarnog predajnika i primarnog prijemnika su (0,0) i (1,0), respektivno. Sekundarni predajnik i sekundarni prijemnik su postavljeni na pozicije (0,1) i (1,1), respektivno, dok se pozicija sekundarnog releja menja duž x - i y - ose Dekartovog koordinatnog sistema. Prag interferencije je jednak $Q_p = 15$ dB, a verovatnoća otkaza primarne mreže je $P_{out,PU} = 0.01$.

Na slici 3.22. prikazan je uticaj položaja sekundarnog releja na ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu. Analizom dobijenih rezultata može se odrediti optimalna pozicija releja koja rezultuje maksimalnim ostvarivim protokom (0.5,1.3). Može se zaključiti da je optimalna pozicija sekundarnog releja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, dok optimalna y -koordinata pokazuje da se optimalne performanse postižu ako je relej pozicioniran na nešto većoj udaljenosti od primarne mreže. Korišćenjem prikazane analize može se obezbediti maksimalna vrednost ostvarivog protoka identifikacijom optimalnih vrednosti x - i y -koordinata releja, koje zavise od različitih parametara sistema i kanala.

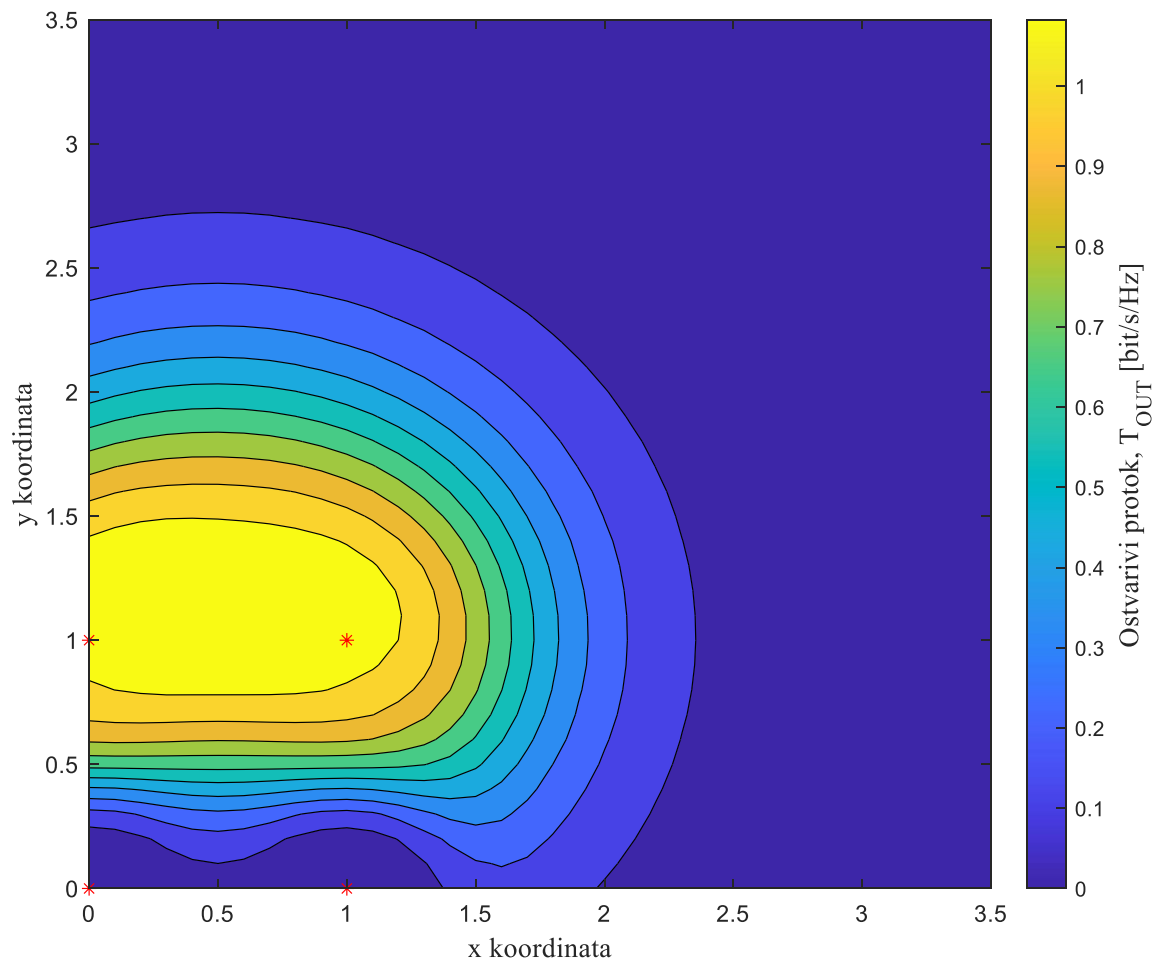


Slika 3.22. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja.

Uticaj položaja sekundarnog releja na verovatnoću otkaza sekundarnog sistema prikazan je na slici 3.23, dok je na slici 3.24. prikazan uticaj položaja sekundarnog releja na ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza. Analizom dobijenih rezultata može se zaključiti da je optimalna lokacija releja kojom se minimizuje verovatnoća otkaza, a maksimizuje vrednost ostvarivog protoka pozicionirana na (0.6,1.2). Optimalna x -koordinata pokazuje da se manja verovatnoća otkaza i veći ostvarivi protok postižu ako se relej nalazi bliže sekundarnom prijemniku u odnosu na sekundarni predajnik. Optimalna y -koordinata pokazuje da se optimalne performanse postižu ako je relej pozicioniran na nešto većoj udaljenosti od primarne mreže. Korišćenjem prikazane analize može se obezbediti minimalna verovatnoća otkaza i maksimalna vrednost ostvarivog protoka identifikacijom optimalnih vrednosti x - i y -koordinata releja, koje zavise od različitih parametara sistema i kanala.



Slika 3.23. – Verovatnoća otkaza u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja.



Slika 3.24. – Ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja.

Dodatak 3-A

Suma N nezavisnih Gama raspodeljenih promenljivih prati χ^2 -raspodelu sa $2N$ stepeni slobode [123] i

$$p_{I_R}(x) = \frac{x^{N-1}}{\Gamma(N)\Omega_{I_R}^N} \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{I_R}}\right), \Omega_{I_R} = E\left[P_{PTx,i} | f_{R_i}|^2\right], \quad (D1)$$

$$p_{I_{R_x}}(x) = \frac{x^{N-1}}{\Gamma(N)\Omega_{I_{R_x}}^N} \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{I_{R_x}}}\right), \Omega_{I_{R_x}} = E\left[P_{PTx,i} | f_{R_x}|^2\right].$$

Kako je slučajna promenljiva ν definisana kao $\nu = \gamma_{STxSR} / I_R$, koristeći [127, jednačina (7-23)], dobija se odgovarajuća funkcija gustine verovatnoće koja se može izračunati primenom izraza

$$p_\nu(\nu) = \int_0^\infty x p_{\gamma_{SR}}(\nu x) p_{I_R}(x) dx. \quad (D2)$$

Dalje, zamenom odgovarajućih izraza za funkciju gustine verovatnoće, dobija se

$$p_\nu(\nu) = \frac{N\Omega_{I_R}}{\Omega_{STxR}} \frac{1}{\left(\frac{\Omega_{I_R}\nu}{\Omega_{STxR}} + 1\right)^{N+1}}. \quad (D3)$$

Na osnovu prethodnog izraza dobija se izraz za funkciju raspodele za slučajnu promenljivu ν koji predstavlja rešenje integrala I_1 i dat je jednačinom

$$I_1 = \Pr\{\nu \leq \gamma_{th}\} = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Omega_{I_R}}{\Omega_{STxR}} \gamma_{th}\right)^N}. \quad (D4)$$

Primenog istog pristupa, dobija se izraz za funkciju gustine verovatnoće slučajne promenljive $w = \gamma_{SRSR_x} / I_{SR_x}$

$$p_w(w) = \frac{N\Omega_{I_{SR_x}}}{\Omega_{SRSR_x}} \frac{1}{\left(\frac{\Omega_{I_{SR_x}} w}{\Omega_{SRSR_x}} + 1\right)^{N+1}}, \quad (D5)$$

dok se odgovarajuća funkcija raspodele može zapisati u sledećem obliku

$$\Pr\{w \leq \gamma_{th}\} = 1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{\Omega_{I_{SR_x}}}{\Omega_{SRSR_x}} \gamma_{th}\right)^N}. \quad (D6)$$

Verovatnoća definisana integralom I_2 može se izračunati na sledeći način

$$I_2 = \Pr \left\{ u \leq \frac{\gamma_{th}}{cw}, w > \frac{\gamma_{th}}{q}, v > \gamma_{th} \right\} = \int_{\frac{\gamma_{th}}{q}}^{\infty} \left(\int_0^{\frac{\gamma_{th}}{cw}} \int_{\gamma_{th}}^{\infty} p_{u,v}(u,v) dv du \right) p_w(w) dw. \quad (D7)$$

Za rešavanje integrala I_2 potrebna je združena funkcija gustine verovatnoće za slučajne promenljive $u = (\gamma_{SR} + I_R)$ i $v = \gamma_{SR} / I_R$. Koristeći $p_{u,v}(u,v) = |J| p_{\gamma_{SR}} \left(\frac{uv}{v+1} \right) p_{I_D} \left(\frac{u}{v+1} \right)$ [127, jednačina (7-37)] i zamenom odgovarajućih funkcija gustine verovatnoće, združena funkcija gustine verovatnoće se nalazi kao

$$p_{u,v}(u,v) = \frac{1}{\Gamma(N) \Omega_{I_{SR}}^N \Omega_{STxSR}} \frac{u^N}{(v+1)^{N+1}} \exp \left(-\frac{1}{\Omega_{STxSR}} \frac{uv}{v+1} \right) \exp \left(-\frac{1}{\Omega_{I_{SR}}} \frac{u}{v+1} \right). \quad (D8)$$

Primenom smene $t = (v+1)^{-1}$ i korišćenjem [123, jednačina (3.351.2)] integral iz izraza D7 može se izraziti u sledećem obliku

$$\int_{\gamma_{th}}^{\infty} p_{u,v}(u,v) dv = \frac{\left(\frac{1}{\Omega_{I_{SR}}} - \frac{1}{\Omega_{STxSR}} \right)^{-N}}{\Gamma(N) \Omega_{I_{SR}}^N \Omega_{STxSR}} \exp \left(-\frac{u}{\Omega_{STxSR}} \right) \left(\Gamma(N) - \Gamma \left(N, \left(\frac{1}{\Omega_{I_{SR}}} - \frac{1}{\Omega_{STxSR}} \right) \frac{u}{1 + \gamma_{th}} \right) \right), \quad (D9)$$

gde je $\Gamma(\cdot, \cdot)$ nekompletna Gama funkcija [129, jednačina (8.350.2)].

Dalje, integracija preko u se vrši korišćenjem razvoja nekompletne Gama funkcije u red [123, jednačina (3.351.2)] i primenom [129, jednačina (3.351.1)]

$$\int_0^{\frac{\gamma_{th}}{cw}} \int_{\gamma_{th}}^{\infty} p_{u,v}(u,v) dv du = \frac{1}{\Omega_{I_{SR}}^N \left(\frac{1}{\Omega_{I_{SR}}} - \frac{1}{\Omega_{STxSR}} \right)^N} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\Omega_{STxSR} cw}} - \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(1 + \gamma_{th}) \Omega_{I_{SR}}}{k! (\gamma_{th} \Omega_{I_{SR}} + \Omega_{STxSR})} \left(\frac{\Omega_{STxSR} - \Omega_{I_{SR}}}{\gamma_{th} \Omega_{I_{SR}} + \Omega_{STxSR}} \right)^k \left(\Gamma(1+k) - \Gamma \left(1+k, \frac{\gamma_{th} \Omega_{I_{SR}} + \Omega_{STxSR}}{\Omega_{STxSR} \Omega_{I_{SR}} (1 + \gamma_{th}) cw} \gamma_{th} \right) \right) \right). \quad (D10)$$

Konačno, integral I_2 je dat sa

$$I_2 = \frac{1}{\Omega_{I_{SR}}^N \left(\frac{1}{\Omega_{I_{SR}}} - \frac{1}{\Omega_{STxSR}} \right)^N} \times \int_{\frac{\gamma_{th}}{q}}^{\infty} \left(1 - e^{-\frac{\gamma_{th}}{\Omega_{STxSR} cw}} - \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(1 + \gamma_{th}) \Omega_{I_{SR}}}{k! (\gamma_{th} \Omega_{I_{SR}} + \Omega_{STxSR})} \left(\frac{\Omega_{STxSR} - \Omega_{I_{SR}}}{\gamma_{th} \Omega_{I_{SR}} + \Omega_{STxSR}} \right)^k \right) \times \left(\Gamma(1+k) - \Gamma \left(1+k, \frac{\gamma_{th} \Omega_{I_{SR}} + \Omega_{STxSR}}{\Omega_{STxSR} \Omega_{I_{SR}} (1 + \gamma_{th}) cw} \gamma_{th} \right) \right) p_w(w) dw. \quad (D11)$$

Integral I_2 se može napisati u obliku

$$I_2 = \Omega_{I_{SR}}^{-N} \left(\frac{1}{\Omega_{I_{SR}}} - \frac{1}{\Omega_{STxSR}} \right)^{-N} \left(I_{21} - I_{22} - \sum_{k=0}^{N-1} \frac{(1+\gamma_{th})\Omega_{I_{SR}}}{k!(\gamma_{th}\Omega_{I_{SR}} + \Omega_{STxSR})} \left(\frac{\Omega_{STxSR} - \Omega_{I_{SR}}}{\gamma_{th}\Omega_{I_{SR}} + \Omega_{STxSR}} \right)^k (\Gamma(1+k)I_{21} - I_{23}) \right), \quad (D12)$$

gde se integrali I_{2k} , $k = 1, 2, 3$ rešavaju na sledeći način:

$$I_{21} = \int_{\frac{\gamma_{th}}{q}}^{\infty} p_w(w) dw, \quad (D13)$$

$$I_{21} = \frac{N\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \int_{\frac{\gamma_{th}}{q}}^{\infty} \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}} w}{\Omega_{SRSRx}} + 1 \right)^{-N-1} dw = \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \frac{\gamma_{th}}{q} + 1 \right)^{-N}, \quad (D14)$$

$$\begin{aligned} I_{22} &= \int_{\frac{\gamma_{th}}{q}}^{\infty} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\Omega_{STxSR} c w}} p_w(w) dw = \\ &= N e^{\frac{\gamma_{th}}{c \Omega_{STxSR}} \frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}}} \sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} (-1)^{N-1-i} \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \right)^{N-i} \times \\ &\left(\left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \right)^{i-N} E_i \left(1-i+N, \frac{\gamma_{th}}{c \Omega_{STxSR}} \frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \right) - \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} + \frac{q}{\gamma_{th}} \right)^{i-N} E_i \left(1-i+N, \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} + \frac{q}{\gamma_{th}} \right) \frac{\gamma_{th}}{c \Omega_{STxSR}} \right) \right), \end{aligned} \quad (D15)$$

$$\begin{aligned} I_{22} &= \int_{\frac{\gamma_{th}}{q}}^{\infty} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\Omega_{STxSR} c w}} p_w(w) dw = \frac{N\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \int_{\frac{\gamma_{th}}{q}}^{\infty} e^{-\frac{\gamma_{th}}{\Omega_{STxSR} c w}} \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}} w}{\Omega_{SRSRx}} + 1 \right)^{-N-1} dw = \\ &= \frac{N\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} e^{\frac{\gamma_{th}}{c \Omega_{STxSR}} \frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}}} \sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} (-1)^{N-1-i} \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \right)^{N-1-i} \\ &\times \left(\left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \right)^{i-N} E_i \left(1-i+N, \frac{\gamma_{th}}{c \Omega_{STxSR}} \frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \right) - \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} + \frac{q}{\gamma_{th}} \right)^{i-N} E_i \left(1-i+N, \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} + \frac{q}{\gamma_{th}} \right) \frac{\gamma_{th}}{c \Omega_{STxSR}} \right) \right), \end{aligned} \quad (D16)$$

$$\begin{aligned} I_{23} &= \int_{\frac{\gamma_{th}}{q}}^{\infty} \Gamma \left(1+k, \frac{\xi}{w} \right) p_w(w) dw = k! \frac{N\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \sum_{j=0}^k \frac{1}{j!} (\xi)^j e^{\frac{\xi \Omega_{I_D}}{\Omega_{RD}}} \sum_{i=0}^{N+j-1} \binom{N+j-1}{i} \left(-\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \right)^{N+j-1-i} \\ &\times \left(\left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \right)^{i-N} E_i \left(1-i+N, \frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \xi \right) - \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} + \frac{q}{\gamma_{th}} \right)^{i-N} E_i \left(1-i+N, \left(\frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} + \frac{q}{\gamma_{th}} \right) \xi \right) \right), \end{aligned} \quad (D17)$$

gde je $\xi = \frac{\gamma_{th} \Omega_{I_R} + \Omega_{STxSR}}{\Omega_{STxSR} \Omega_{I_R} (1 + \gamma_{th})} \frac{\gamma_{th}}{c}$.

Verovatnoća definisana integralom I_3 je jednaka

$$\begin{aligned}
 I_3 &= \Pr \left\{ w \leq \frac{\gamma_{th}}{q}, v > \gamma_{th} \right\} = \Pr \left\{ w \leq \frac{\gamma_{th}}{q} \right\} \Pr \{ v > \gamma_{th} \} \\
 &= \left(1 - \left(1 + \frac{\Omega_{I_{Rx}}}{\Omega_{SRSRx}} \frac{\gamma_{th}}{q} \right)^{-N} \right) \left(1 + \frac{\Omega_{I_R}}{\Omega_{STxSR}} \gamma_{th} \right)^{-N}.
 \end{aligned} \tag{D18}$$

4. Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa bežičnim prenosom energije i statističkom informacijom o stanju u kanalu sa mobilnim prijemnikom

Kako korisnici u bežičnim telekomunikacionim sistemima najčešće nisu fiksno pozicionirani, već se kreću, u okviru ove glave izložena je analiza performansi kooperativnih kognitivnih sistema u kojima je sekundarni prijemnik mobilan. Kao i u prethodnoj glavi disertacije, analizira se kognitivni sistem, gde sekundarni korisnici koriste spektralne resurse primarnih korisnika, pod uslovima dozvoljenog premašenja interferencije koje definiše primarna mreža, u okolnostima poznavanja statističke informacije o stanju u kanalu ka primarnom prijemniku. Razmatrana su dva scenarija. U prvom scenariju prenos informacija između predajnika i prijemnika se vrši direktno, a bežični prenos energije do predajnika obavlja se sa namenskog RF izvora energije. U drugom scenariju prenos informacija između predajnika i prijemnika odvija se posredstvom releja.

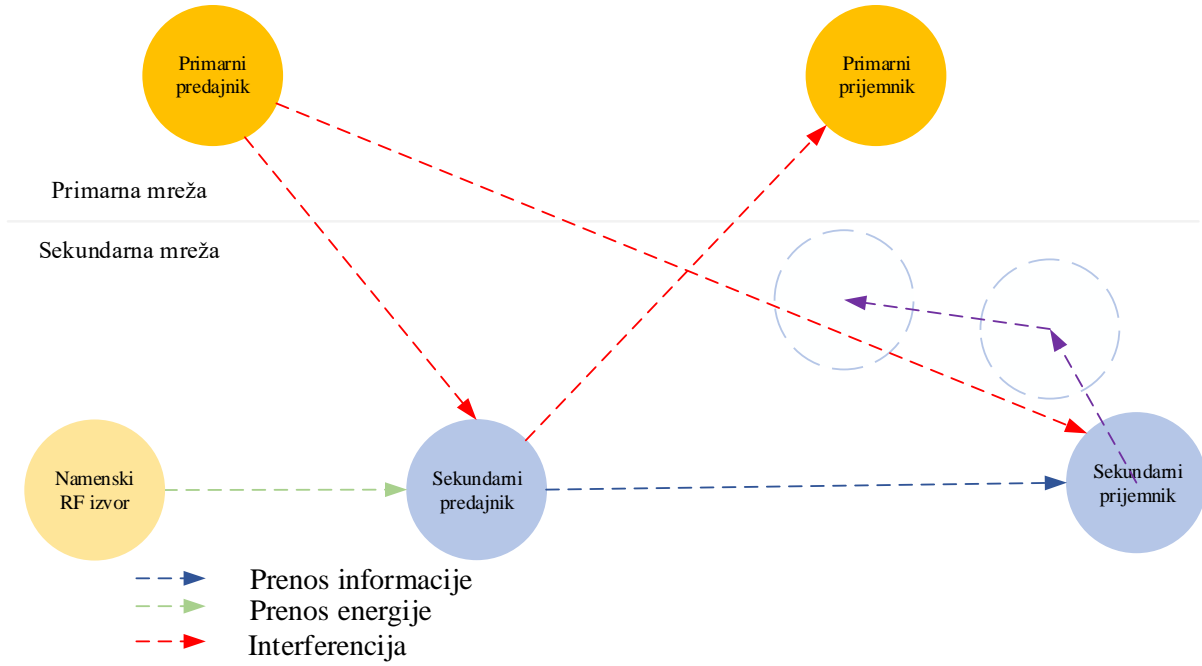
4.1 Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom

Na slici 4.1. je prikazan kooperativni kognitivni radio sistem sa bežičnim napajanjem koji je predmet analize. Sekundarna mreža se sastoji od sekundarnog predajnika koji prikuplja energiju iz namenskog RF izvora za napajanje i sekundarnog prijemnika koji je mobilan.

Posmatra se generalan slučaj kada anvelope fedinga u kanalima od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika, kao i od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika prate Nakagami- m zakon raspodele. Obzirom da se sekundarni predajnik ne kreće, odgovarajuća funkcija gustine verovatnoće može se predstaviti jednačinom (3.1). Dalje, uzimajući u obzir kretanje sekundarnog prijemnika i promenljivo rastojanje, r , između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika opisano jednačinom (2.44), funkcija gustine verovatnoće trenutnog pojačanja snage kanala izražena je jednačinom

$$f_{\gamma_2}(x) = \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_2}{\Omega_2} \right)^{m_2} x^{m_2-1} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2 \delta + \beta_i + 1} {}_1F_1 \left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, 1 + m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, -\frac{m_2 x}{\Omega_2} \right), \quad (4.1)$$

gde Ω_2 i m_2 označavaju Nakagami- m parametre fedinga u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika, pri čemu je $\gamma_2 = |h_{STxSRx}|^2 r^{-\delta}$ i $\Omega_2 = E[|h_{STxSRx}|^2 D_{STxSRx}^{-\delta}]$, dok je D_{STxSRx} maksimalno rastojanje između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika.



Slika 4.1. – Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom.

4.1.1 Performanse kooperativnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom

Rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika, D_{PBSTx} , je fiksno, pa se primljeni signal na sekundarnom predajniku može predstaviti jednačinom (2.8), a prikupljena energija jednačinom (2.9). U skladu sa prikupljenom energijom i preostalim vremenom korišćenim za prenos signala, raspoloživa snaga prenosa za emitovanje predajnog signala data je jednačinom (2.10). Rastojanje između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika je promenljivo i jednako r .

Tada se prijemni signal na sekundarnom prijemniku može zapisati u obliku

$$y_{SRx} = \sqrt{\frac{P_{STx,EH}}{r^\delta}} h_{STxSRx} x_{STx} + n_{SRx}. \quad (4.2)$$

Trenutni odnos signal/šum γ_{SRx} na sekundarnom prijemniku može se opisati sledećom jednačinom

$$\gamma_{SRx} = \frac{P_{STx,EH} |h_{STxSRx}|^2}{r^\delta \sigma_{SRx}^2} = \frac{\eta \alpha P_{PB}}{(1-\alpha) D_{PBSTx}^\delta} |h_{PBSTx}|^2 \frac{|h_{STxSRx}|^2}{r^\delta \sigma_{SRx}^2} = K_1 |h_{PBSTx}|^2 \frac{|h_{STxSRx}|^2}{r^\delta}, \quad (4.3)$$

gde je $K_1 = \frac{\eta \alpha P_{PB}}{\sigma_{SRx}^2 (1-\alpha) D_{PBSTx}^\delta}$.

Koristeći jednačinu (3.29) može se dalje predstaviti izraz za trenutni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku

$$\gamma_{SRx} = \gamma_{K_1} \gamma_1. \quad (4.4)$$

Koristeći transformacije slučajne promenljive, funkcija gustine verovatnoće slučajne promenljive $\gamma_{K_1} = K_1 \gamma_1$, može se odrediti primenom $f_{\gamma_{K_1}}(x) = \frac{1}{K_1} f_{\gamma_1}\left(\frac{x}{K_1}\right)$ [127, jednačina (5-7)] i dalje prikazati u obliku

$$f_{\gamma_{K_1}}(x) = \frac{1}{K_1^{m_2}} \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} x^{m_2-1} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2 \delta + \beta_i + 1} \times {}_1F_1\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, 1 + m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, -\frac{m_2 x}{K_1 \Omega_2}\right). \quad (4.5)$$

Korišćenjem izraza (3.31) i jednačina (4.1) i (4.5) dobija se funkcija gustine verovatnoće trenutnog odnosa signal/šum na sekundarnom prijemniku

$$f_{\gamma_{SRx}}(u) = \frac{1}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} \frac{u^{m_2-1}}{K_1^{m_2}} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2 \delta + \beta_i + 1} I_1, \quad (4.6)$$

gde je odgovarajući integral

$$I_1 = \int_0^{\infty} w^{m_1 - m_2 - 1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} w\right) {}_1F_1\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, 1 + m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, -\frac{m_2 u}{K_1 \Omega_2 w}\right) dw. \quad (4.7)$$

Primenom transformacije elementarne funkcije u Mejerovu, a zatim korišćenjem [128, (01.03.26.0004.01)] i [129, jednačina (1.211-1)] i uz pomoć [128, (07.20.26.0006.01)], integral I_1 se može zapisati kao

$$I_1 = \frac{\Gamma\left(1 + m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}\right)}{\Gamma\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}\right)} \int_0^{\infty} G_{1,2}^{1,1}\left(\frac{m_2 u}{w K_1 \Omega_2} \left| \begin{matrix} 1 - m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \\ 0, -m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \end{matrix} \right. \right) w^{m_1 - m_2 - 1} G_{0,1}^{1,0}\left(\frac{m_1}{\Omega_1} w \left| 0 \right.\right) dw. \quad (4.8)$$

Primenom transformacije [128, (07.34.17.0012.01)] dalje se dobija

$$G_{1,2}^{1,1}\left(\frac{m_2 u}{w K_1 \Omega_2} \left| \begin{matrix} 1 - m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \\ 0, -m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \end{matrix} \right. \right) = G_{2,1}^{1,1}\left(\frac{w K_1 \Omega_2}{m_2 u} \left| \begin{matrix} 1, 1 + m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta} \\ m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta} \end{matrix} \right. \right), \quad (4.9)$$

pa se integral I_1 može zapisati u sledećem obliku

$$I_1 = \frac{\Gamma\left(1+m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{\Gamma\left(m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)} \times \int_0^\infty G_{2,1}^{1,1} \left(\frac{wK_1\Omega_2}{m_2u} \middle| \begin{matrix} 1, & 1+m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta} \\ m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta} \end{matrix} \right) w^{m_1-m_2-1} G_{0,1}^{1,0} \left(\frac{m_1}{\Omega_1} w \middle| 0 \right) dw. \quad (4.10)$$

Konačno, primenom transformacije [128, (07.34.21.0009.01)] može se dobiti rešenje integrala I_1 u zatvorenom obliku

$$I_1 = \frac{\Gamma\left(1+m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{\Gamma\left(m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)} \left(\frac{K_1\Omega_2}{m_2u}\right)^{m_2-m_1} G_{1,3}^{2,1} \left(\frac{m_1m_2u}{K_1\Omega_1\Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1-m_1-\frac{\beta_i+1}{\delta} \\ 0, m_2-m_1, -m_1-\frac{\beta_i+1}{\delta} \end{matrix} \right). \quad (4.11)$$

Sada se izraz za funkciju gustine verovatnoće trenutnog odnosa signal/šum na sekundarnom prijemu može zapisati na sledeći način

$$f_\gamma(u) = C \frac{u^{m_2-1}}{K_1^{m_2}} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2\delta + \beta_i + 1} \frac{\Gamma\left(1+m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{\Gamma\left(m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)} \left(\frac{K_1\Omega_2}{m_2u}\right)^{m_2-m_1} G_{1,3}^{2,1} \left(\frac{m_1m_2u}{K_1\Omega_1\Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1-m_1-\frac{\beta_i+1}{\delta} \\ 0, m_2-m_1, -m_1-\frac{\beta_i+1}{\delta} \end{matrix} \right), \quad (4.12)$$

gde je $C = \frac{1}{\Gamma(m_1)} \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2}$.

Funkcija raspodele za slučajnu promenljivu γ_{SRx} , odnosno verovatnoća otkaza sekundarne mreže može se odrediti primenom

$$P_{OUT}(\gamma_{th}) = F_{\gamma_{SRx}}(\gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_{SRx}}(u) du. \quad (4.13)$$

Zamenom (4.12) u (4.13) funkcija raspodele se može izraziti na sledeći način

$$F_\gamma(\gamma_{th}) = C \frac{1}{K_1^{m_1}} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2\delta + \beta_i + 1} \frac{\Gamma\left(1+m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{\Gamma\left(m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)} \left(\frac{\Omega_2}{m_2}\right)^{m_2-m_1} I_2, \quad (4.14)$$

gde je

$$I_2 = \int_0^{\gamma_{th}} G_{1,3}^{2,1} \left(\frac{m_1 m_2 u}{K_1 \Omega_1 \Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1 - m_1 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \\ 0, m_2 - m_1, -m_1 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \end{matrix} \right) u^{m_1 - 1} du. \quad (4.15)$$

Integral I_2 može se rešiti primenom [128, (07.34.21.0084.01)], nakon čega se dobija

$$I_2 = \gamma_{th}^{m_1} G_{2,4}^{2,2} \left(\frac{m_1 m_2 \gamma_{th}}{K_1 \Omega_1 \Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1 - m_1, 1 - m_1 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \\ 0, m_2 - m_1, -m_1 - \frac{\beta_i + 1}{\delta}, -m_1 \end{matrix} \right). \quad (4.16)$$

Transformacijom iz jednačine (3.25) i smenom u jednačinu (3.23) ergodični kapacitet se može zapisati u sledećem obliku

$$C_{erg} = \frac{1}{\ln 2} C \frac{1}{K_1^{m_1}} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2 \delta + \beta_i + 1} \frac{\Gamma\left(1 + m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}\right)}{\Gamma\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}\right)} \left(\frac{\Omega_2}{m_2}\right)^{m_2 - m_1} \int_0^{\infty} u^{m_1 - 1} G_{1,3}^{2,1} \left(\frac{m_1 m_2 u}{K_1 \Omega_1 \Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1 - m_1 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \\ 0, m_2 - m_1, -m_1 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \end{matrix} \right) G_{2,2}^{1,2} \left(u \middle| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right) du. \quad (4.17)$$

Korišćenjem [128, (07.34.21.0011.01)] dobija se konačni izraz za ergodični kapacitet

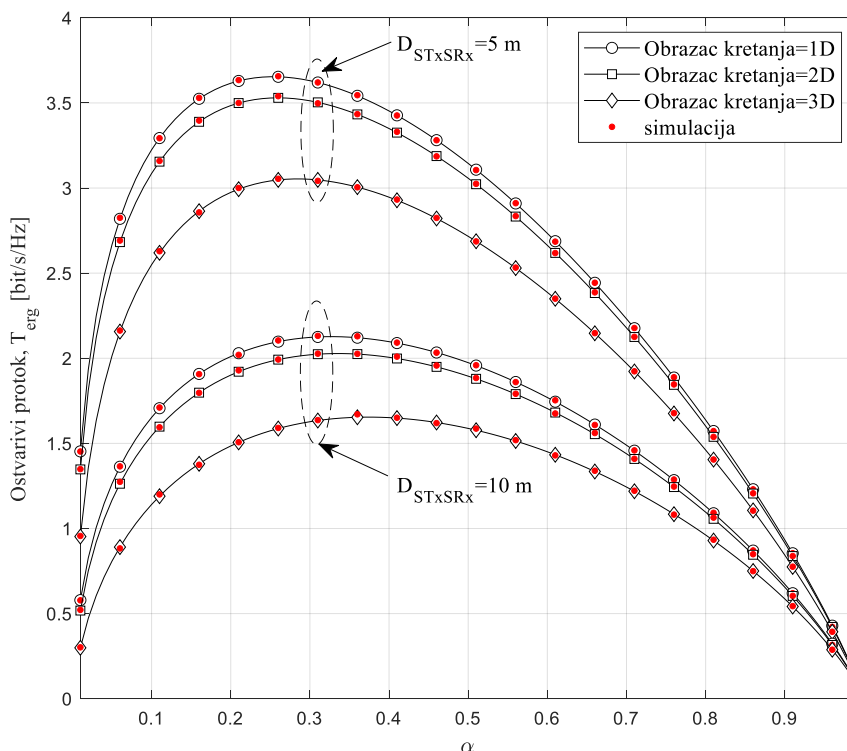
$$C_{erg} = \frac{1}{\ln 2} C \frac{1}{K_1^{m_1}} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2 \delta + \beta_i + 1} \frac{\Gamma\left(1 + m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}\right)}{\Gamma\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}\right)} \left(\frac{\Omega_2}{m_2}\right)^{m_2 - m_1} G_{3,5}^{4,2} \left(\frac{m_1 m_2}{K_1 \Omega_1 \Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1 - m_1 - \frac{\beta_i + 1}{\delta}, -m_1, 1 - m_1 \\ 0, m_2 - m_1, -m_1, -m_1 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \end{matrix} \right). \quad (4.18)$$

U narednom delu su prikazani numerički rezultati dobijeni primenom izvedenih analitičkih izraza. Dobijene vrednosti su upoređene sa rezultatima dobijenim putem nezavisnog simulacionog modela. Varirani su različiti parametri od kojih zavise performanse sistema i izvršena je analiza dobijenih rezultata. Za predloženi sistem izvršena je analiza ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu. Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu je izračunat koristeći jednačine (3.24) i (4.17). Rezultati dobijeni analitičkim putem su u saglasnosti sa rezultatima dobijenim simulacionim postupkom, čime se potvrđuje validnost izvedenih analitičkih izraza.

Zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α prikazana je na slici 4.2. Ostvarivi protok je analiziran za različite vrednosti maksimalnog rastojanja od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} , kao i za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika: duž putanje linije, unutar kruga ili unutar sfere. Pojačanje snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika Ω_1 je 20 dB, pojačanje snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika Ω_2 je 20 dB, a predajna snaga namenskog izvora energije 20 dB. Koeficijent efikasnosti konverzije energije 0.9. Rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika je

$D_{PBSTx} = 10$ m. Nakagami- m parametar u kanalu između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika m_1 iznosi 1, kao i Nakagami- m parametar u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika.

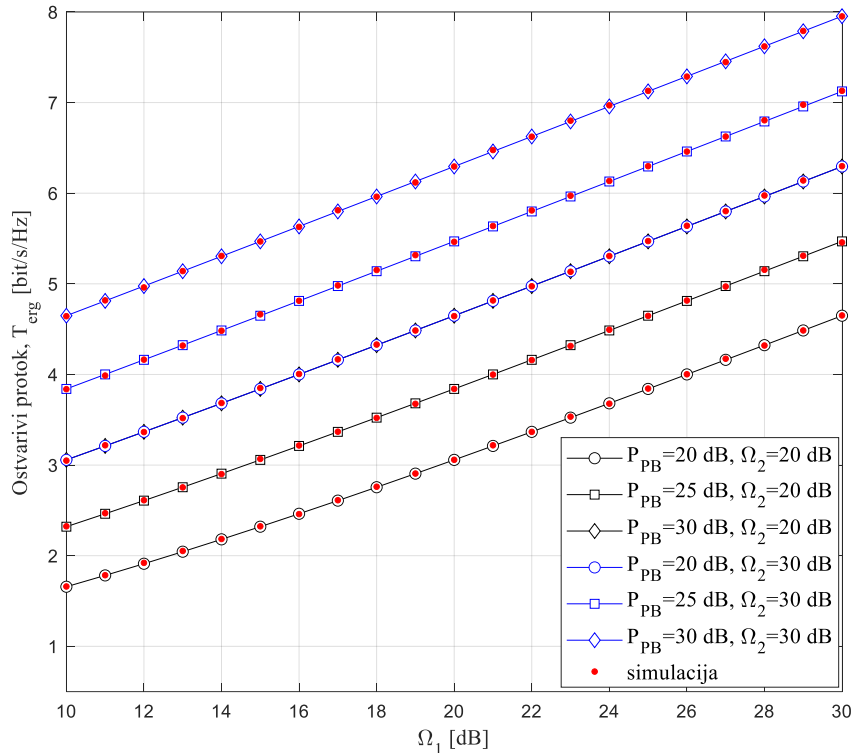
U svim analiziranim scenarijima, ostvarivi protok raste za niže vrednosti koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α , potom dostiže svoj maksimum nakon čega počinje da opada, jer iako veća vrednost α rezultira većom prikupljenom energijom na sekundarnom predajniku, dominantni uticaj ima manja količina vremena dodeljena prenosu informacija. Ostvarivi protok je veći za manje rastojanje između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, jer je u tom slučaju veći odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku. Može se primetiti da se najbolji rezultati postižu kada se kretanje sekundarnog prijemnika može opisati obrascem kretanja duž putanje linije.



Slika 4.2. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u funkciji koeficijenta α , za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika.

Na slici 4.3. prikazani su rezultati analize ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu u funkciji pojačanja snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika Ω_1 . Rastojanje od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika D_{PBSTx} i maksimalno rastojanje od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} su fiksni i iznose 10 m i 5 m, respektivno, dok je kretanje sekundarnog prijemnika opisano korišćenjem 2D obrasca kretanja. Analiza rezultata je izvršena za različite vrednosti predajne snage namenskog izvora energije P_{PB} , kao i za različite vrednosti pojačanja snage u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika Ω_2 . Koeficijent vremenskog udela pri prikupljanju energije je $\alpha = 0.5$, a koeficijent efikasnosti konverzije energije 0.9. Nakagami- m parametar u kanalu između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika m_1 iznosi 1, kao i Nakagami- m parametar u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika. Povećanje predajne snage namenskog izvora energije dovodi do povećanja ostvarivog protoka koji raste i sa porastom pojačanja snage u kanalima kojima se vrši prenos energije do sekundarnog predajnika Ω_1 i informacije do

sekundarnog prijemnika Ω_2 . Sa povećanjem predajne snage namenskog izvora energije povećava se prikupljena energija na sekundarnom predajniku i samim tim veća je predajna snaga sekundarnog predajnika što dovodi do veće prijemne snage na sekundarnom prijemniku i većeg odnosa signal/šum.



Slika 4.3. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od pojačanja snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika Ω_1 .

4.1.2 Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom

U ovom poglavlju predstavljena je analiza performansi sistema u kojem je sekundarnim korisnicima ograničena predajna snaga zbog interferencije na primarnim korisnicima. Sekundarni prijemnik je mobilan, dok su ostali korisnici u mreži fiksno pozicionirani.

Maksimalna raspoloživa snaga prenosa za emitovanje signala sa sekundarnog predajnika je predstavljena jednačinom (2.10). Zbog ograničenja primarne mreže, snaga prenosa kognitivnog predajnika ne bi trebalo da pređe maksimalnu dozvoljenu vrednost, koja je definisana jednačinom (2.5), čime se garantuje ograničenje maksimalnog dozvoljenog premašenja interferencije. Koeficijent k_{STx} prilagođava snagu prenosa sekundarnog predajnika u skladu sa pragom interferencije Q_p i prosečnom vrednošću pojačanja snage kanala na linku od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika, tako da se ne prekorači maksimalna dozvoljena verovatnoća otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$. Uzimajući u obzir ova ograničenja, predajna snaga sekundarnog predajnika data je kao minimum vrednosti maksimalne raspoložive i maksimalne dozvoljene snage i predstavljena je jednačinom (2.11).

Primljeni signal na sekundarnom prijemniku kada je sekundarni prijemnik fiksiran je predstavljen jednačinom (2.6) dok se u slučaju mobilnog sekundarnog prijemnika može predstaviti u obliku

$$y_{SRx} = \sqrt{\frac{P_{STx,\max}}{r^\delta}} h_{STxSRx} x_{STx} + n_{SRx}. \quad (4.19)$$

Trenutni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku određen je sledećim izrazom

$$\gamma_{SRx} = \frac{P_{STx,\max} |h_{STxSRx}|^2}{r^\delta \sigma_{SRx}^2} = \begin{cases} K_1 |h_{PBSTx}|^2 \frac{|h_{STxSRx}|^2}{r^\delta}, & |h_{PBSTx}|^2 \leq Q, \\ K_2 \frac{|h_{STxSRx}|^2}{r^\delta}, & |h_{PBSTx}|^2 > Q, \end{cases} \quad (4.20)$$

gde je $K_1 = \frac{\eta \alpha P_{PB}}{\sigma_{SRx}^2 (1-\alpha) D_{PBSTx}^\delta}$, $K_2 = k_{STx} \frac{Q_p}{\sigma_{SRx}^2 \Lambda_{STx}}$, $Q = k_{STx} \frac{Q_p}{\Lambda_{STx} K_1}$.

Izraz za trenutni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku se može predstaviti jednačinom (3.3), pri čemu funkcija gustine verovatnoće slučajne promenljive γ_{K_2} , ima oblik

$$f_{\gamma_{K_2}}(x) = \frac{1}{K_i^{m_2}} \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} x^{m_2-1} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2 \delta + \beta_i + 1} {}_1F_1\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, 1 + m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, -\frac{m_2 x}{K_i \Omega_2}\right). \quad (4.21)$$

Funkcija gustine verovatnoće slučajne promenljive γ_{SRx} , data je sa jednačinom (3.6) i korišćenjem izraza (3.1) i (4.20) može se predstaviti u sledećem obliku

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{SRx}}(u) &= \frac{1}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} \frac{u^{m_2-1}}{K_1^{m_2}} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2 \delta + \beta_i + 1} I_1 \\ &+ \frac{1}{\Gamma(m_1)\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} \frac{u^{m_2-1}}{K_2^{m_2}} \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2 \delta + \beta_i + 1} \\ &\times {}_1F_1\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, 1 + m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, -\frac{m_2 u}{K_2 \Omega_2}\right) I_2, \end{aligned} \quad (4.22)$$

gde su odgovarajući integrali

$$I_1 = \int_0^Q {}_1F_1\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, 1 + m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta}, -\frac{m_2 u}{K_1 \Omega_2 w}\right) w^{m_1 - m_2 - 1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} w\right) dw \quad (4.23)$$

i

$$I_2 = \int_Q^\infty w^{m_1 - 1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} w\right) dw. \quad (4.24)$$

Integral I_1 može se rešiti primenom [129, jednačina (1.211-1)] i [128, (07.20.26.0006.01)] nakon čega se dobija

$$I_1 = \frac{\Gamma\left(1+m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{\Gamma\left(m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^k \times \int_0^Q w^{m_1-m_2+k-1} G_{1,2}^{1,1} \left(\begin{matrix} \frac{m_2 u}{w K_1 \Omega_2} \\ 0, -m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta} \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1-m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta} \\ \end{matrix} \right) dw. \quad (4.25)$$

Primenom transformacije [128, (07.34.17.0012.01)] dalje se dobija

$$G_{1,2}^{1,1} \left(\begin{matrix} \frac{m_2 u}{w K_1 \Omega_2} \\ 0, -m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta} \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1-m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta} \\ \end{matrix} \right) = G_{2,1}^{1,1} \left(\begin{matrix} w K_1 \Omega_2 \\ m_2 u \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1, 1+m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta} \\ m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta} \end{matrix} \right), \quad (4.26)$$

pa se integral I_1 može zapisati u sledećem obliku

$$I_1 = \frac{\Gamma\left(1+m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{\Gamma\left(m_2+\frac{\beta_i+1}{\delta}\right)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^k \times \int_0^Q G_{2,1}^{1,1} \left(\begin{matrix} w K_1 \Omega_2 \\ m_2 u \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1, 1+m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta} \\ m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta} \end{matrix} \right) w^{m_1-m_2+k-1} dw, \quad (4.27)$$

dok se primenom transformacije [128, (07.34.21.0085.01)] dobija konačno rešenje integrala u zatvorenom obliku

$$I_1 = \left(m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}\right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^k \times Q^{m_1-m_2+k} G_{3,2}^{1,2} \left(\begin{matrix} \frac{K_1 \Omega_2 Q}{m_2 u} \\ \end{matrix} \middle| \begin{matrix} 1-m_1+m_2-k, 1, 1+m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta} \\ m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}, m_2 - m_1 - k \end{matrix} \right). \quad (4.28)$$

Rešenje integrala I_2 dobija se uvođenjem smene $x = \frac{m_1}{\Omega_1} w$ i primenom [129, jednačina (8.350.2)], nakon čega se dobija sledeći izraz u zatvorenom obliku

$$I_2 = \left(\frac{\Omega_1}{m_1}\right) \Gamma\left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q\right). \quad (4.29)$$

Konačni izraz za funkciju gustine verovatnoće trenutnog odnosa signal/šum na sekundarnom prijemniku je

$$\begin{aligned}
f_{\gamma_{SRx}}(u) &= C \frac{u^{m_2-1}}{K_1^{m_2}} \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^k B_i \frac{\left(m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{m_2\delta + \beta_i + 1} \\
&\quad \times Q^{m_1-m_2+k} G_{3,2}^{1,2} \left(\frac{K_1\Omega_2 Q}{m_2 u} \left| \begin{array}{l} 1-m_1+m_2-k, \quad 1, \quad 1+m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta} \\ m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}, \quad m_2-m_1-k \end{array} \right. \right) \\
&\quad + C \frac{u^{m_2-1}}{K_2^{m_2}} \left(\frac{\Omega_1}{m_1}\right)^{m_1} \Gamma\left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q\right) \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2\delta + \beta_i + 1} \\
&\quad \times {}_1F_1\left(m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}, 1+m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}, -\frac{m_2 u}{K_2\Omega_2}\right),
\end{aligned} \tag{4.30}$$

gde je $C = \frac{1}{\Gamma(m_1)} \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2}$.

Funkcija raspodele za slučajnu promenljivu γ_{SRx} se može izraziti na sledeći način

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{SRx}}(\gamma_{th}) &= \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma}(u) du = C \frac{1}{K_1^{m_2}} \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^k B_i \frac{\left(m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{m_2\delta + \beta_i + 1} Q^{m_1-m_2+k} I_3 \\
&\quad + C \frac{1}{K_2^{m_2}} \left(\frac{\Omega_1}{m_1}\right)^{m_1} \Gamma\left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q\right) \sum_{i=1}^n \frac{B_i}{m_2\delta + \beta_i + 1} I_4,
\end{aligned} \tag{4.31}$$

gde je

$$I_3 = \int_0^{\gamma_{th}} u^{m_2-1} G_{3,2}^{1,2} \left(\frac{K_1\Omega_2 Q}{m_2 u} \left| \begin{array}{l} 1-m_1+m_2-k, \quad 1, \quad 1+m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta} \\ m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}, \quad m_2-m_1-k \end{array} \right. \right) du \tag{4.32}$$

i

$$I_4 = \int_0^{\gamma_{th}} u^{m_2-1} {}_1F_1\left(m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}, 1+m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}, -\frac{m_2 u}{K_2\Omega_2}\right) du. \tag{4.33}$$

Primenom transformacije [128, (07.34.17.0012.01)] i [128, (07.34.21.0084.01)] dobija se rešenje integrala I_3 u zatvorenom obliku

$$I_3 = \gamma_{th}^{m_2} G_{3,4}^{2,2} \left(\frac{m_2 \gamma_{th}}{K_1 \Omega_2 Q} \left| \begin{array}{l} 1-m_2, \quad 1-m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta}, \quad 1-m_2+m_1+k \\ m_1-m_2+k, \quad 0, \quad -m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta}, \quad -m_2 \end{array} \right. \right). \quad (4.34)$$

Integral I_4 se rešava transformacijom hipergeometrijske funkcije u Mejerovu funkciju pomoću jednačine [128, (07.20.26.0006.01)]

$$I_4 = \frac{\Gamma\left(1+m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{\Gamma\left(m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}\right)} \int_0^{\gamma_{th}} u^{m_2-1} G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_2 u}{K_2 \Omega_2} \left| \begin{array}{l} 1-m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta} \\ 0, \quad -m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta} \end{array} \right. \right) du, \quad (4.35)$$

dok se konačni izraz dobija korišćenjem identiteta [128, (07.34.21.0084.01)]

$$I_4 = \left(m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}\right) \gamma_{th}^{m_2} G_{2,3}^{1,2} \left(\frac{m_2 \gamma_{th}}{K_2 \Omega_2} \left| \begin{array}{l} 1-m_2, \quad 1-m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta} \\ 0, \quad -m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta}, \quad -m_2 \end{array} \right. \right). \quad (4.36)$$

Konačno, izraz za verovatnoću otkaza sekundarne mreže može se napisati u sledećem obliku

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{srk}}(\gamma_{th}) &= C \frac{\gamma_{th}^{m_2}}{K_1^{m_2}} \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^k B_i \frac{\left(m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{m_2 \delta + \beta_i + 1} Q^{m_1 - m_2 + k} \\ &\quad \times G_{3,4}^{2,2} \left(\frac{m_2 \gamma_{th}}{K_1 \Omega_2 Q} \left| \begin{array}{l} 1-m_2, \quad 1-m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta}, \quad 1-m_2+m_1+k \\ m_1-m_2+k, \quad 0, \quad -m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta}, \quad -m_2 \end{array} \right. \right) \\ &\quad + C \frac{\gamma_{th}^{m_2}}{K_2^{m_2}} \left(\frac{\Omega_1}{m_1}\right)^{m_1} \Gamma\left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q\right) \sum_{i=1}^n B_i \frac{\left(m_2 + \frac{\beta_i+1}{\delta}\right)}{m_2 \delta + \beta_i + 1} \\ &\quad \times G_{2,3}^{1,2} \left(\frac{m_2 \gamma_{th}}{K_2 \Omega_2} \left| \begin{array}{l} 1-m_2, \quad 1-m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta} \\ 0, \quad -m_2 - \frac{\beta_i+1}{\delta}, \quad -m_2 \end{array} \right. \right). \end{aligned} \quad (4.37)$$

Predstavljanjem logaritamske funkcije pomoću Mejerove funkcije dobija se izraz za ergodični kapacitet

$$\begin{aligned}
C_{erg} &= \frac{1}{\log_e 2} \int_0^{\infty} \log_e (1+u) f_{\gamma}(u) du \\
&= \frac{1}{\ln 2} \frac{C}{K_1^{m_2}} \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^k B_i \frac{\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta} \right)}{m_2 \delta + \beta_i + 1} Q^{m_1 - m_2 + k} \\
&\quad \times \int_0^{\infty} u^{m_2 - 1} G_{2,2}^{1,2} \left(u \left| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right. \right) G_{2,3}^{2,1} \left(\frac{m_2 u}{K_1 \Omega_2 Q} \left| \begin{matrix} 1 - m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta}, & 1 - m_2 + m_1 + k \\ m_1 - m_2 + k, & 0, & -m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \end{matrix} \right. \right) du \\
&+ \frac{1}{\ln 2} \frac{C}{K_2^{m_2}} \left(\frac{\Omega_1}{m_1} \right)^{m_1} \Gamma \left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q \right) \sum_{i=1}^n B_i \frac{\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta} \right)}{m_2 \delta + \beta_i + 1} \\
&\quad \times \int_0^{\infty} u^{m_2 - 1} G_{2,2}^{1,2} \left(u \left| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right. \right) G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_2 u}{K_2 \Omega_2} \left| \begin{matrix} 1 - m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \\ 0, & -m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \end{matrix} \right. \right) du.
\end{aligned} \tag{4.38}$$

Konačno, koristeći [128, (07.34.21.0011.01)] za oba integrala, dobija se izraz zatvorenog oblika dat sa

$$\begin{aligned}
C_{erg} &= \frac{1}{\log_e 2} \frac{C}{K_1^{m_2}} \sum_{i=1}^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^k B_i \frac{\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta} \right)}{m_2 \delta + \beta_i + 1} Q^{m_1 - m_2 + k} \\
&\quad \times G_{4,5}^{4,2} \left(\frac{m_2}{K_1 \Omega_2 Q} \left| \begin{matrix} 1 - m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta}, & -m_2, & 1 - m_2, & 1 - m_2 + m_1 + k \\ m_1 - m_2 + k, & 0, & -m_2, & -m_2, & -m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \end{matrix} \right. \right) \\
&+ \frac{1}{\log_e 2} \frac{C}{K_2^{m_2}} \left(\frac{\Omega_1}{m_1} \right)^{m_1} \Gamma \left(m_1, \frac{m_1}{\Omega_1} Q \right) \sum_{i=1}^n B_i \frac{\left(m_2 + \frac{\beta_i + 1}{\delta} \right)}{m_2 \delta + \beta_i + 1} \\
&\quad \times G_{3,4}^{3,2} \left(\frac{m_2}{K_2 \Omega_2} \left| \begin{matrix} 1 - m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta}, & -m_2, & 1 - m_2 \\ 0, & -m_2, & -m_2, & -m_2 - \frac{\beta_i + 1}{\delta} \end{matrix} \right. \right).
\end{aligned} \tag{4.39}$$

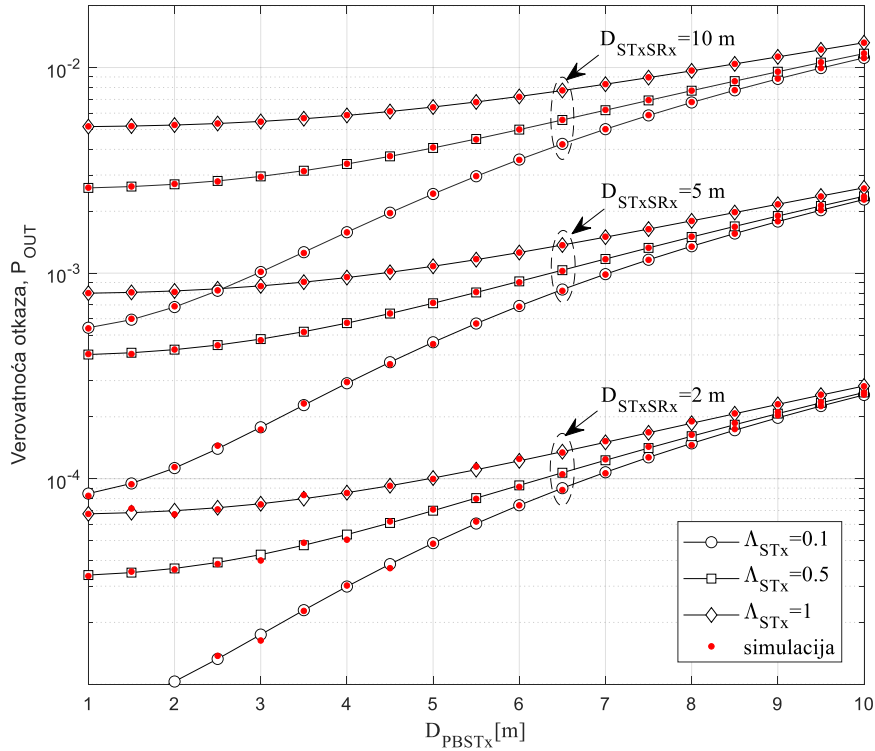
Za predloženi sistem razmatraju se sledeće važne metrike performansi sekundarnog sistema: verovatnoća otkaza, ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza i ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu. Parametri simulacije korišćeni za sve razmatrane scenarije predstavljeni na slikama u nastavku su dati u tabeli 4.1. Parametri sistema i kanala predstavljeni u tabeli imaju

značajan uticaj na performanse sistema i variraju u prikazanoj analizi kako bi se dali važni zaključci u vezi sa dizajnom sistema.

Tabela 4.1. Parametri simulacije kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom

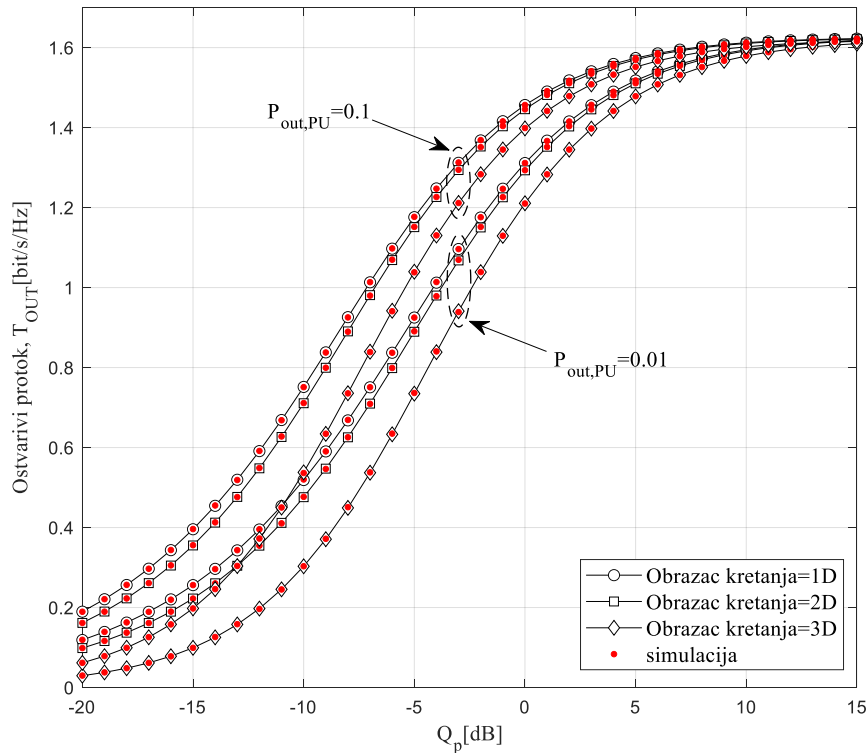
Parametar	Sl. 4.4.	Sl. 4.5.	Sl. 4.6.	Sl. 4.7.	Sl. 4.8.	Sl. 4.9.	Sl. 4.10.	Sl. 4.11.	Sl. 4.12.	Sl. 4.13.	Sl. 4.14.
$P_{out,PU}$	0.01	0.01–0.1	0.1	0.1	0.01	0.01	0.05	0.01–0.1	0.01–0.1	0.05	0.1
$D_{PBSTx}[m]$	1–10	1	10	5	1	1	5	10	5–10	5–15	10
$D_{STxSRx}[m]$	2–10	5	5–10	5	5–10	10	1–10	5	5	5–10	5
$Q_p[dB]$	15	–20÷20	15	–5÷25	–20÷20	–20÷20	0÷20	–10÷15	–20÷15	–10÷12	15
$P_{PB}[dB]$	30	20	20–30	20–30	30	30	20	20–30	30	30	20
$\Omega_1[dB]$	10	10	20	20	10	10	10	20	10	10	20–30
$\Omega_2[dB]$	30	20	20	20	30	30	20	20	30	30	20
Λ_{STx}	0.1–1	0.1	1	0.1–1	0.1	0.1–1	0.5–1	0.1	0.5	0.5	1
$\gamma_{th}[dB]$	–5	5	5	–5	5	5	-	-	-	-	-
η	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
α	0.5	0.2	0.1–0.99	0.5	0.2	0.2	0.5	0.5	0.2	0.2	0.1–0.99
m_1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
m_2	1	1	1	1	1–3	1–3	1	1	1	1	1
obrazac kretanja	1D	1D–3D	1D	2D	1D	1D	2D	2D	2D	2D	1D–3D

Verovatnoća otkaza u funkciji rastojanja između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika prikazana je na slici 4.4. Analiza je izvršena za različite vrednosti maksimalnog rastojanja od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika i srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika Λ_{STx} . Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da povećanje rastojanja između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika povećava vrednost verovatnoće otkaza jer se smanjuje snaga prijemnog signala na sekundarnom predajniku, kao i prikupljena energija na sekundarnom predajniku, što dovodi do njegove niže predajne snage. Veće vrednosti maksimalnog rastojanja od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika imaju degradirajući uticaj na verovatnoću otkaza, pošto je prijemna snaga na sekundarnom prijemniku manja i odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku niži. Sa smanjenjem srednje vrednosti pojačanja snage u kanalu od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika, verovatnoća otkaza sekundarnog sistema se smanjuje jer je slabije ograničenje predajne snage na sekundarnom predajniku, uslovljeno interferencijom na primarnom prijemniku. Povećanjem rastojanja od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika, vrednost srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika ima manje značajan uticaj na verovatnoću otkaza. U ovom slučaju, sakuplja se manja količina energije, što rezultira manjom predajnom snagom sekundarnog korisnika, kada ograničenje predajne snage zbog interferencije nije dominantno. S druge strane, male vrednosti rastojanja između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika rezultiraju većom prikupljenom energijom, kada je ograničenje interferencije primarne mreže dominantno. U ovom slučaju kada je srednje pojačanje snage kanala veliko, varijacije vrednosti u rastojanju između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika ne utiču dominantno na verovatnoću otkaza sekundarne mreže i imaju slične vrednosti u opsegu do 3 m.



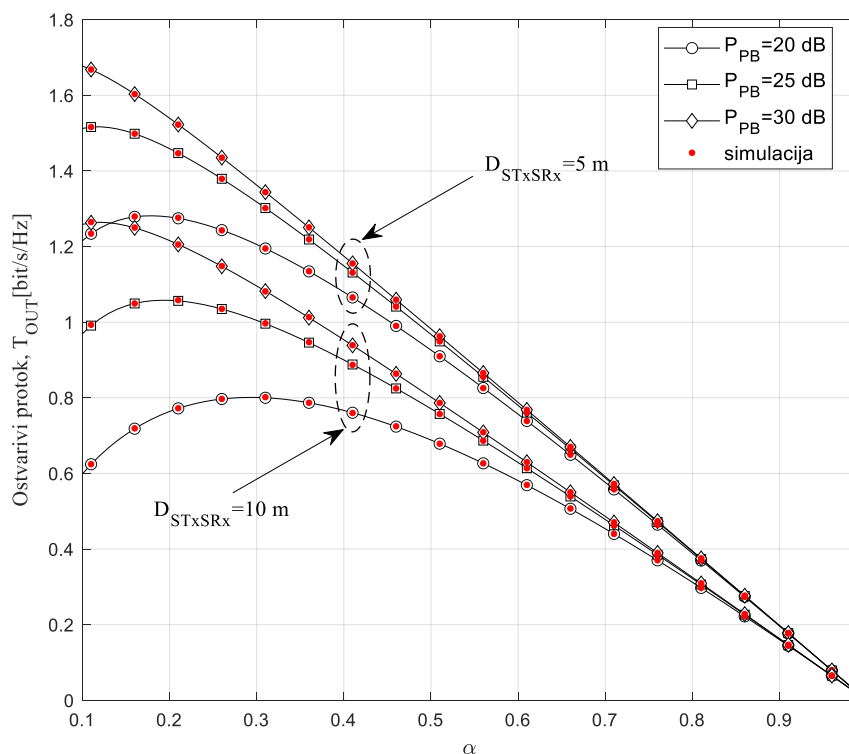
Slika 4.4. – Verovatnoća otkaza u zavisnosti od rastojanja od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika.

Zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na verovatnoći otkaza T_{OUT} od praga interferencije Q_p analizirana je na slici 4.5., za dve vrednosti dozvoljene verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$ jednake 0.1 i 0.01 i različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika. Veći ostvarivi protok se postiže kada dozvoljena verovatnoća otkaza primarne mreže i zahtevani prag interferencije imaju veće vrednosti. Uz blaži uslov interferencije na primarnom prijemniku, izražen kroz veće vrednosti praga interferencije i verovatnoće otkaza primarne mreže, sekundarnom predajniku je dozvoljena veća vrednost predajne snage. Za vrednosti praga interferencije veće od 10 dB, ostvarivi protok ulazi u opseg zasićenja i ne zavisi dominantno od verovatnoće otkaza primarne mreže. U ovom scenariju, predajna snaga sekundarnog predajnika isključivo zavisi od prikupljene energije, a ne od ograničenja uzrokovanih interferencijom na primarnom prijemniku. Na slici 4.5. je prikazan ostvarivi protok za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika: duž putanje linije, unutar kruga ili unutar sfere. Može se primetiti da se najbolji rezultati dobijaju kada se kretanje sekundarnog prijemnika može opisati obrascem kretanja duž putanje linije.



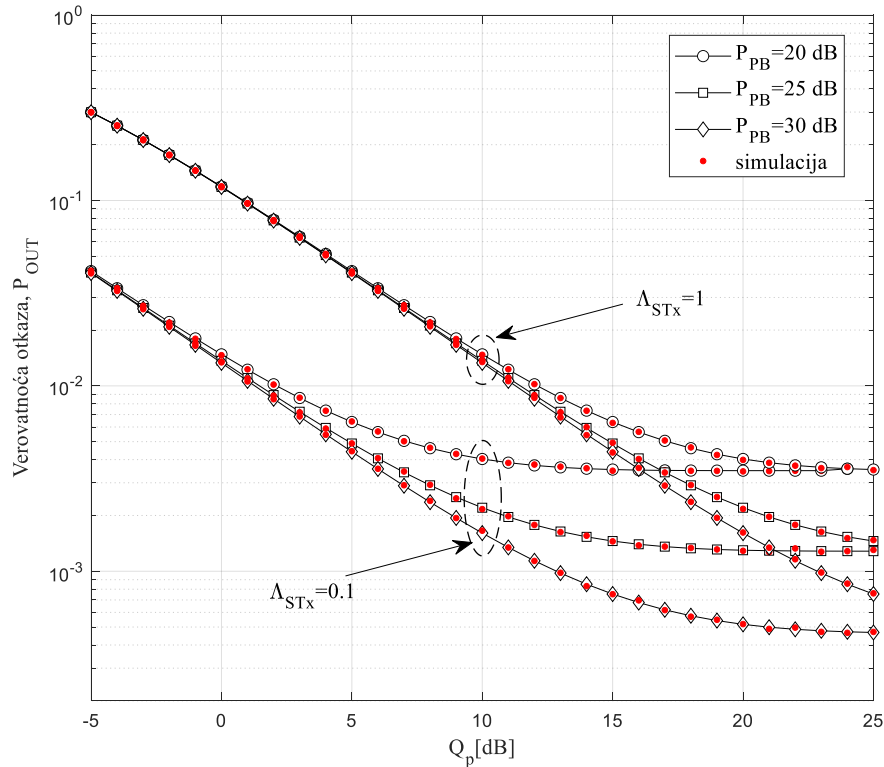
Slika 4.5. – Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika.

Zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na verovatnoći otkaza od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α prikazana je na slici 4.6. Na istoj slici analiziran je i uticaj predajne snage namenskog izvora energije i maksimalnog rastojanja sekundarnog prijemnika od sekundarnog predajnika, za slučaj kada se sekundarni prijemnik kreće koristeći obrazac kretanja 1D. Povećanjem koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α povećava se i ostvarivi protok do određene vrednosti, nakon čega počinje da opada, jer iako veća vrednost α rezultira većom prikupljenom energijom na sekundarnom predajniku, dominantni uticaj ima manja količina vremena posvećena prenosu informacija. Za istu vrednost koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α , veće vrednosti ostvarivog protoka se postižu ako je predajna snaga namenskog izvora energije veća, jer se u tom slučaju više energije sakuplja na sekundarnom predajniku, što rezultira većom dostupnom predajnom snagom sekundarnog predajnika. Uticaj snage namenskog izvora za napajanje je veći u slučaju kada maksimalno rastojanje između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika iznosi 10 m nego u slučaju kada je 5 m. Manja vrednost maksimalnog rastojanja od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika dovodi do većih vrednosti ostvarivog protoka, pošto je prijemna snaga na sekundarnom prijemniku veća i samim tim veći je odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku.



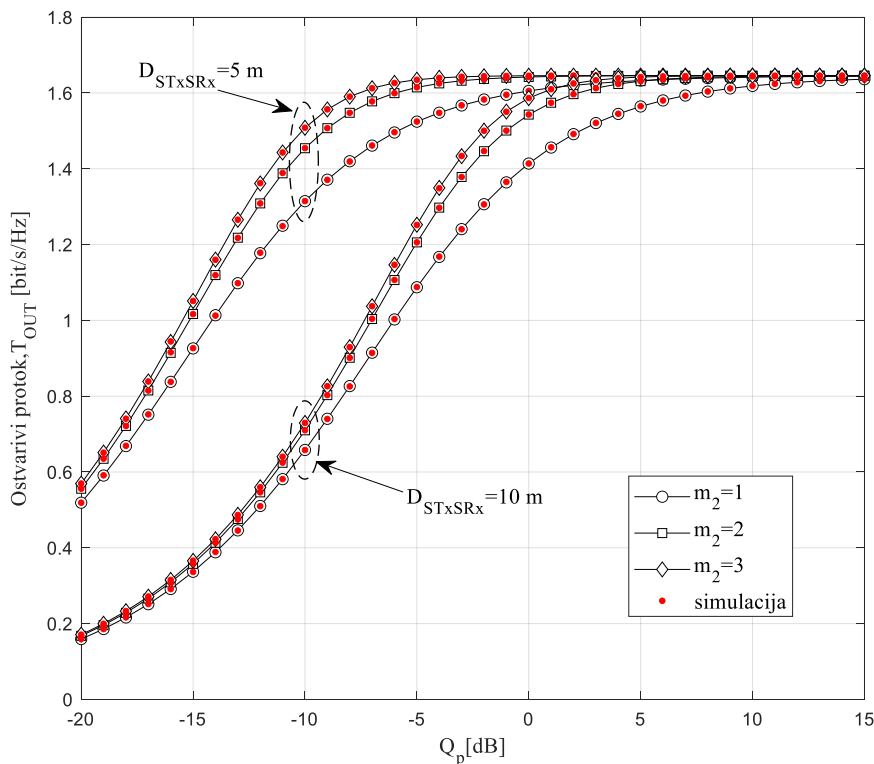
Slika 4.6. – Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α .

Zavisnost verovatnoće otkaza od praga interferencije Q_p za različite vrednosti predajne snage namenskog izvora energije i različite vrednosti srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika prikazana je na slici 4.7. Sa povećanjem praga interferencije Q_p smanjuje se verovatnoća otkaza sekundarnog sistema, jer je slabije ograničenje interferencije primarne mreže i sekundarni predajnik može da emituje sa većom dozvoljenom snagom. Sa daljim porastom praga interferencije Q_p , verovatnoća otkaza ulazi u oblast zasićenja. Za manje vrednosti predajne snage namenskog izvora energije, verovatnoća otkaza ulazi u oblast zasićenja za manji prag interferencije Q_p , dok sa većim vrednostima predajne snage namenskog izvora energije dolazi do zasićenja za veći prag interferencije Q_p . Za visoke vrednosti praga interferencije, predajna snaga sekundarnog predajnika u potpunosti zavisi od prikupljene energije i u tom slučaju samo snaga namenskog izvora energije ima uticaj na prikupljenu energiju. Više prikupljene energije dovodi do veće predajne snage sekundarnog predajnika, što kao rezultat ima manju verovatnoću otkaza. Za male vrednosti praga interferencije Q_p , verovatnoća otkaza ne zavisi od predajne snage namenskog izvora energije, jer ograničenje izazvano interferencijom na primarnom prijemniku ima dominantan uticaj. Bolje performanse sistema se dobijaju za niže vrednosti srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika, što je prikazano i na slici 4.4. Dodatno, za veći prag interferencije i istu vrednost predajne snage namenskog izvora energije, verovatnoća otkaza u delu zasićenja postaje nezavisna od srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika, jer predajna snaga sekundarnog predajnika zavisi samo od prikupljene energije iz namenskog izvora energije.



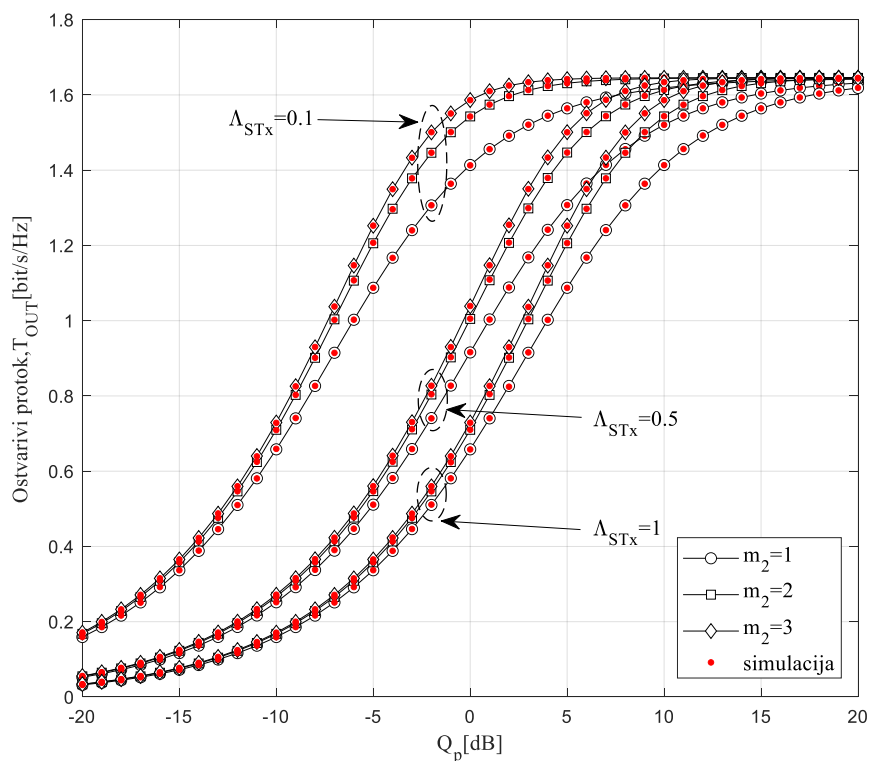
Slika 4.7. – Verovatnoća otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti snage namenskog izvora energije P_{PB} .

Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza T_{OUT} je predstavljen na slici 4.8. u funkciji praga interferencije Q_p . Analiziran je uticaj maksimalnog rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, kao i uticaj Nakagami- m parametra fedinga u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika. Sa povećanjem praga interferencije, ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza T_{OUT} sekundarne mreže raste dok za veće vrednosti praga interferencije ulazi u zasićenje. U oblasti manjeg Q_p bez efekta zasićenja, ostvarivi protok zavisi od svih analiziranih parametara. Manji ostvarivi protok se postiže ako je maksimalno rastojanje od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika veće, jer je u tom slučaju srednja vrednost prijemne snage na sekundarnom prijemniku manja. Veća vrednost Nakagami- m parametra fedinga u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika dovodi do veće vrednosti ostvarivog protoka. U slučaju kada je maksimalno rastojanje od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika jednako 5 m, zasićenje se javlja na nižem Q_p i dalje povećanje praga interferencije ne menja vrednosti protoka. Pri visokim vrednostima praga interferencije ne postoji značajna razlika između vrednosti protoka za maksimalnu udaljenost 5 m i 10 m i za analizirane vrednosti Nakagami- m parametra fedinga na linku od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika. Povećanjem praga interferencije, ograničenje uslovljeno interferencijom na primarnom prijemniku postaje slabije, tako da sekundarni predajnik može vršiti emitovanje svom raspoloživom snagom.



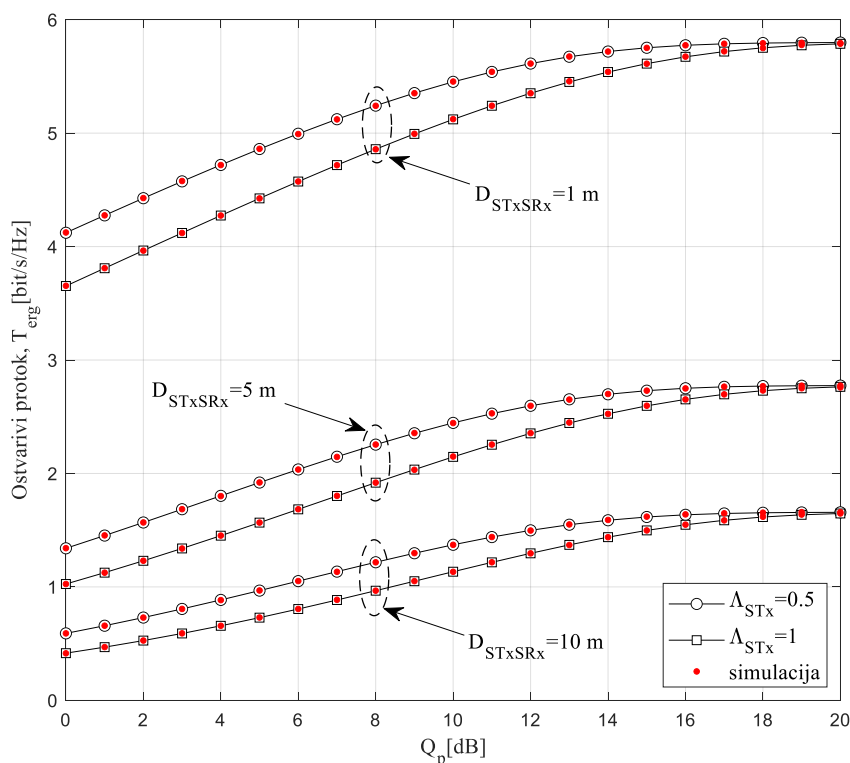
Slika 4.8. – Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u funkciji praga interferencije Q_p , za različite vrednosti rastojanja D_{STxSRx} .

Zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na verovatnoći otkaza T_{OUT} od praga interferencije Q_p prikazana je na slici 4.9. U ovom scenariju, analizira se uticaj promene srednjeg pojačanja snage u kanalu od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika, kao i Nakagami- m parametar fedinga na linku od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika. Sa povećanjem praga interferencije Q_p raste i ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza, dok za veće vrednosti praga interferencije Q_p ostvarivi protok ulazi u oblast zasićenja. Vrednost praga interferencije gde počinje oblast zasićenja zavisi od srednje vrednosti pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika. Dozvoljena predajna snaga sekundarnog predajnika zavisi od praga interferencije Q_p i srednje snage pojačanja kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika, pa oba faktora utiču na granične vrednosti definisane interferencijom na primarnom korisniku. Ostvarivi protok će ući u zasićenje za manju vrednost praga interferencije, kada je manja vrednost srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika. Veća vrednost Nakagami- m parametra fedinga u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika dovodi do većeg ostvarivog protoka. Posmatrajući ponašanje krivih za veoma male vrednosti praga interferencije Q_p , može se zaključiti da se za isti parametar srednjeg pojačanja snage kanala Λ_{STx} postižu približno iste vrednosti ostvarivog protoka za različite vrednosti parametra fedinga m_2 , tj. dozvoljena predajna snaga sa sekundarnog predajnika je u svim slučajevima veoma mala.



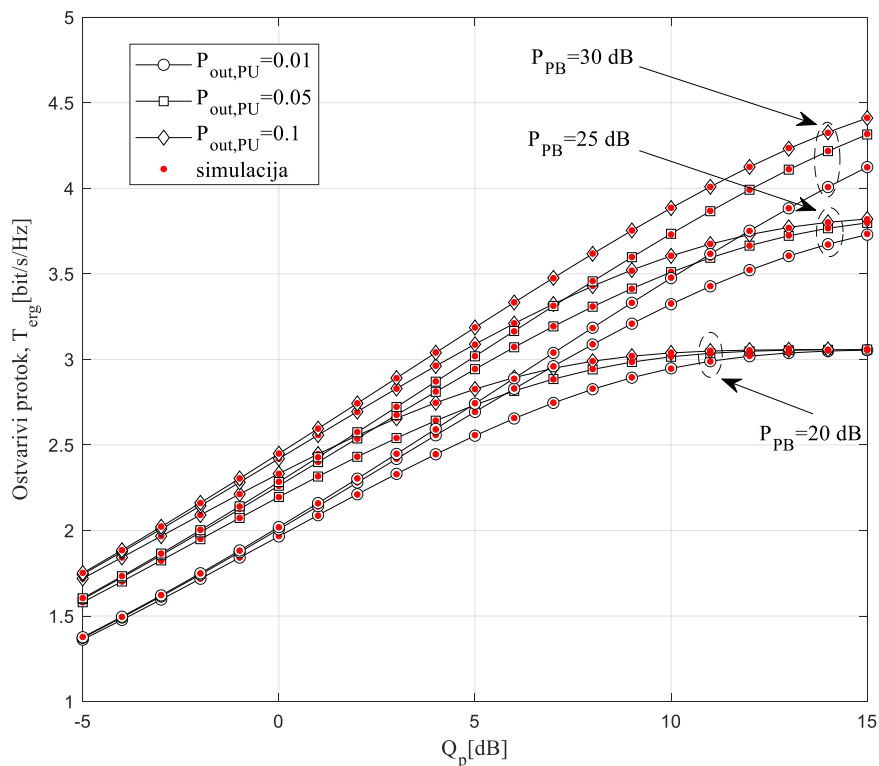
Slika 4.9. – Ostvarivi protok u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage Λ_{STx} .

Na slici 4.10. prikazana je zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu od praga interferencije Q_p za različite vrednosti maksimalnog rastojanja od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika i srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika. Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu raste sa porastom praga interferencije za prag interferencije manji od 15 dB, dok se za vrednosti veće od 15 dB javlja efekat zasićenja. Veća vrednost praga interferencije Q_p dovodi do veće vrednosti ostvarivog protoka, jer je sekundarnom predajniku dozvoljeno da prenosi sa većom snagom, pa je primljeni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku veći. Za vrednosti veće od 15 dB, ostvarivi protok zavisi isključivo od prikupljene energije. Daljim povećanjem praga interferencije, ostvarivi protok postaje nezavisan od srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika. Manji ostvarivi protok se postiže ako je maksimalno rastojanje od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika veće, jer je u tom slučaju prijemna snaga na sekundarnom prijemniku manja. Ako je srednje pojačanje snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika veće, postiže se manji ostvarivi protok zbog ograničenja definisanih interferencijom na primarnom prijemniku, što dovodi do toga da je dozvoljena manja predajna snaga sekundarnog predajnika.



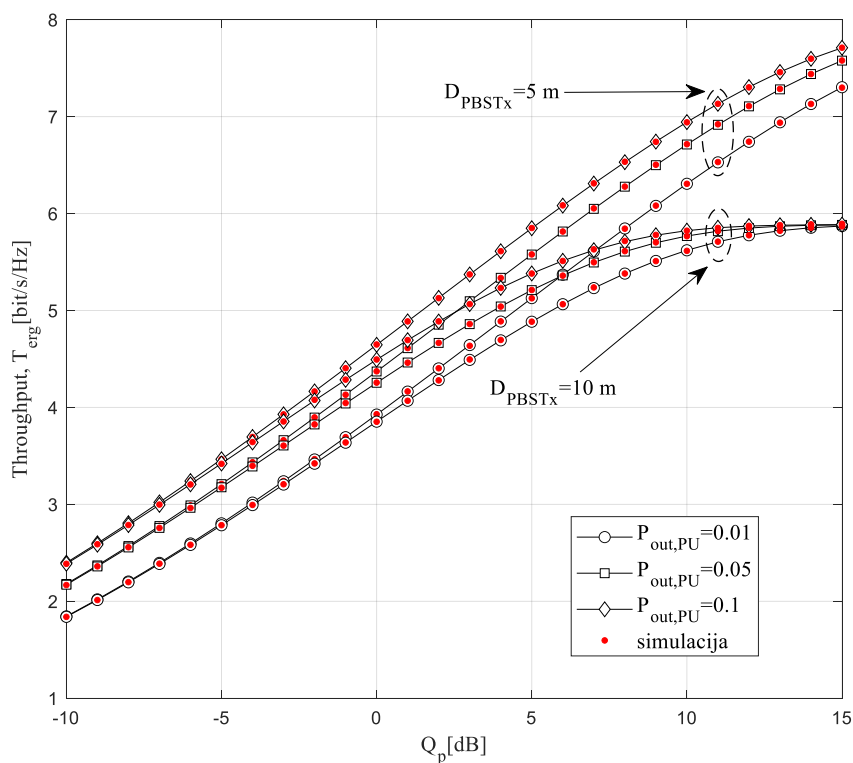
Slika 4.10. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti rastojanja D_{STxSRx} .

Slika 4.11. prikazuje zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu u funkciji praga interferencije Q_p . Performanse sistema su analizirane za različite vrednosti predajne snage namenskog izvora energije i verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{\text{out,PU}}$. Sa porastom praga interferencije raste i ostvarivi protok, dok za više vrednosti praga interferencije ostvarivi protok ulazi u oblast zasićenja. Za manje vrednosti predajne snage namenskog izvora energije, ostvarivi protok ulazi u oblast zasićenja za manju vrednost praga interferencije u odnosu na scenario kada je veća vrednost predajne snage namenskog izvora energije. Za veći prag interferencije, ostvarivi protok počinje dominantno da zavisi od prikupljene energije, koja je manja za niže vrednosti predajne snage namenskog izvora energije. S druge strane, ostvarivi protok je nezavisan od predajne snage namenskog izvora energije za niže vrednosti praga interferencije. U tom slučaju predajna snaga na sekundarnom predajniku zavisi od ograničenja definisanih interferencijom na primarnom prijemniku, tako da samo verovatnoća otkaza primarne mreže ima uticaj na rezultate. Veća vrednost ostvarivog protoka se postiže ako je verovatnoća otkaza primarne mreže $P_{\text{out,PU}}$ veća, jer je sa većom vrednošću praga interferencije i većom vrednošću verovatnoće otkaza primarne mreže dozvoljena veća predajna snaga sekundarnog predajnika.



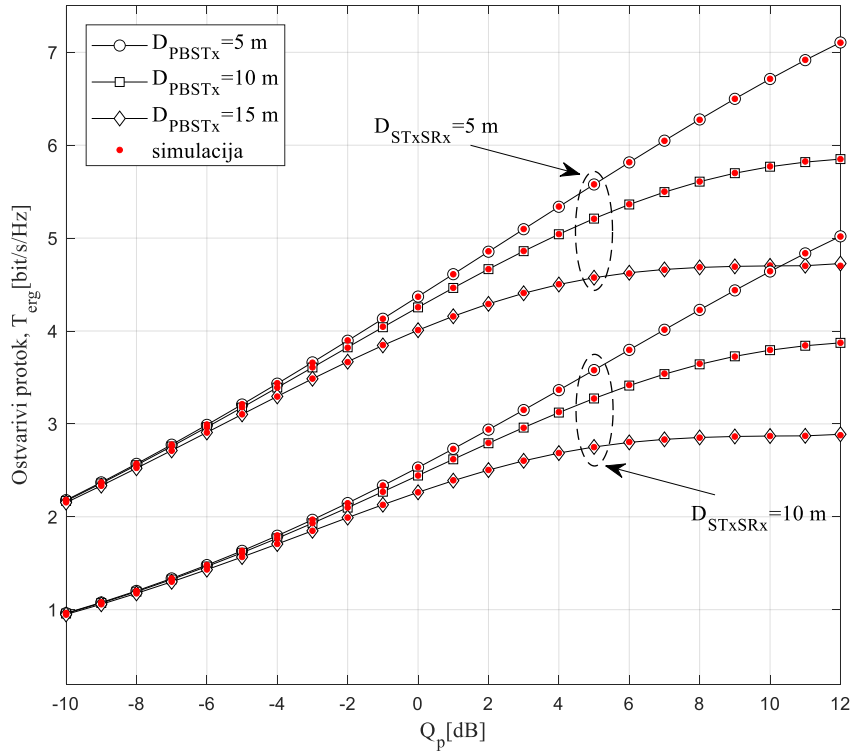
Slika 4.11. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti snage namenskog izvora energije P_{PB} .

Zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu od praga interferencije Q_p prikazana je na slici 4.12. Analiza je urađena za različite vrednosti rastojanja od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika i verovatnoće otkaza primarne mreže $P_{\text{out,PU}}$. Kada je prag interferencije manji od -5 dB, predajna snaga sekundarnog predajnika dominantno je definisana interferencijom na primarnom prijemniku i ostvarivi protok je nezavisan od rastojanja između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika. Podizanjem praga interferencije iznad -5 dB, ostvarivi protok je veći ako je rastojanje od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika manje, jer je u tom slučaju prikupljena energija na sekundarnom predajniku veća i time je dostupna veća predajna snaga na sekundarnom predajniku. Sa većom vrednošću praga interferencije i većom vrednošću verovatnoće otkaza primarne mreže, dozvoljena je veća predajna snaga na sekundarnom predajniku, pa se postižu veće vrednosti ostvarivog protoka. U slučaju kada je rastojanje od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika 10 m, zasićenje se javlja kada prag interferencije pređe prag približno jednak 10 dB. Predajna snaga sekundarnog predajnika u tom slučaju zavisi od prikupljene energije, koja je sve manja sa povećanjem rastojanja između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika.



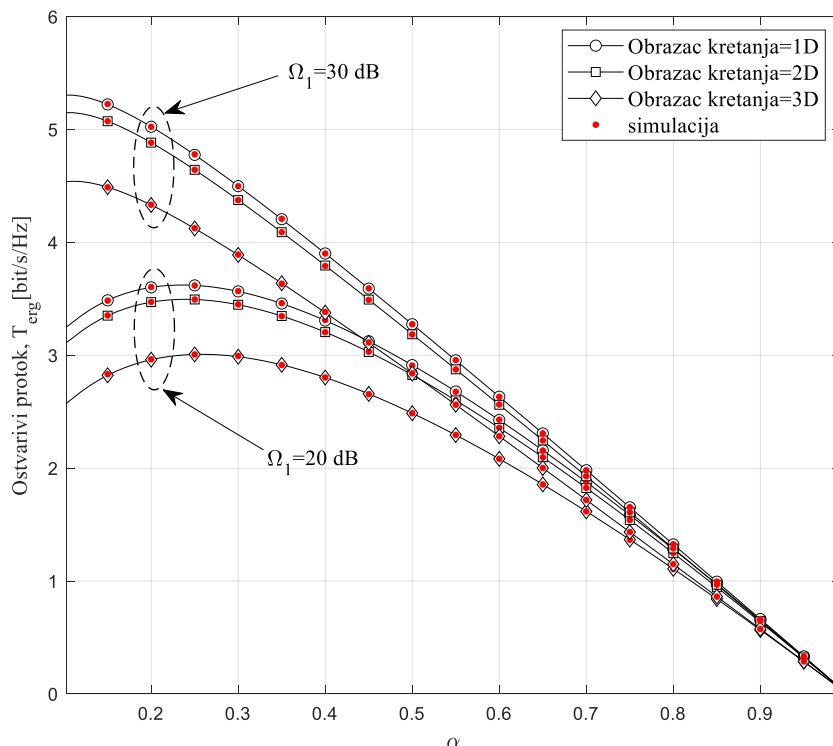
Slika 4.12. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže.

Na slici 4.13. je prikazana zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu od rastojanja između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika, kao i maksimalnog rastojanja od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika i praga interferencije. Veći ostvarivi protok se dobija ako je maksimalno rastojanje od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika manje, jer je u tom slučaju prijemna snaga na sekundarnom prijemniku veća. Kao na slici 4.12. mogu se izvesti isti zaključci o zavisnosti ostvarivog protoka od udaljenosti između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika. Za prag interferencije niži od -5 dB , ostvarivi protok je nezavisan od rastojanja između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika, dok iznad te vrednosti praga interferencije, ostvarivi protok opada sa povećanjem rastojanja od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika sve dok ne uđe u zasićenje kada se to rastojanje poveća na 15 m i prag interferencije je iznad 5 dB .



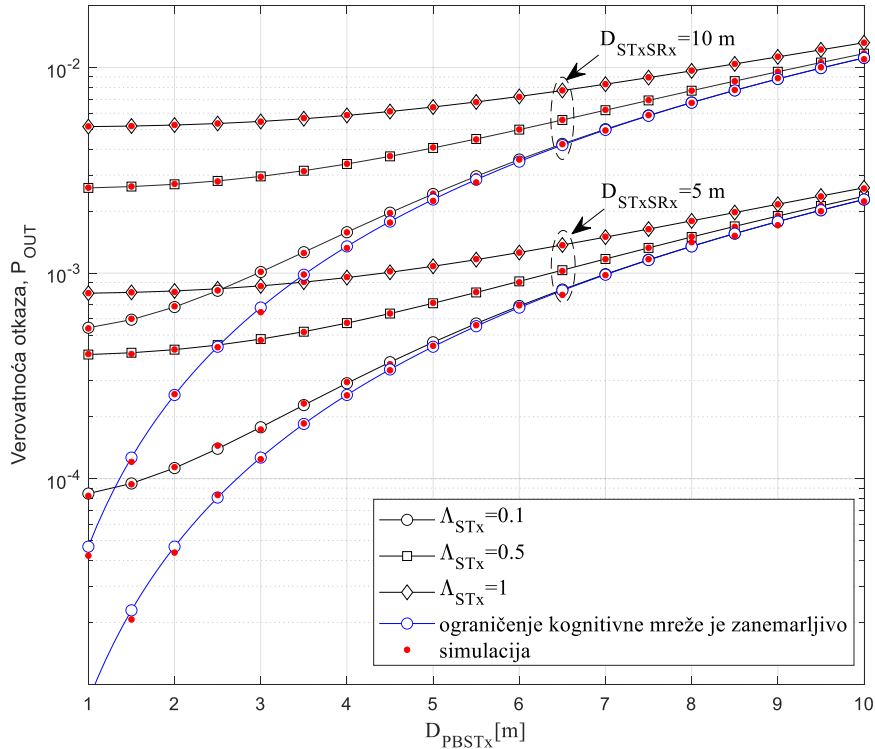
Slika 4.13. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu za različite vrednosti rastojanja D_{PBSTx} i D_{STxSRx} .

Zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na ergodičnom kapacitetu od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α prikazana je na slici 4.14. Performanse sistema su analizirane za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage Nakagami- m kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika i različitih obrazaca kretanja koji se koriste za modelovanje kretanja sekundarnog prijemnika. Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu sekundarne mreže se povećava do određene vrednosti koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α , nakon čega počinje da opada. Moguće je odrediti optimalnu vrednost koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije, pri kojoj se postiže maksimalna vrednost ostvarivog protoka. Ako je srednje pojačanje snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika 10 dB, maksimum ostvarivog protoka se postiže kada je vrednost koeficijenta α oko 0.25 za svaki od obrazaca kretanja primenjenih na sekundarnom prijemniku. Najbolji rezultati se postižu sa primenjenim 1D obrascem kretanja. U slučaju kada srednje pojačanje snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika ima veću vrednost, maksimum ostvarivog protoka se postiže za manje vrednosti koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α . Ostvarivi protok je veći ako je srednje pojačanje snage kanala od namenskog izvora za napajanje do sekundarnog predajnika veće, a dalje povećanje koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α dovodi do nezavisnosti ostvarivog protoka od srednjeg pojačanja snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika.



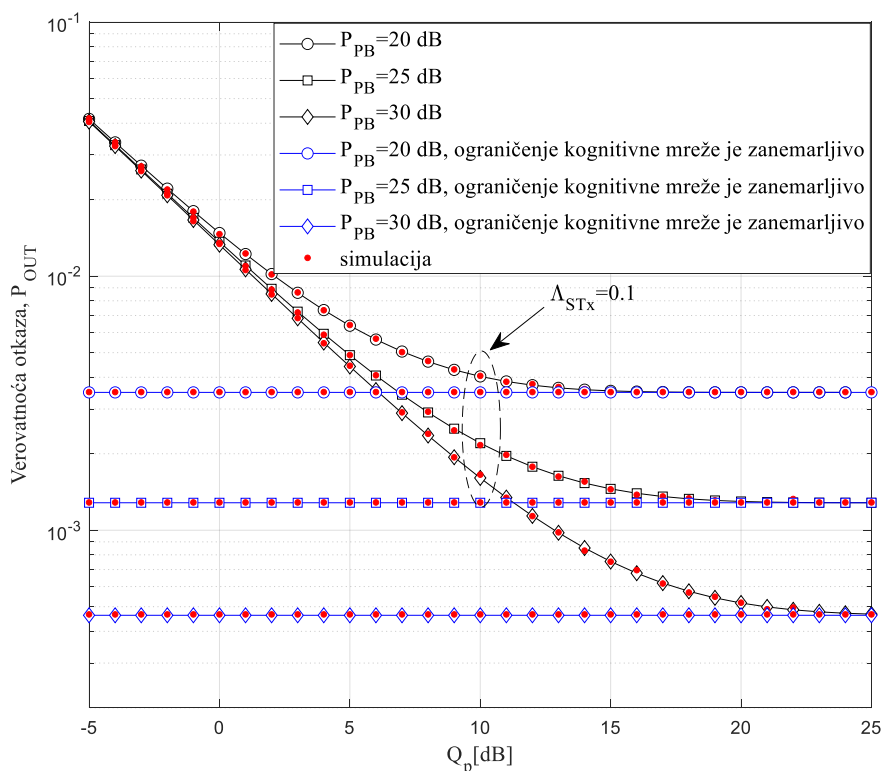
Slika 4.14. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od koeficijenta α za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika.

U nastavku, na slikama 4.15. i 4.16. je prikazano poređenje performansi kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prijemnikom sa kooperativnim sistemom u kome je zanemarljivo ograničenje kognitivne mreže. Na slici 4.15. prikazano je poređenje verovatnoće otkaza u funkciji rastojanja između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika. Parametri sistema koji se posmatraju su identični kao parametri definisani u tabeli 4.2. za sliku 4.4. Na osnovu predstavljenih rezultata može se zaključiti da se za male vrednosti rastojanja između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika bolje performanse sistema postižu kada ne postoji ograničenje kognitivne mreže. U tom slučaju dominantniji je uslov ograničenja emisijne snage sekundarnog predajnika zbog interferencije na primarnom prijemniku, dok se za veće rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika prikupi manje energije na sekundarnom predajniku, pa je dominantniji uslov ograničenja predajne snage zbog količine prikupljene energije i tada verovatnoća otkaza kognitivnog sistema teži vrednostima verovatnoće otkaza u sistemu u kome je zanemarljivo ograničenje kognitivne mreže.



Slika 4.15. – Poređenje verovatnoće otkaza za sistem sa i bez ograničenja kognitivne mreže i različita rastojanja D_{PBSTx} i D_{STxSRx} .

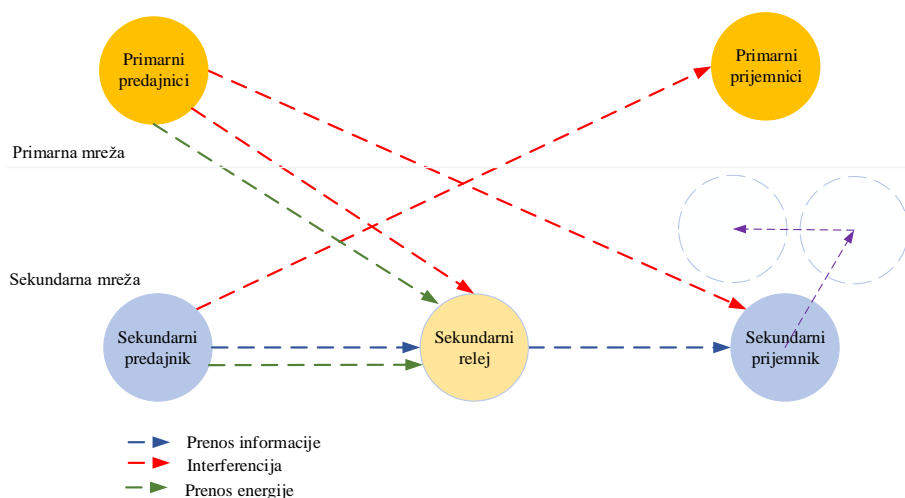
Na slici 4.16. prikazano je poređenje verovatnoće otkaza za različite vrednosti predajne snage namenskog izvora energije u funkciji praga interferencije Q_p . Parametri sistema koji se posmatraju su identični kao parametri definisani u tabeli 4.2. za sliku 4.7. Na osnovu predstavljenih rezultata može se zaključiti da se za niže vrednosti praga interferencije bolje performanse sistema postižu kada ne postoji ograničenje kognitivne mreže, jer je dominantniji uslov ograničenja emisione snage sekundarnog predajnika zbog interferencije na primarnom prijemniku, dok za veće vrednosti praga interferencije emisiona snaga sekundarnog predajnika dominantno zavisi od prikupljene energije, pa verovatnoća otkaza kognitivnog sistema teži vrednostima verovatnoće otkaza u sistemu u kome je zanemarljivo ograničenje kognitivne mreže.



Slika 4.16. – Poređenje verovatnoće otkaza za sistem sa i bez ograničenja kognitivne mreže i različite vrednosti snage P_{PB} .

4.2 Performanse kooperativnog kognitivnog sistema sa relejem i mobilnim prijemnikom

U ovom poglavlju analizira se kognitivni kooperativni radio sistem predstavljen u poglavlju 3.2. pri čemu je u ovom slučaju sekundarni prijemnik mobilan. Model sistema je prikazan na slici 4.17.



Slika 4.17. – Model kooperativnog relejnog kognitivnog sistema sa N primarnih predajnika i M primarnih prijemnika u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan.

Predajne snage sekundarnog predajnika i sekundarnog releja su ograničene interferencijom do primarnih prijemnika, kao što je predstavljeno jednačinama (3.56) i (3.57). Sakupljena energija u releju sekundarnog sistema je izražena jednačinom (3.58) u slučaju prenosa sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu i (3.59) u slučaju prenosa baziranog na raspodeli snage. Jednačinama (2.15) i (2.24) predstavljen je odnos signal/šum na sekundarnom releju, γ_{SR} , u oba pomenuta prenosa, sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu i baziran na raspodeli snage, respektivno. Predajna snaga sekundarnog releja je predstavljena jednačinom (2.29).

Primljeni informacioni signal na sekundarnom prijemniku je

$$y_{SRx} = \sqrt{\frac{P_{SR}}{r^\delta}} h_{SRSR_x} x_{SR} + n_{SRx}. \quad (4.40)$$

Primljeni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku se može napisati u formi

$$\gamma_{SRx} = \frac{P_{SR} |h_{SRSR_x}|^2}{r^\delta \sigma_{SRx}^2} = \frac{P_{SR} \gamma_{SRSR_x}}{r^\delta \sigma_{SRx}^2}. \quad (4.41)$$

Izraz za prijemni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku postaje

$$\gamma_{SRx} = \begin{cases} \eta \rho (\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \frac{\gamma_{SRSR_x}}{r^\delta \sigma_{SRx}^2}, & \eta \rho (\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \leq k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, \\ k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}} \frac{\gamma_{SRSR_x}}{r^\delta \sigma_{SRx}^2}, & \eta \rho (\gamma_{STxSR} + I_{SR}) > k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}. \end{cases} \quad (4.42)$$

Verovatnoća otkaza sekundarne mreže se definiše kao verovatnoća da je jedan od linkova ispod unapred definisanog praga γ_{th} i data je sledećim izrazom

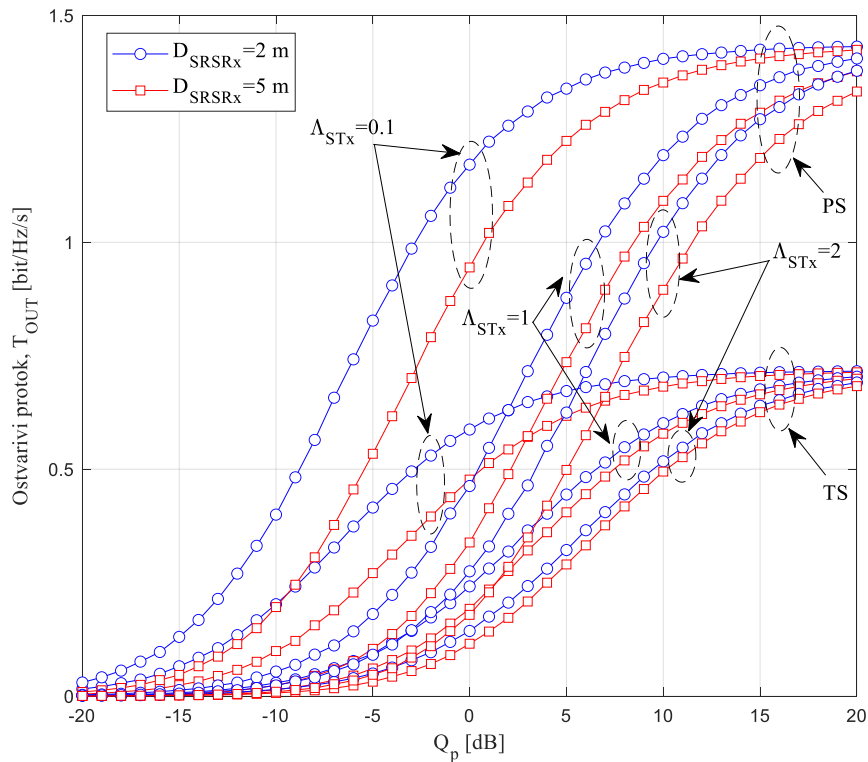
$$P_{OUT}(\gamma_{th}) = \Pr\{\gamma_{SR} \leq \gamma_{th}\} + \Pr\{\gamma_{SRx} \leq \gamma_{th}, \gamma_{SR} > \gamma_{th}\}. \quad (4.43)$$

U nastavku su predstavljeni rezultati simulacije radi analize performansi sistema. Za predloženi sistem razmatra se ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza.

Na slici 4.18. predstavljen je ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza u funkciji praga interferencije Q_p za oba analizirana protokola za prikupljanje energije. Pretpostavka je da su srednje vrednosti pojačanja snage kanala na linkovima sekundarni predajnik-sekundarni relej i sekundarni relej-sekundarni prijemnik jednake i iznose 10 dB. Analiza je izvršena za različite vrednosti srednjeg pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do primarnih prijemnika Λ_{STx} , dok je srednje pojačanje snage kanala od sekundarnog releja do primarnih prijemnika Λ_{SR} jednako 0.1. Verovatnoća otkaza primarne mreže je $P_{out,PU} = 0.05$, a koeficijent efikasnosti konverzije energije je $\eta = 0.9$, dok su koeficijent vremenskog udela pri prikupljanju energije α i koeficijent udela snage pri prikupljanju energije ρ postavljeni na 0.5 za prenos sa TS protokolom i PS protokolom, respektivno. Srednja pojačanja snage u kanalima interferencije od primarnog predajnika do sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika su $\Omega_{I_R} = 0$ dB i $\Omega_{I_{Rx}} = 10$ dB, respektivno. Prag otkaza je $\gamma_{th} = 8$ dB. Kretanje sekundarnog prijemnika je opisano korišćenjem 1D obrasca kretanja. U svim razmatranim slučajevima vrednosti ostvarivog protoka se povećavaju sa porastom praga interferencije Q_p do neke granice nakon čega se javlja efekat zasićenja.

Zasićenje se javlja za veće vrednosti praga interferencije Q_p kada je srednje pojačanje snage kanala Λ_{STx} manje, pošto je predajna snaga sekundarnog releja tada dominantno određena

raspoloživom snagom od prikupljene energije. Za manje srednje pojačanje snage kanala Λ_{STx} maksimalna dozvoljena predajna snaga sekundarnog predajnika je veća, pa performanse zavise od prikupljene energije na sekundarnom releju. U svim analiziranim slučajevima, veće vrednosti ostvarenog protoka se postižu u slučaju primene PS protokola za prikupljanje energije, kao što je i očekivano. Ostvarivi protok se povećava sa smanjenjem srednjeg pojačanja snage kanala Λ_{STx} , jer je u tom slučaju dozvoljena veća predajna snaga sekundarnog predajnika. Vrednosti ostvarivog protoka su veće kada je maksimalno dozvoljeno rastojanje između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika manje jer je tada veća prijemna snaga signala na sekundarnom prijemniku i odnos signal/šum je veći.



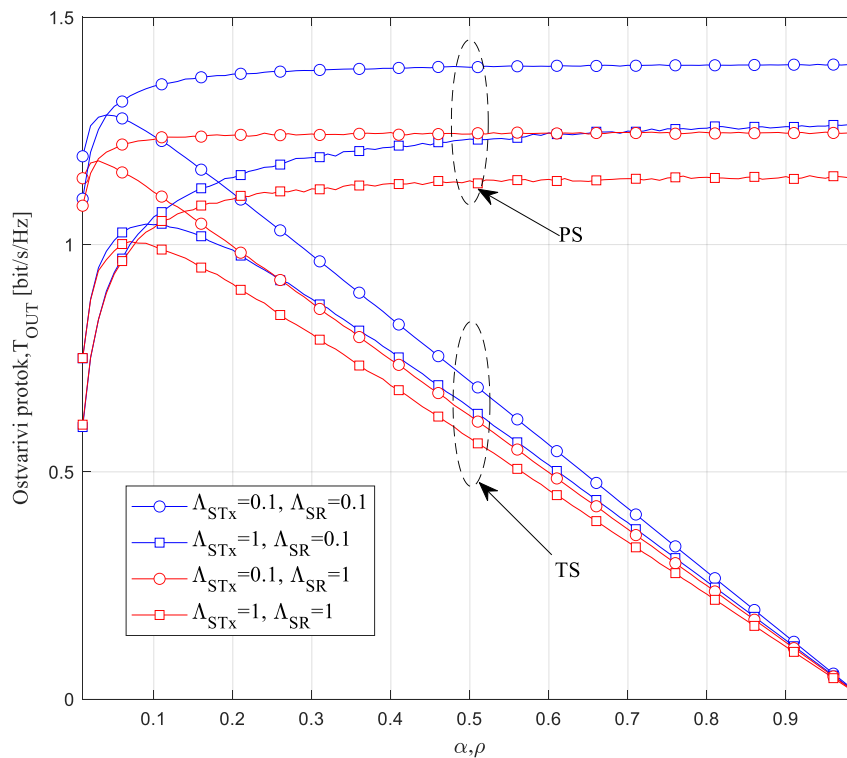
Slika 4.18. – Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od praga interferencije Q_p , za različite protokole za prenos energije.

Zavisnost ostvarivog protoka zasnovanog na verovatnoći otkaza kognitivnog sistema od koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α i koeficijenta udela snage pri prikupljanju energije ρ prikazana je na slici 4.19. Ostvarivi protok je analiziran za različite vrednosti srednjih pojačanja snage u kanalima od sekundarnog predajnika i sekundarnog releja ka primarnim prijemnicima. Razmatrana su oba protokola za skupljanje energije, sa koeficijentom efikasnosti konverzije energije $\eta = 0.9$. Maksimalna dozvoljena verovatnoća otkaza primarne mreže je postavljena na $P_{out,PU} = 0.01$, a prag otkaza kognitivnog sistema je $\gamma_{th} = 8$ dB. U ovom scenariju, srednja pojačanja snage kanala su jednaka $\Omega_{I_r} = 0$ dB, $\Omega_{I_{rc}} = -10$ dB, $\Omega_{STxSR} = 10$ dB, i $\Omega_{SRSRx} = 10$ dB.

U slučaju kada se primenjuje prenos sa TS protokolom, može se odrediti optimalna vrednost koeficijenta vremenskog udela pri prikupljanju energije α kada je ostvarivi protok maksimalan. Ostvarivi protok se povećava za vrednosti $\alpha < 0.05$, dok dalje povećanje α dovodi do smanjenja

ostvarivog protoka. U slučaju prenosa sa PS protokolom, ostvarivi protok se povećava sa koeficijentom udela snage pri prikupljanju energije ρ za male vrednosti ρ , jer se tada više snage koristi za prikupljanje energije, pa se predajna snaga sekundarnog releja povećava. Međutim, u slučaju daljeg povećanja dolazi do zasićenja, pošto je maksimalna predajna snaga releja određena strožijim ograničenjem koje zahteva primarna mreža, a srednji odnos snage signala i šuma na sekundarnom releju nije zavistan od ρ .

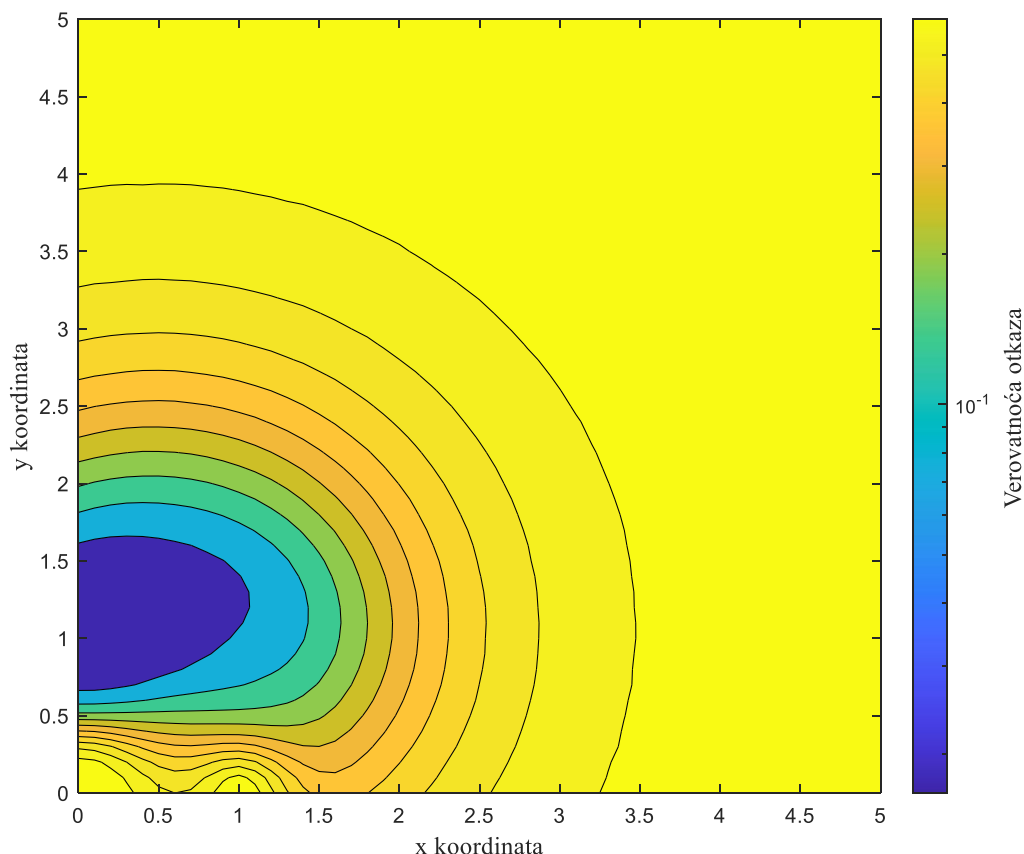
Veći ostvarivi protok se postiže kada je srednje pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do primarnih prijemnika manje jer je tada veća dozvoljena snaga kojom sekundarni predajnik može da emituje i samim tim je veća energija koja se prikuplja na sekundarnom releju. Više prikupljene energije znači veću raspoloživu predajnu snagu sekundarnog releja koja u slučaju kada je srednje pojačanje kanala od sekundarnog releja do primarnih prijemnika manje podrazumeva slabije ograničenje zbog interferencije na primarnim prijemnicima.



Slika 4.19. – Ostvarivi protok zasnovan na verovatnoći otkaza u zavisnosti od koeficijenta za prikupljanje energije, za različite protokole za prikupljanje energije.

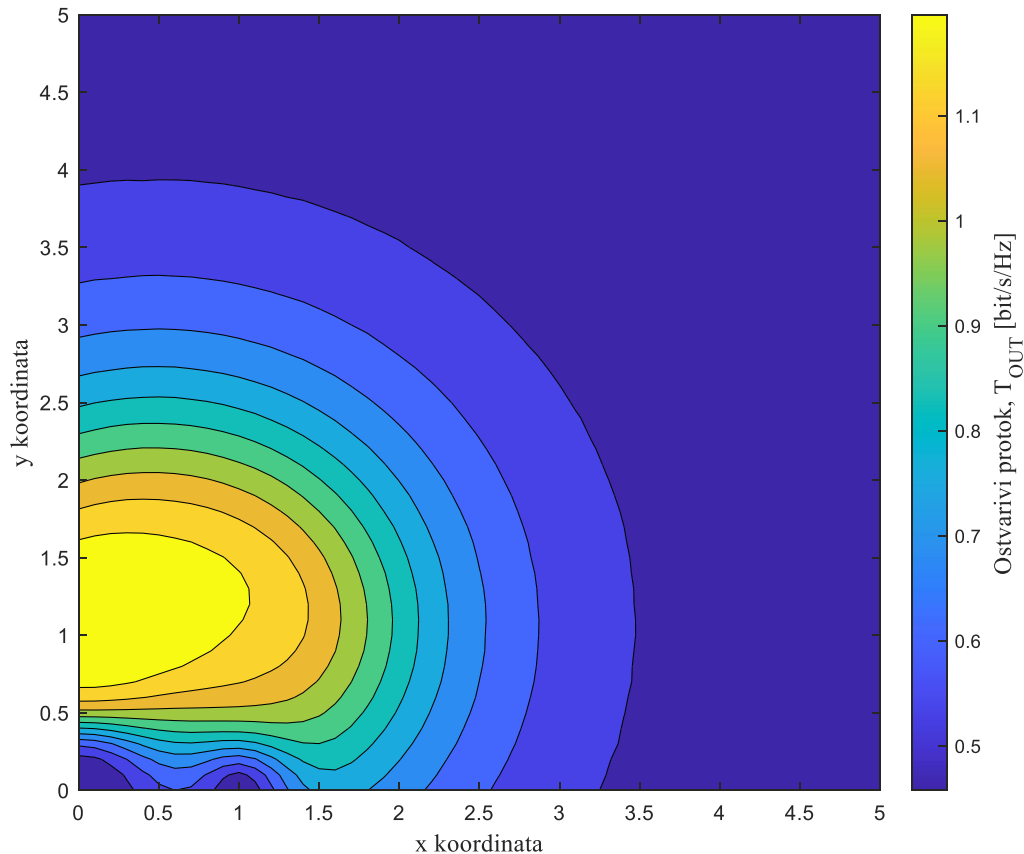
Uticaj položaja sekundarnog releja na performanse sistema prikazan je na slikama 4.20.-4.21. Položaji primarnog predajnika i primarnog prijemnika su (0,0) i (1,0), respektivno. Sekundarni predajnik i sekundarni prijemnik su postavljeni na pozicije (0,1) i (1,1), respektivno, dok se pozicija sekundarnog releja menja duž x - i y - ose Dekartovog koordinatnog sistema. Prag interferencije je jednak $Q_p = 15\text{dB}$, a verovatnoća otkaza primarne mreže je $P_{out,PU} = 0.01$. U analiziranim scenarijima pojačanje snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja je $\Omega_{STxSR} = 2\text{ dB}$ dok je pojačanje snage kanala od sekundarnog releja do sekundarnog prijemnika $\Omega_{SRsRx} = 0\text{ dB}$. Srednje pojačanje snage u kanalu interferencije od primarnog predajnika do sekundarnog releja je $\Omega_{I_R} = 2\text{ dB}$, dok je srednje pojačanje snage u kanalu interferencije od primarnog predajnika do sekundarnog prijemnika $\Omega_{I_{rx}} = 0\text{ dB}$.

Uticaj položaja sekundarnog releja na verovatnoću otkaza sekundarnog sistema prikazan je na slici 4.20. Analizom dobijenih rezultata može se odrediti optimalna pozicija releja kada je najmanja verovatnoća otkaza (0.1,1.1). Optimalna x -koordinata pokazuje da se manja verovatnoća otkaza postiže ako se relej nalazi bliže sekundarnom predajniku u odnosu na sekundarni prijemnik. Optimalna y -koordinata pokazuje da se optimalne performanse postižu, ako je relej pozicioniran na nešto većoj udaljenosti od primarne mreže. Korišćenjem prikazane analize može se obezbediti minimalna verovatnoća otkaza identifikacijom optimalnih vrednosti x - i y -koordinata releja, koje zavise od različitih parametara sistema i kanala.



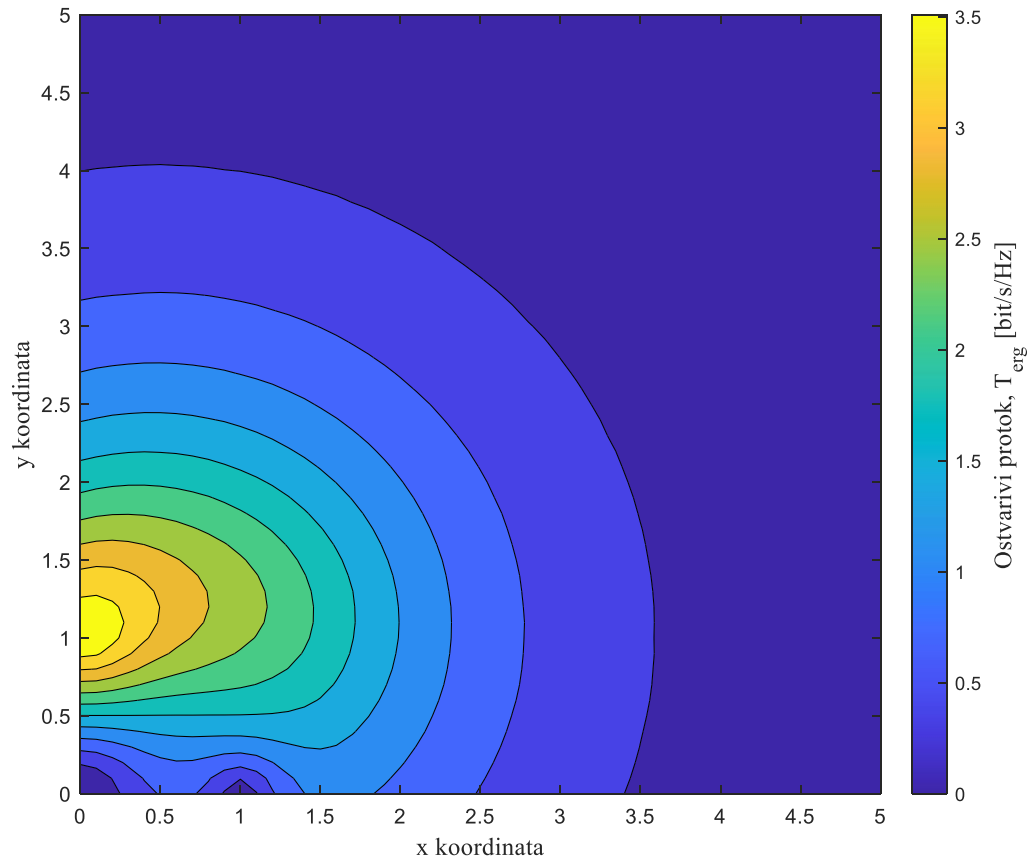
Slika 4.20. – Verovatnoća otkaza u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan.

Uticaj položaja sekundarnog releja na ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza sekundarnog sistema prikazan je na slici 4.21. Analizom dobijenih rezultata može se odrediti optimalna pozicija releja kada je vrednost ostvarivog protoka najveća (0.1,1.1). Optimalna x -koordinata pokazuje da se veći ostvarivi protok postiže ako se relej nalazi bliže sekundarnom predajniku u odnosu na sekundarni prijemnik. Optimalna y -koordinata pokazuje da se optimalne performanse postižu, ako je relej pozicioniran na nešto većoj udaljenosti od primarne mreže. Korišćenjem prikazane analize može se obezbediti maksimalan ostvarivi protok identifikacijom optimalnih vrednosti x - i y -koordinata releja, koje zavise od različitih parametara sistema i kanala.



Slika 4.21. – Ostvarivi protok zasnovan na kapacitetu otkaza u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan.

Uticaj položaja sekundarnog releja na ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu sekundarnog sistema prikazan je na slici 4.22. Analizom dobijenih rezultata može se odrediti optimalna pozicija releja kada je vrednost ostvarivog protoka najveća (0,1.1). Optimalna x -koordinata pokazuje da se veći ostvarivi protok postiže ako se relej nalazi bliže sekundarnom predajniku u odnosu na sekundarni prijemnik. Optimalna y -koordinata pokazuje da se optimalne performanse postižu, ako je relej pozicioniran na nešto većoj udaljenosti od primarne mreže. Korišćenjem prikazane analize može se obezbediti maksimalan ostvarivi protok identifikacijom optimalnih vrednosti x - i y -koordinata releja, koje zavise od različitih parametara sistema i kanala.



Slika 4.22. – Ostvarivi protok zasnovan na ergodičnom kapacitetu u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan.

5. Uticaj mobilnosti sekundarnog prijemnika i prislušivača u kognitivnom kooperativnom sistemu na verovatnoću otkaza poverljivosti

Zaštita informacija u bežičnom telekomunikacionom sistemu se može obavljati putem odgovarajuće signalizacije i kodiranja kanala, tj. korišćenjem karakteristika bežičnih kanala. Cilj je sprečiti prislušivanje prenosa legitimnih korisnika od strane zlonamernog čvora (prislušivača). Sekundarni korisnici u bežičnoj telekomunikacionoj mreži vrše razmenu informacija pri čemu te informacije mogu biti presretne od strane prislušivača. U zavisnosti od aktivnosti, prislušivači mogu biti aktivni ili pasivni. Pasivni prislušivač ne vrši emitovanje informacija već samo prisluškuje informacije, dok aktivni prislušivač osim prislušivanja vrši i emitovanje. U bežičnim telekomunikacionim mrežama, prislušivači su najčešće pasivni.

U ovom poglavlju biće predstavljene performanse kooperativnog kognitivnog sistema kada pasivni zlonamerni čvor pokušava da presretne prenos između sekundarnih korisnika. Analiza je izvršena za kooperativni sistem u kome se sekundarni predajnik napaja sa posebno namenjenog izvora za bežični prenos energije. Analiza je izvršena i za kooperativni relejni sistem u kome se komunikacija između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika odvija korišćenjem sekundarnog releja. Analizirani su scenariji u kojima sekundarni prijemnik i prislušivač imaju fiksne pozicije, kao i scenariji u kojima se u obzir uzimaju kretanja sekundarnog prijemnika i prislušivača.

5.1 Verovatnoća otkaza poverljivosti u kooperativnom sistemu sa namenskim izvorom energije

U ovom odeljku, posmatra se sistem u kojem sekundarni predajnik komunicira sa sekundarnim prijemnikom u prisustvu prislušivača. Sekundarni predajnik napaja se primenom namenskog izvora energije. Analiza performansi je izvršena za slučaj kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo. Razmatrani su scenariji u kojima sekundarni prijemnik i prislušivač mogu imati fiksne pozicije ili biti mobilni, dok svi ostali čvorovi u mreži imaju fiksne pozicije.

Jedna od metrika za procenu stepena poverljivosti u sistemu je verovatnoća otkaza poverljivosti, koja se definiše kao verovatnoća da kapacitet poverljivosti bude manji od definisanog praga, R_S

$$P_{SOP} = \Pr\{C_S < R_S\}, \quad (5.1)$$

pri čemu se kapacitet poverljivosti C_S može definisati na sledeći način [133]

$$C_S = \begin{cases} C_{STxSRx} - C_{STxE}, & \gamma_{SRx} > \gamma_E, \\ 0, & \gamma_{SRx} \leq \gamma_E, \end{cases} \quad (5.2)$$

gde je C_{STxSRx} kapacitet legitimnog kanala, C_{STxE} kapacitet prislušnog kanala, γ_{SRx} prijemni odnos signal/šum na sekundarnom prijemu, a γ_E prijemni odnos signal/šum na prisluškivaču.

Kapacitet legitimnog kanala C_{STxSRx} se može odrediti na sledeći način

$$C_{STxSRx} = (1 - \alpha) \log_2(1 + \gamma_{SRx}), \quad (5.3)$$

gde je α faktor za prikupljanje energije definisan u odeljku 2.3.1, dok se kapacitet prislušnog kanala C_E može prikazati kao

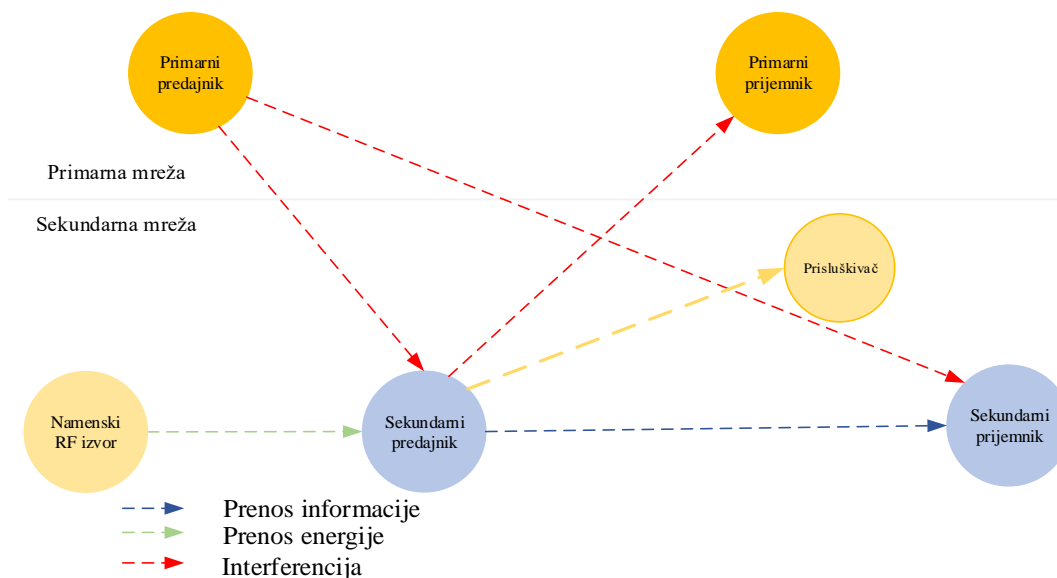
$$C_E = (1 - \alpha) \log_2(1 + \gamma_E). \quad (5.4)$$

Zamenom jednačina (5.3) i (5.4) u (5.2), izraz za kapacitet poverljivosti se može zapisati u obliku

$$C_S = \begin{cases} (1 - \alpha) \log_2(1 + \gamma_{SRx}) - (1 - \alpha) \log_2(1 + \gamma_E), & \gamma_{SRx} > \gamma_E, \\ 0, & \gamma_{SRx} \leq \gamma_E. \end{cases} \quad (5.5)$$

5.1.1 Verovatnoća otkaza poverljivosti u slučaju kada sekundarni prijemnik i prisluškivač imaju fiksne pozicije

Na slici 5.1. prikazan je model sistema koji se posmatra.



Slika 5.1. – Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i prisluškivačem.

Signal poslat sa namenskog izvora za bežični prenos energije je na sekundarnom predajniku predstavljen jednačinom (2.8), a energija koja se bežično sakupi na sekundarnom predajniku može se izraziti preko (2.9). Emisiona snaga sekundarnog predajnika zavisi od prikupljene energije i vremena tokom kojeg se vrši prenos signala i može se opisati jednačinom (2.10). Tada je trenutni odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku predstavljen jednačinom (3.28) i može se zapisati u skraćenom obliku

$$\gamma_{SRx} = K_1 \gamma_1 \gamma_2, \quad (5.6)$$

gde je $K_1 = \frac{\eta \alpha P_{PB}}{\sigma_{SRx}^2 (1-\alpha) D_{PBSTx}^\delta}$, $\gamma_1 = |h_{PBSTx}|^2$ i $\gamma_2 = |h_{STxSRx}|^2 D_{STxSRx}^{-\delta}$.

Prijemni signal na prislušivaču je dat sa

$$y_E = \sqrt{\frac{P_{STx,EH}}{D_{STxE}^\delta}} h_{STxE} x_{STx} + n_E, \quad (5.7)$$

gde je D_{STxE} rastojanje između sekundarnog predajnika i prislušivača, a n_E komponenta aditivnog belog Gausovog šuma na prislušivaču sa srednjom vrednošću snage σ_E^2 .

Trenutni odnos signal/šum na prislušivaču se može predstaviti u obliku

$$\gamma_E = \frac{P_{STx,EH} |h_{STxE}|^2}{D_{STxE}^\delta \sigma_E^2} = K_1 |h_{PBSTx}|^2 \frac{|h_{STxE}|^2}{D_{STxE}^\delta}, \quad (5.8)$$

ili u skraćenom obliku

$$\gamma_E = K_1 \gamma_1 \gamma_3, \quad (5.9)$$

gde je $\gamma_3 = |h_{STxE}|^2 D_{STxE}^{-\delta}$.

Anvelopa fedinga u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika prati Nakagami- m raspodelu, pa pojačanje snage u kanalu prati Gama raspodelu. Tada se PDF trenutnog pojačanja snage kanala od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika može predstaviti jednačinom (3.1). Dalje, uvođenjem smene $\gamma_{K_1} = K_1 \gamma_1$, odgovarajuća funkcija gustine verovatnoće slučajne promenljive γ_{K_1} može se odrediti korišćenjem [127, jednačina (5-7)], pa ima konačan oblik

$$f_{\gamma_{K_1}}(x) = \frac{1}{K_1} f_{\gamma_1}\left(\frac{x}{K_1}\right) = \frac{1}{K_1 \Gamma(m_1)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1} \left(\frac{x}{K_1}\right)^{m_1-1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \frac{x}{K_1}\right). \quad (5.10)$$

Uvođenjem smene $\gamma_{th} = 2^{\frac{R_s}{1-\alpha}}$ u jednačinu (5.1) i korišćenjem jednačine (5.5) izraz za verovatnoću otkaza poverljivosti se može predstaviti jednačinom

$$P_{SOP} = \Pr\left\{\frac{1+\gamma_{SRx}}{1+\gamma_E} < \gamma_{th}\right\}. \quad (5.11)$$

Zbog složenog oblika združene funkcije gustine verovatnoće slučajnih promenljivih γ_{SRx} i γ_E , izraz za verovatnoću otkaza poverljivosti nije moguće odrediti u matematički zatvorenom obliku. Uvođenjem aproksimacije

$$\frac{1 + \gamma_{SRx}}{1 + \gamma_E} \approx \frac{\gamma_{SRx}}{\gamma_E}, \quad (5.12)$$

koja predstavlja donju granicu performansi (*lower bound*) moguće je verovatnoću otkaza poverljivosti dobiti u zatvorenom obliku [134]. Na osnovu određenog izraza za donju granicu može se analizirati uticaj parametara sistema na performanse sa zadovoljavajućom tačnošću.

Na osnovu prethodnog, izraz za donju granicu verovatnoće otkaza poverljivosti se može napisati u obliku

$$P_{SOP, LB} = \Pr \left\{ \gamma_E > \frac{\gamma_{SRx}}{\gamma_{th}} \right\} = \int_{x=0}^{\infty} f_{\gamma_{K1}}(x) \int_{\gamma_2=0}^{\infty} \int_{\gamma_3=\frac{\gamma_2}{\gamma_{th}}}^{\infty} f_{\gamma_2, \gamma_3|X}(\gamma_2, \gamma_3) d\gamma_2 d\gamma_3 dx. \quad (5.13)$$

Primenom jednakosti $f_{\gamma_2, \gamma_3|X}(\gamma_2, \gamma_3) = f_{\gamma_2|X}(\gamma_2) f_{\gamma_3|X}(\gamma_3)$, prethodni izraz postaje

$$P_{SOP, LB} = \int_{x=0}^{\infty} f_{\gamma_{K1}}(x) \int_{\gamma_2=0}^{\infty} f_{\gamma_2|X}(\gamma_2) \int_{\gamma_3=\frac{\gamma_2}{\gamma_{th}}}^{\infty} f_{\gamma_3|X}(\gamma_3) d\gamma_3 d\gamma_2 dx. \quad (5.14)$$

Treći integral u gornjem izrazu $\int_{\gamma_3=\frac{\gamma_2}{\gamma_{th}}}^{\infty} f_{\gamma_3|X}(\gamma_3) d\gamma_3$ se može zapisati u obliku

$$\int_{\gamma_3=\frac{\gamma_2}{\gamma_{th}}}^{\infty} f_{\gamma_3|X}(\gamma_3) d\gamma_3 = \left(1 - F_{\gamma_3|X} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_{th}} \right) \right), \quad (5.15)$$

pa se izraz za donju granicu verovatnoće otkaza poverljivosti može zapisati u obliku

$$P_{SOP, LB} = \int_{x=0}^{\infty} f_{\gamma_{K1}}(x) \int_{\gamma_2=0}^{\infty} f_{\gamma_2|X}(\gamma_2) \left(1 - F_{\gamma_3|X} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_{th}} \right) \right) d\gamma_2 dx. \quad (5.16)$$

Koristeći jednačinu (3.2) i [127, jednačina (5-7)], odgovarajuća funkcija gustine verovatnoće $f_{\gamma_2|X}(\gamma_2)$ se može predstaviti izrazom

$$f_{\gamma_2|X}(\gamma_2) = \frac{1}{x} f_{\gamma_2} \left(\frac{\gamma_2}{x} \right) = \frac{1}{x \Gamma(m_2)} \left(\frac{m_2}{\Omega_2} \right)^{m_2} \left(\frac{\gamma_2}{x} \right)^{m_2-1} \exp \left(-\frac{m_2}{\Omega_2} \frac{\gamma_2}{x} \right). \quad (5.17)$$

Koristeći jednačinu (2.39), funkcija raspodele $F_{\gamma_3|X}(\gamma_3)$ može se predstaviti u obliku

$$F_{\gamma_3|X} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_{th}} \right) = 1 - \sum_{k_2=0}^{m_E-1} \frac{1}{k_2!} \left(\frac{m_E \gamma_2}{\Omega_E \gamma_{th} x} \right)^{k_2} \exp \left(-\frac{m_E \gamma_2}{\Omega_E \gamma_{th} x} \right), \quad (5.18)$$

pri čemu su $\Omega_E = E[h_{STxE}]^2 D_{STxE}^{-\delta}$, i m_E parametri Nakagami- m kanala između sekundarnog predajnika i prislušivača.

Ukoliko se sa I označi pomoćni integral u jednačini (5.16), dalje se primenom jednačina (5.17) i (5.18) može definisati i zapisati u sledećem obliku

$$I = \int_{\gamma_2=0}^{\infty} f_{\gamma_2|X}(\gamma_2) \left(1 - F_{\gamma_3|X}\left(\frac{\gamma_2}{\gamma_{th}}\right)\right) d\gamma_2 = \frac{1}{x} \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} \left(\frac{1}{x}\right)^{m_2-1} \sum_{k_2=0}^{m_E-1} \frac{1}{k_2!} \left(\frac{m_E}{\gamma_{th}\Omega_E x}\right)^{k_2} I_1, \quad (5.19)$$

gde je $I_1 = \int_{\gamma_2=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{m_2}{\Omega_2} \frac{\gamma_2}{x}\right) \exp\left(-\frac{m_E \gamma_2}{\gamma_{th} x \Omega_E}\right) (\gamma_2)^{k_2+m_2-1} d\gamma_2$.

Korišćenjem transformacije elementarne funkcije u Mejerovu funkciju, [128, (01.03.26.0004.01)] integral I_1 postaje

$$I_1 = \int_{\gamma_2=0}^{\infty} G_{0,1}^{1,0}\left(\frac{m_2 \gamma_2}{\Omega_2 x} \middle| \begin{matrix} 0 \\ - \end{matrix}\right) G_{0,1}^{1,0}\left(\frac{m_E \gamma_2}{\gamma_{th} x \Omega_E} \middle| \begin{matrix} 0 \\ - \end{matrix}\right) (\gamma_2)^{k_2+m_2-1} d\gamma_2, \quad (5.20)$$

pa se upotrebom jednakosti [128, (07.34.21.0011.01)] dobija konačno rešenje integrala I_1

$$I_1 = \left(\frac{\gamma_{th} x \Omega_E}{m_E}\right)^{m_2+k_2} G_{1,1}^{1,1}\left(\frac{m_2 \Omega_E \gamma_{th}}{m_E \Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1-m_2-k_2 \\ 0 \end{matrix}\right). \quad (5.21)$$

Zamenom u jednačinu (5.19) i primenom jednačine (5.16) dobija se sledeći aproksimativan izraz za verovatnoću otkaza poverljivosti

$$P_{SOP, LB} = \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} \sum_{k_2=0}^{m_E-1} \frac{1}{k_2!} \left(\frac{\gamma_{th} \Omega_E}{m_E}\right)^{m_2} G_{1,1}^{1,1}\left(\frac{m_2 \Omega_E \gamma_{th}}{m_E \Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1-m_2-k_2 \\ 0 \end{matrix}\right) \times \frac{1}{\Gamma(m_1)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1} \left(\frac{1}{K_1}\right)^{m_1} I_2, \quad (5.22)$$

gde je $I_2 = \int_{x=0}^{\infty} x^{m_1-1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \frac{x}{K_1}\right) dx$.

Korišćenjem transformacije elementarne funkcije u Mejerovu funkciju, [128, (01.03.26.0004.01)] i [128, (07.34.21.0084.01)] dobija se konačan izraz za integral I_2

$$I_2 = \Gamma(m_1) \left(\frac{m_1}{\Omega_1 K_1}\right)^{-m_1}. \quad (5.23)$$

Aproksimativan izraz za verovatnoću otkaza poverljivosti se može konačno zapisati u sledećem zatvorenom obliku

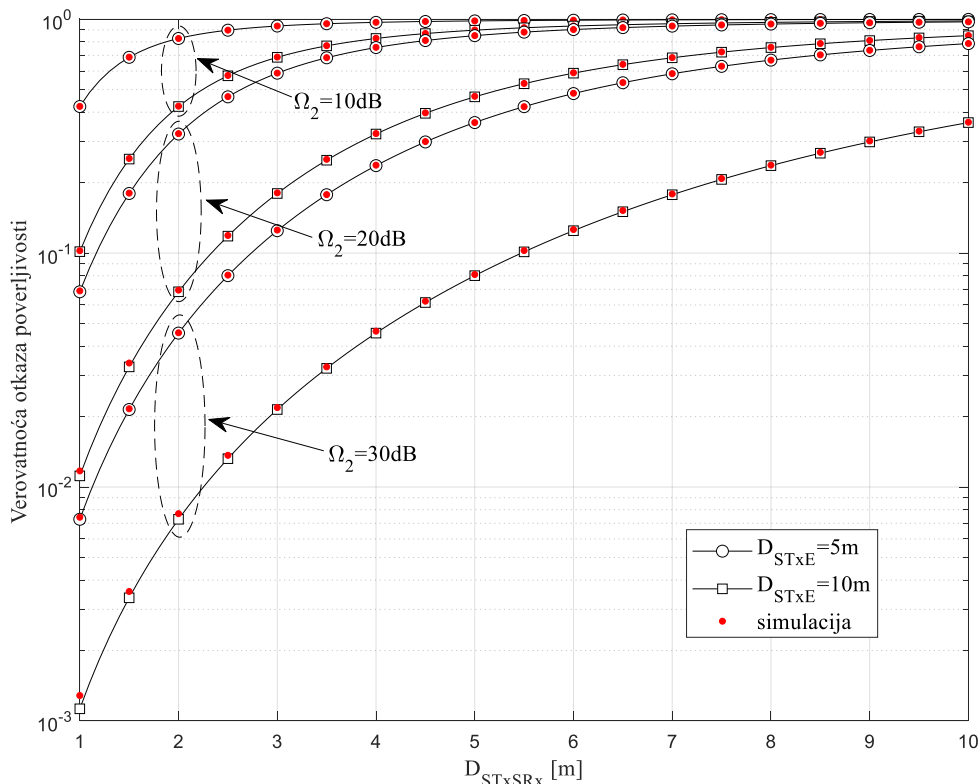
$$P_{SOP, LB} = \frac{1}{\Gamma(m_2)} \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2} \sum_{k_2=0}^{m_E-1} \frac{1}{k_2!} \left(\frac{\gamma_{th} \Omega_E}{m_E}\right)^{m_2} G_{1,1}^{1,1}\left(\frac{m_2 \Omega_E \gamma_{th}}{m_E \Omega_2} \middle| \begin{matrix} 1-m_2-k_2 \\ 0 \end{matrix}\right). \quad (5.24)$$

U narednom delu su prikazani numerički rezultati koji pokazuju zavisnost verovatnoće otkaza poverljivosti i kapaciteta poverljivosti od parametara sistema i karakteristika propagacionog okruženja. U tabeli 5.1. su prikazani parametri koji su korišćeni u analizi performansi opisanog sistema.

Tabela 5.1. Parametri simulacije sistema sa namenskim izvorom energije kada sekundarni prijemnik i prislušivač imaju fiksne pozicije, u slučaju zanemarljivog ograničenja kognitivne mreže.

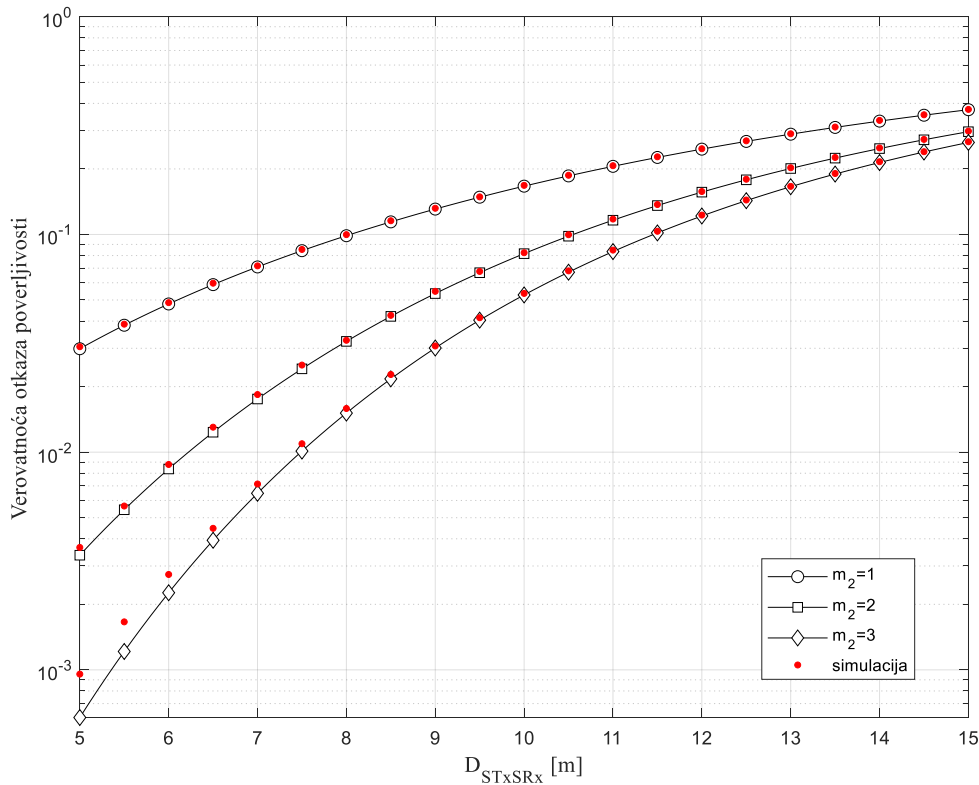
Parametar	Slika 5.2.	Slika 5.3.	Slika 5.4.
D_{PBSTx} [m]	1	1	1
D_{STxSRx} [m]	1–10	5–15	5
P_{PB} [dB]	20	20	20
Ω_1 [dB]	10	10	10
Ω_2 [dB]	10–30	30	10–30
Ω_E [dB]	20	20	10–20
D_{STxE} [m]	5–10	10	10–20
R_S [bit/s/Hz].	1.25	0.5	0.5
η	0.9	0.9	0.9
α	0.5	0.5	0.5
m_1	1	1	1
m_2	1	1–3	1
m_E	1	1	1

Na slici 5.2. je prikazana verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} . Analizirani su scenariji u kojima se menja vrednost pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, kao i rastojanje između sekundarnog predajnika i prislušivača. Rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m, vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB. Pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB. Verovatnoća otkaza poverljivosti sekundarne mreže raste sa povećanjem rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika. Ovo ponašanje performansi je očekivano, jer je sa porastom rastojanja između sekundarnih korisnika manja prijemna snaga na sekundarnom prijemniku. Slično tome, vrednost verovatnoće otkaza se poboljšava sa većim pojačanjem snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, jer je u tom slučaju veća vrednost prijemne snage na sekundarnom prijemniku. U skladu sa očekivanjima, u slučaju kada se prislušivač nalazi na većem rastojanju od sekundarnog predajnika vrednost verovatnoće otkaza poverljivosti je manja usled smanjene snage prijemnog signala na prislušivaču.



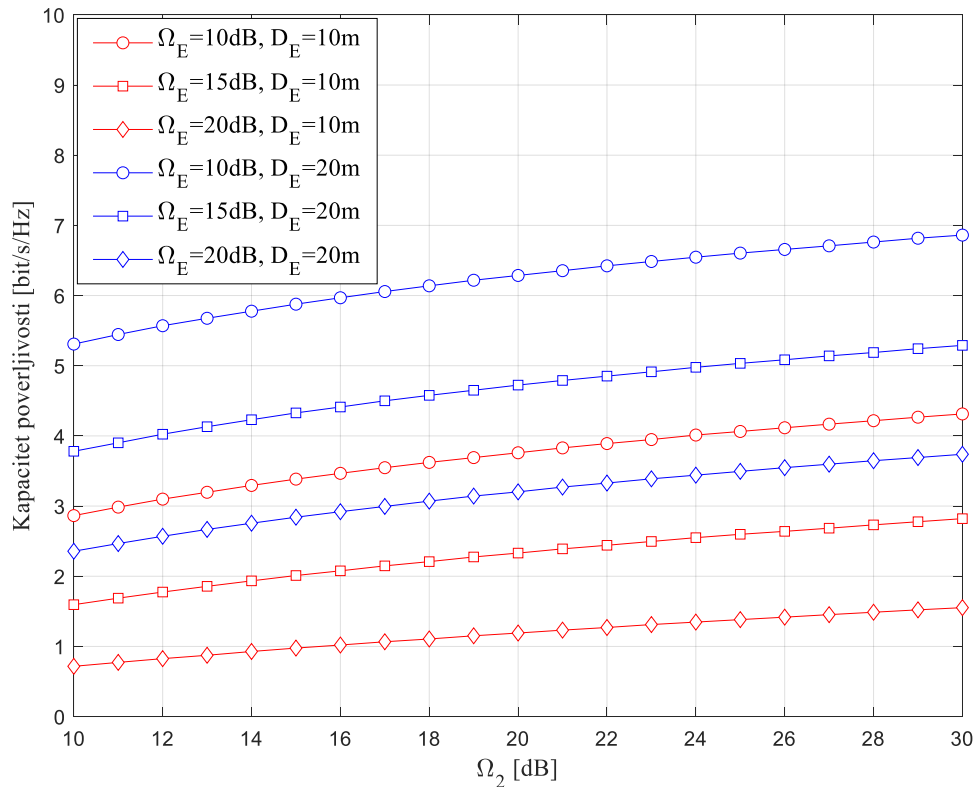
Slika 5.2. – Verovatnoća otkaza poverljivosti u zavisnosti od rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} .

Verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} za različite vrednosti parametra m_2 Nakagami- m kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika prikazana je na slici 5.3. Rastojanje između namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m, vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB. Pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB, a pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika je $\Omega_2 = 30$ dB. Verovatnoća otkaza poverljivosti sekundarne mreže raste sa povećanjem rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, kao što je izloženo i u zapažanjima vezanim za sliku 5.2. Za veću vrednost Nakagami- m parametra m_2 može se uočiti da se postiže manja vrednost verovatnoće otkaza poverljivosti, jer je tada dubina fedinga na linku od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika manja. Za male vrednosti verovatnoće otkaza poverljivosti, javlja se manje odstupanje u dobijenim rezultatima putem analitičkih rezultata i simulacije, jer analitički rezultati predstavljaju donju granicu performansi.



Slika 5.3. – Verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji rastojanja D_{STxSRx} za različite vrednosti parametara Nakagami- m fedinga.

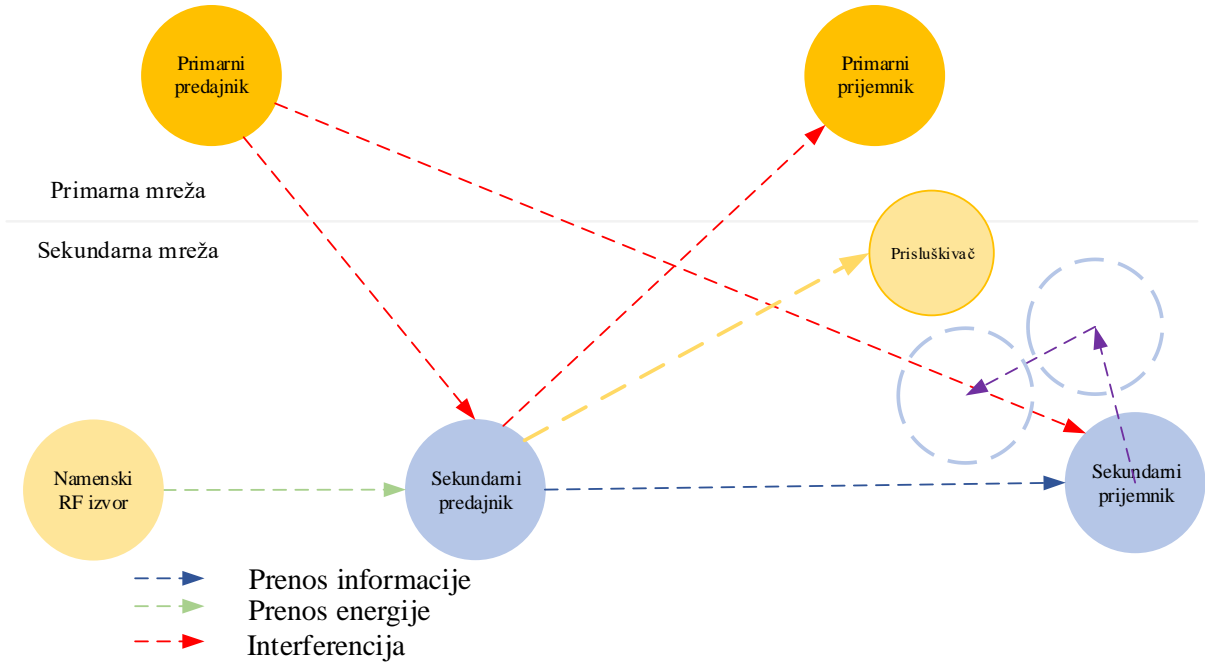
Na slici 5.4. je prikazan kapacitet poverljivosti u funkciji srednjeg pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika Ω_2 . Analiza je izvršena za scenarije u kojima se menjaju rastojanje i vrednost pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i prislušivača. Rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m, vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB. Pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB. Kapacitet poverljivosti sekundarne mreže raste sa povećanjem rastojanja između sekundarnog predajnika i prislušivača, a opada sa porastom srednjeg pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i prislušivača. U oba slučaja vrednost snage na prislušivaču zavisi od parametara u kanalu između sekundarnog predajnika i prislušivača. Sa većim rastojanjem između sekundarnog predajnika i prislušivača manja je prijemna snaga na prislušivaču, a do sličnog efekta se dolazi i kada je manje pojačanje snage u kanalu između sekundarnog predajnika i prislušivača. U skladu sa očekivanjima, kapacitet poverljivosti sekundarne mreže raste sa povećanjem srednjeg pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika.



Slika 5.4. – Kapacitet poverljivosti u zavisnosti od srednjeg pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika.

5.1.2 Verovatnoća otkaza poverljivosti u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan i prislušivač ima fiksnu poziciju

Posmatra se sistem prikazan na slici 5.5, u kojem sekundarni predajnik komunicira sa sekundarnim prijemnikom u prisustvu prislušivača. Sekundarni predajnik i prislušivač imaju fiksne pozicije. Sekundarni prijemnik je mobilan i njegovo kretanje opisano je RWP modelom kretanja.



Slika 5.5. – Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije, mobilnim sekundarnim prijemnikom i prisluškivačem sa fiksnom pozicijom.

Izraz za verovatnoću otkaza poverljivosti se određuje na osnovu izraza (5.16) pri čemu se funkcija gustine verovatnoće pojačanja snage na sekundarnom linku sa mobilnim korisnikom može prikazati u sledećem obliku

$$f_{\gamma_2|X}(x) = \frac{1}{x} \frac{1}{\delta \Gamma(m_1)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_2}{\Omega_B} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)} \left(\frac{\gamma_2}{x} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}+1\right)} G_{1,1} \left(\frac{m_2 \gamma_2}{\Omega_2 x} \middle| \frac{1}{m_2 + \frac{\beta_k+1}{\delta}}, 0 \right), \quad (5.25)$$

dok je funkcija raspodele trenutnog pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do prisluškivača predstavljena jednačinom (5.18). Tada se pomoćni integral iz izraza (5.16)

$I = \int_{\gamma_2=0}^{\infty} f_{\gamma_2|X}(\gamma_2) \left(1 - F_{\gamma_3|X} \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_{th}} \right) \right) d\gamma_2$ može izraziti u obliku

$$I = \frac{1}{x} \frac{1}{\delta \Gamma(m_2)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_2}{\Omega_2} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)} x^{\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}+1\right)} \sum_{k_2=0}^{m_E-1} \frac{1}{k_2!} \left(\frac{m_E}{\gamma_{th} \Omega_E x} \right)^{k_2} I_1, \quad (5.26)$$

gde je $I_1 = \int_{\gamma_2=0}^{\infty} (\gamma_2)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}+1\right)+k_2} G_{1,1} \left(\frac{m_2 \gamma_2}{\Omega_2 x} \middle| \frac{1}{m_2 + \frac{\beta_k+1}{\delta}}, 0 \right) \exp \left(-\frac{m_E \gamma_2}{\gamma_{th} x \Omega_E} \right) d\gamma_2$.

Korišćenjem transformacije elementarne funkcije u Mejerovu funkciju, [128, (01.03.26.0004.01)] i transformacije [128, (07.34.21.0011.01)], integral I_1 se dobija u sledećem obliku

$$I_1 = \left(\frac{\gamma_{ih} x \Omega_E}{m_E} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)+k_2} G_{2,2}^{1,2} \left(\frac{m_2 \gamma_{ih} \Omega_E}{\Omega_2 m_E} \middle| \begin{matrix} 1, 1 + \frac{\beta_k+1}{\delta} - k_2 \\ m_1 + \frac{\beta_k+1}{\delta}, 0 \end{matrix} \right), \quad (5.27)$$

dok se izraz za verovatnoću otkaza poverljivosti može zapisati u obliku

$$P_{SOP, LB} = \frac{1}{\delta \Gamma(m_2)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_2}{\Omega_2} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)} \sum_{k_2=0}^{m_E-1} \frac{1}{k_2!} G_{2,2}^{1,2} \left(\frac{m_2 \gamma_{ih} \Omega_E}{\Omega_2 m_E} \middle| \begin{matrix} 1, 1 + \frac{\beta_k+1}{\delta} - k_2 \\ m_1 + \frac{\beta_k+1}{\delta}, 0 \end{matrix} \right) \times \frac{1}{\Gamma(m_1)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^{m_1} \left(\frac{\gamma_{ih} \Omega_E}{m_E} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}+1\right)} \left(\frac{1}{K_1} \right)^{m_1} \times I_2, \quad (5.28)$$

gde je $I_2 = \int_{x=0}^{\infty} x^{m_1-1} \exp\left(-\frac{m_1 x}{\Omega_1 K_1}\right) dx$.

Korišćenjem transformacije elementarne funkcije u Mejerovu funkciju, [128, (01.03.26.0004.01)] i transformacije [128, (07.34.21.0011.01)] integral I_2 je jednak

$$I_2 = \Gamma(m_1) \left(\frac{m_1}{\Omega_1 K_1} \right)^{-m_1}, \quad (5.29)$$

pa se izraz za verovatnoću otkaza poverljivosti konačno može zapisati u sledećem zatvorenom obliku

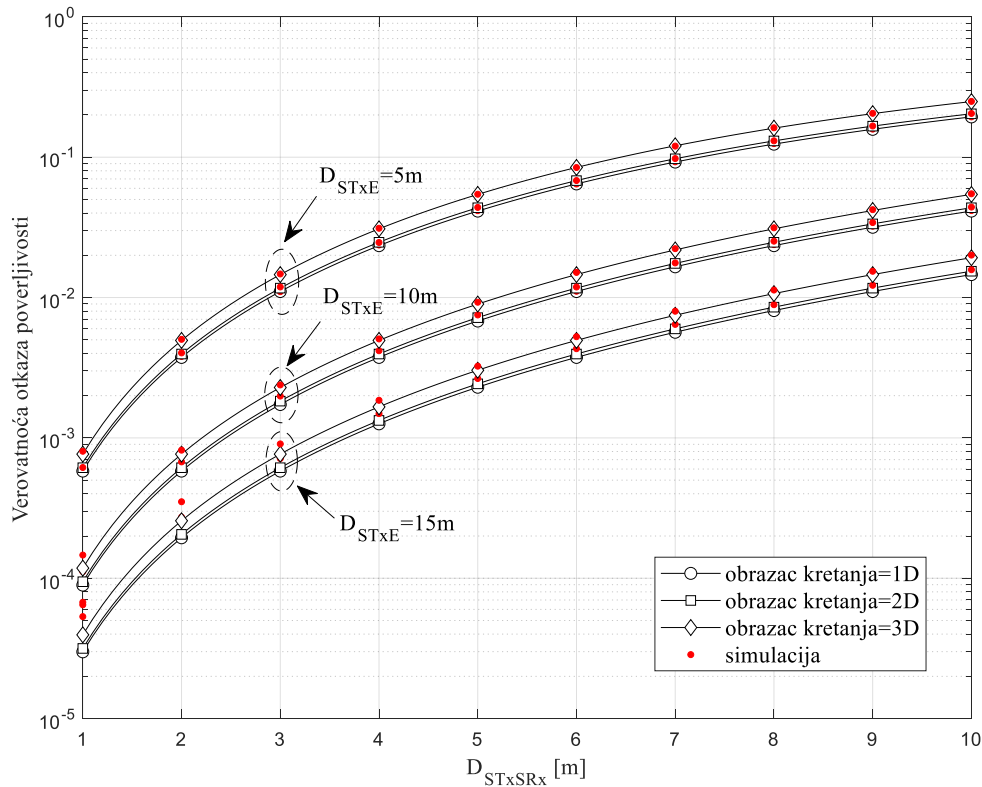
$$P_{SOP, LB} = \frac{1}{\delta \Gamma(m_2)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_2}{\Omega_2} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)} \sum_{k_2=0}^{m_E-1} \frac{1}{k_2!} G_{2,2}^{1,2} \left(\frac{m_2 \gamma_{ih} \Omega_E}{\Omega_2 m_E} \middle| \begin{matrix} 1, 1 + \frac{\beta_k+1}{\delta} - k_2 \\ m_1 + \frac{\beta_k+1}{\delta}, 0 \end{matrix} \right) \left(\frac{\gamma_{ih} \Omega_E}{m_E} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}+1\right)}. \quad (5.30)$$

U tabeli 5.2. su prikazani parametri koji su korišćeni u analizi performansi opisanog sistema. Na slikama 5.6. i 5.7. su prikazani numerički rezultati za verovatnoću otkaza poverljivosti, dok je na slici 5.8. pokazana zavisnost kapaciteta poverljivosti od parametara sistema.

Tabela 5.2. Parametri simulacije sistema sa namenskim izvorom energije kada je sekundarni prijemnik mobilan i prislušivač ima fiksnu poziciju.

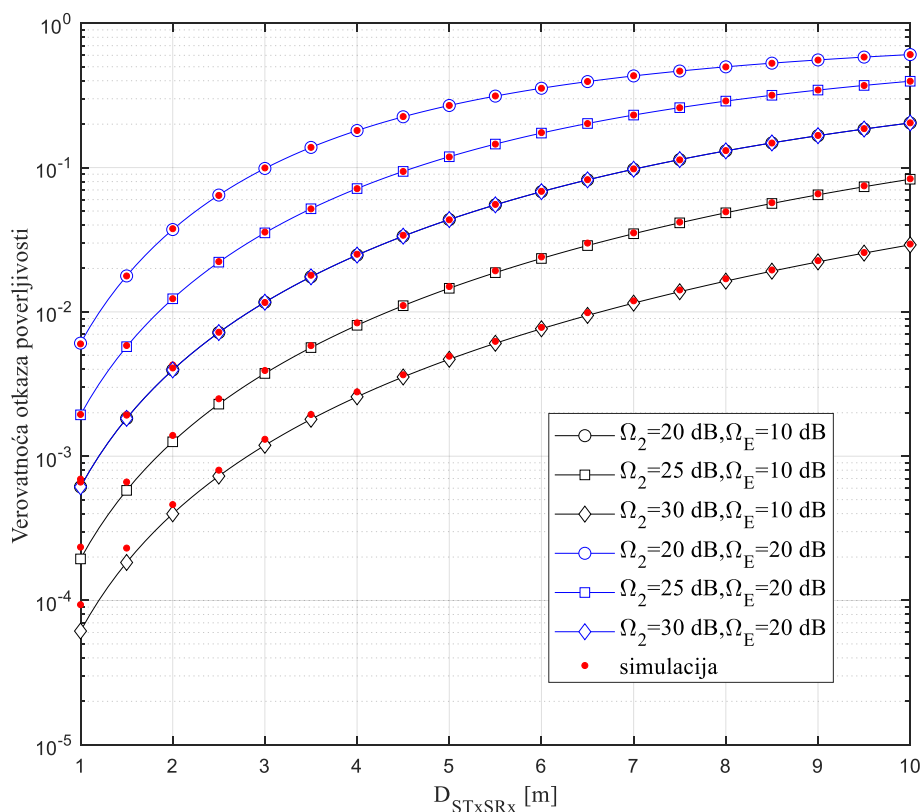
Parametar	Slika 5.6.	Slika 5.7.	Slika 5.8.
D_{PBSTx} [m]	1	1	1
D_{STxSRx} [m]	1–10	1–10	1–10
P_{PB} [dB]	20	20	20
Ω_1 [dB]	10	10	10
Ω_2 [dB]	30	20–30	20–30
Ω_E [dB]	20	10–20	20
D_{STxE} [m]	5–15	5	10
R_S [bit/s/Hz].	0.5	0.5	0.5
η	0.9	0.9	0.9
α	0.5	0.5	0.5
m_1	1	1	1
m_2	1	1	1
m_E	1	1	1
RWP	1D–3D	2D	1D–3D

Na slici 5.6. je prikazana verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji maksimalnog rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika, kao i za različite slučajeve rastojanja između sekundarnog predajnika i prislušivača. Rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m, vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB. Pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB, a pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika $\Omega_2 = 30$ dB. Verovatnoća otkaza poverljivosti sekundarne mreže raste sa povećanjem maksimalnog rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika. Dobijeni rezultati su u skladu sa očekivanjima, jer se sa porastom maksimalnog rastojanja između sekundarnog korisnika smanjuje prijemna snaga na sekundarnom prijemniku. Vrednost verovatnoće otkaza se smanjuje porastom rastojanja između sekundarnog predajnika i prislušivača, jer je u tom slučaju prijemna snaga na prislušivaču manja. Poređenjem verovatnoće otkaza poverljivosti za sva tri slučaja obrasca kretanja sekundarnog prijemnika, može se zaključiti da se najbolji rezultati postižu kada se sekundarni prijemnik kreće po 1D obrascu kretanja.



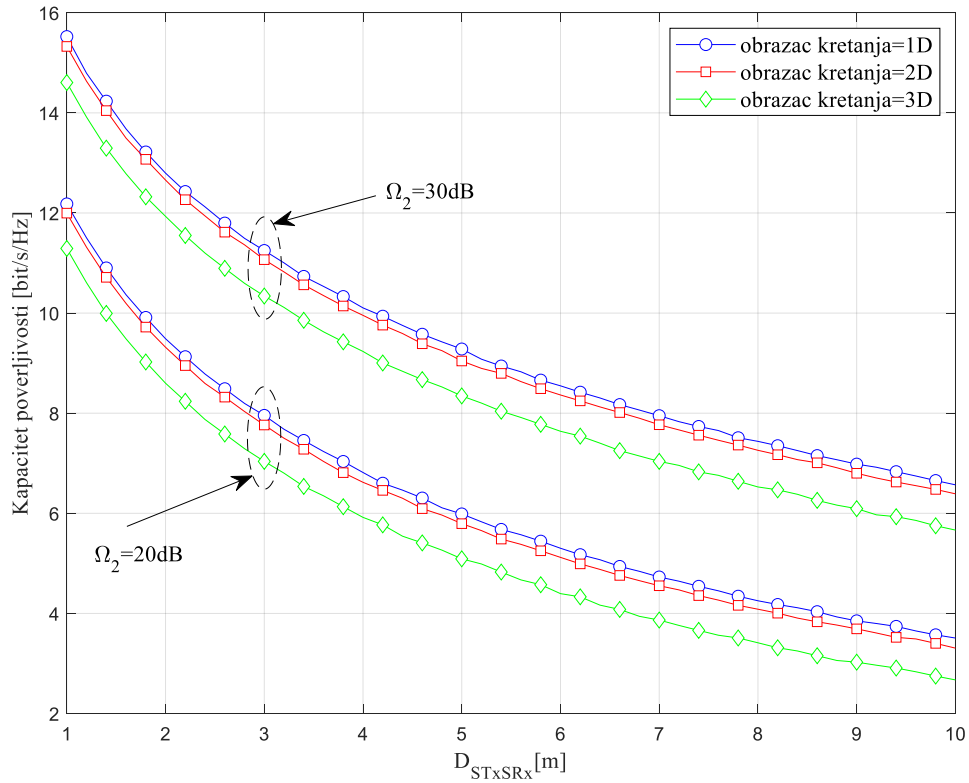
Slika 5.6. – Verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji maksimalnog rastojanja D_{STxSRx} , za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika.

Na slici 5.7. je prikazana verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji maksimalnog rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} . Analiza je izvršena za različite vrednosti pojačanja snage u kanalima od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika i od sekundarnog predajnika do prislušivača. Rastojanje između sekundarnog predajnika i prislušivača je $D_{STxE} = 5$ m, a rastojanje između namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m. Vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB, a pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB. Verovatnoća otkaza poverljivosti sekundarne mreže raste sa povećanjem maksimalnog rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, kao što je uočeno i na slici 5.6. Za istu vrednost pojačanja snage u kanalu od sekundarnog predajnika do prislušivača verovatnoća otkaza poverljivosti je manja kada je pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika veće, dok su performanse lošije kada je pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do prislušivača veće. Na osnovu dobijenih rezultata može se uočiti da se za set parametara $\Omega_2 = 30$ dB i $\Omega_E = 20$ dB postižu vrednosti verovatnoće otkaza poverljivosti približne vrednostima kao i kada su pojačanja snage u kanalima $\Omega_2 = 20$ dB i $\Omega_E = 10$ dB.



Slika 5.7. – Verovatnoća otkaza poverljivosti za različita pojačanja snage u kanalima od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika i do prislušivača.

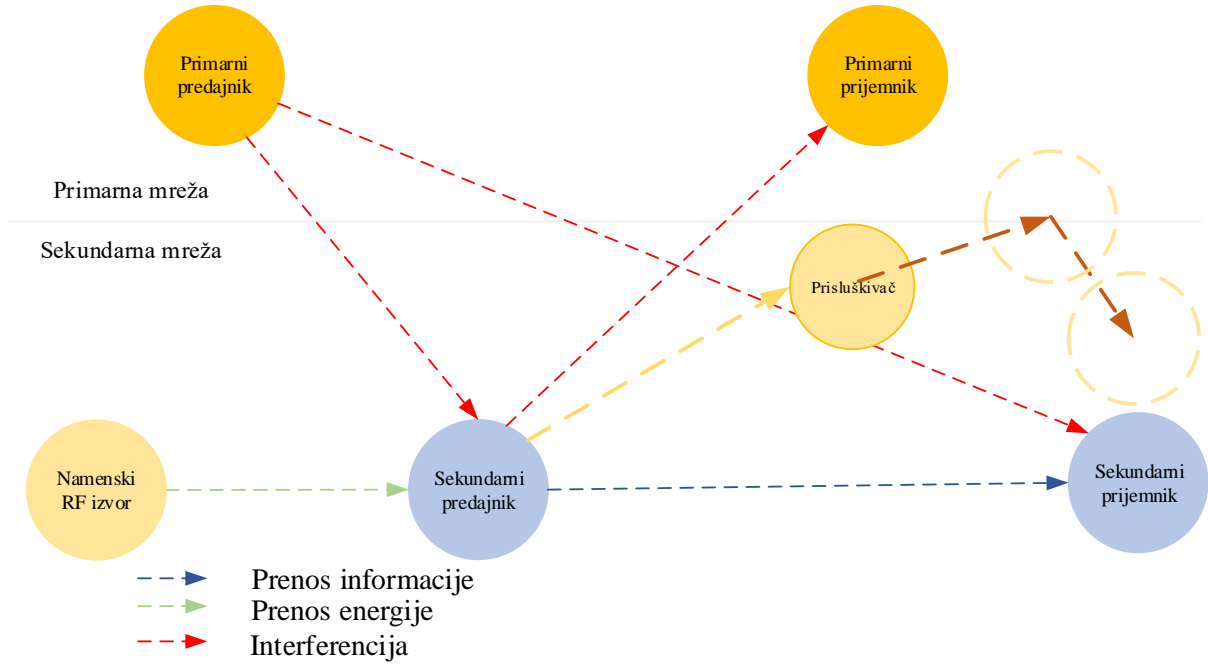
Na slici 5.8. je prikazan kapacitet poverljivosti u funkciji maksimalnog rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, pri čemu se menja i vrednost pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika. Analiza je izvršena za sva tri moguća obrasca kretanja sekundarnog prijemnika, dok prislušivač ima fiksnu poziciju. Rastojanje između namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m, vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB. Pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB. Kapacitet poverljivosti sekundarne mreže opada sa povećanjem rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, kao i sa smanjenjem pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika. U oba slučaja vrednost prijemne snage na sekundarnom prijemniku zavisi od parametara u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika. Kapacitet poverljivosti ima najveću vrednost kada se kretanje sekundarnog prijemnika može opisati 1D obrascem, dok je vrednost kapaciteta poverljivosti najmanja kada se kretanje može opisati 3D obrascem.



Slika 5.8. – Kapacitet poverljivosti za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika i različita maksimalna rastojanja D_{STxSRx} .

5.1.3 Verovatnoća otkaza poverljivosti u slučaju kada sekundarni prijemnik ima fiksnu poziciju i prislušivač je mobilan

U okviru ovog odeljka posmatra se sistem u kojem sekundarni predajnik komunicira sa sekundarnim prijemnikom u prisustvu prislušivača, kao što je prikazano na slici 5.9. Sekundarni predajnik i sekundarni prijemnik imaju fiksne pozicije, dok je prislušivač mobilan. Za opis kretanja prislušivača korišćen je RWP model kretanja.



Slika 5.9. – Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije i mobilnim prisluškivačem.

Koristeći jednačinu (5.13) verovatnoća otkaza poverljivosti može se predstaviti u obliku

$$P_{SOP, LB} = \Pr\{\gamma_{SRx} < \gamma_E \gamma_{th}\} = \int_{x=0}^{\infty} f_{\gamma_{k1}}(x) \int_{\gamma_3=0}^{\infty} \int_{\gamma_2=0}^{\gamma_3 \gamma_{th}} f_{\gamma_2, \gamma_3 | X}(\gamma_2, \gamma_3) d\gamma_2 d\gamma_3 dx. \quad (5.31)$$

Primenom jednakosti $f_{\gamma_2, \gamma_3 | X}(\gamma_2, \gamma_3) = f_{\gamma_2 | X}(\gamma_2) f_{\gamma_3 | X}(\gamma_3)$, izraz za verovatnoću otkaza poverljivosti tada postaje

$$P_{SOP, LB} = \int_{x=0}^{\infty} f_{\gamma_{k1}}(x) \int_{\gamma_3=0}^{\infty} f_{\gamma_3 | X}(\gamma_3) \int_{\gamma_2=0}^{\gamma_3 \gamma_{th}} f_{\gamma_2 | X}(\gamma_2) d\gamma_2 d\gamma_3 dx. \quad (5.32)$$

Treći integral iz prethodne jednačine može se zapisati na sledeći način

$$\int_{\gamma_2=0}^{\gamma_3 \gamma_{th}} f_{\gamma_2 | X}(\gamma_2) d\gamma_2 = F_{\gamma_2 | X}(\gamma_3 \gamma_{th}), \quad (5.33)$$

pa se verovatnoća otkaza poverljivosti može zapisati u obliku

$$P_{SOP, LB} = \int_{x=0}^{\infty} f_{\gamma_{k1}}(x) \int_{\gamma_3=0}^{\infty} f_{\gamma_3 | X}(\gamma_3) F_{\gamma_2 | X}(\gamma_3 \gamma_{th}) d\gamma_3 dx. \quad (5.34)$$

Prisluškivač je mobilan, pa se funkcija gustine verovatnoće trenutnog pojačanja snage u kanalu od sekundarnog predajnika do prisluškivača može predstaviti izrazom

$$f_{\gamma_3 | X}(\gamma_3) = \frac{1}{x} \frac{1}{\delta \Gamma(m_E)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_E}{\Omega_E} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)} \left(\frac{\gamma_3}{x} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}+1\right)} G_{1,1}^{1,2} \left(\frac{m_E \gamma_3}{\Omega_E x} \middle| m_E + \frac{\beta_k+1}{\delta}, 0 \right), \quad (5.35)$$

dok se funkcija raspodele trenutnog pojačanja snage kanala od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika može predstaviti u obliku

$$F_{\gamma_2|X}(x) = 1 - \sum_{k_2=0}^{m_B-1} \frac{1}{k_2!} \left(\frac{m_2 \gamma_2}{\Omega_2 x} \right)^{k_2} \exp\left(-\frac{m_2 \gamma_2}{\Omega_2 x}\right). \quad (5.36)$$

Koristeći jednačine (5.35) i (5.36) pomoćni integral $I = \int_{\gamma_3=0}^{\infty} f_{\gamma_3|X}(\gamma_3) F_{\gamma_2|X}(\gamma_3 \gamma_{th}) d\gamma_3$ se može izraziti u obliku

$$I = \int_{\gamma_3=0}^{\infty} \frac{1}{x} \frac{1}{\delta \Gamma(m_E)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_E}{\Omega_E} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)} \left(\frac{\gamma_3}{x} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}+1\right)} \times \\ G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_E \gamma_3}{\Omega_E x} \middle| m_E + \frac{\beta_k+1}{\delta}, 0 \right) \left(1 - \sum_{k_2=0}^{m_B-1} \frac{1}{k_2!} \left(\frac{m_2 \gamma_2}{\Omega_2 x} \right)^{k_2} \exp\left(-\frac{m_2 \gamma_2}{\Omega_2 x}\right) \right) d\gamma_3 = I_1 - I_2, \quad (5.37)$$

gde su integrali I_1 i I_2 predstavljeni, respektivno, u obliku

$$I_1 = \int_{\gamma_3=0}^{\infty} \frac{1}{x} \frac{1}{\delta \Gamma(m_E)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_E}{\Omega_E} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)} \left(\frac{\gamma_3}{x} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}+1\right)} G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_E \gamma_3}{\Omega_E x} \middle| m_E + \frac{\beta_k+1}{\delta}, 0 \right) d\gamma_3 \quad (5.38)$$

i

$$I_2 = \int_{\gamma_3=0}^{\infty} \frac{1}{x} \frac{1}{\delta \Gamma(m_E)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_E}{\Omega_E} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)} \left(\frac{\gamma_3}{x} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}+1\right)} \times \\ G_{1,2}^{1,1} \left(\frac{m_E \gamma_3}{\Omega_E x} \middle| m_E + \frac{\beta_k+1}{\delta}, 0 \right) \left(\sum_{k_2=0}^{m_B-1} \frac{1}{k_2!} \left(\frac{m_2 \gamma_2}{\Omega_2 x} \right)^{k_2} \exp\left(-\frac{m_2 \gamma_2}{\Omega_2 x}\right) \right) d\gamma_3. \quad (5.39)$$

Korišćenjem jednakosti [128, (07.34.21.0084.01)] i osnovnih matematičkih operacija dobija se sledeće rešenje za integral I_1 u zatvorenom obliku

$$I_1 = \frac{1}{\delta} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \frac{1}{\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)}. \quad (5.40)$$

Korišćenjem transformacije elementarne funkcije u Mejerovu funkciju, [128, (01.03.26.0004.01)] i transformacije [128, (07.34.21.0011.01)] integral I_2 se dalje može zapisati u konačnom zatvorenom obliku

$$I_2 = \frac{1}{\delta \Gamma(m_E)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_E}{\Omega_E} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)} \sum_{k_2=0}^{m_B-1} \frac{1}{k_2!} \left(\frac{\Omega_2}{m_2 \gamma_{th}} \right)^{-\left(\frac{\beta_k+1}{\delta}\right)} G_{2,2}^{1,2} \left(\frac{m_E \Omega_2}{\Omega_E m_2 \gamma_{th}} \middle| 1, 1 + \frac{\beta_k+1}{\delta} - k_2 \right) \left(\frac{m_E \Omega_2}{\Omega_E m_2 \gamma_{th}} \middle| m_E + \frac{\beta_k+1}{\delta}, 0 \right). \quad (5.41)$$

Dalje je verovatnoća otkaza poverljivosti jednaka

$$P_{SOP, LB} = \int_{x=0}^{\infty} (I_1 - I_2) \times f_{\gamma_{K_1}}(x) dx = \int_{x=0}^{\infty} I_1 \times f_{\gamma_{K_1}}(x) dx - \int_{x=0}^{\infty} I_2 \times f_{\gamma_{K_1}}(x) dx = I_3 - I_4, \quad (5.42)$$

gde su integrali I_3 i I_4 predstavljeni u obliku

$$I_3 = \int_{x=0}^{\infty} I_1 \times \frac{1}{K_1 \Gamma(m_1)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^{m_1} \left(\frac{x}{K_1} \right)^{m_1-1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \frac{x}{K_1} \right) dx, \quad (5.43)$$

$$I_4 = \int_{x=0}^{\infty} I_2 \times \frac{1}{K_1 \Gamma(m_1)} \left(\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^{m_1} \left(\frac{x}{K_1} \right)^{m_1-1} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \frac{x}{K_1} \right) dx. \quad (5.44)$$

Zamenom I_1 u I_3 i korišćenjem jednakosti transformacije elementarne funkcije u Mejerovu funkciju [128, (01.03.26.0004.01)] i [128, (07.34.21.0084.01)], integral I_3 se može napisati u sledećem obliku

$$I_3 = \frac{1}{\delta} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \frac{1}{\left(\frac{\beta_k + 1}{\delta} \right)}. \quad (5.45)$$

Zamenom I_2 u I_4 i korišćenjem jednakosti transformacije elementarne funkcije u Mejerovu funkciju [128, (01.03.26.0004.01)] i [128, (07.34.21.0084.01)], integral I_4 se konačno može zapisati u obliku

$$I_4 = \frac{1}{\delta \Gamma(m_E)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_E}{\Omega_E} \right)^{-\left(\frac{\beta_k + 1}{\delta} \right)} \sum_{k_2=0}^{m_E-1} \frac{1}{k_2!} G_{2,2}^{1,2} \left(\frac{m_E}{\Omega_E} \frac{\Omega_2}{m_2 \gamma_{th}} \middle| \begin{matrix} 1, 1 + \frac{\beta_k + 1}{\delta} - k_2 \\ m_E + \frac{\beta_k + 1}{\delta}, 0 \end{matrix} \right) \times \left(\frac{\Omega_2}{m_2 \gamma_{th}} \right)^{-\left(\frac{\beta_k + 1}{\delta} \right)}. \quad (5.46)$$

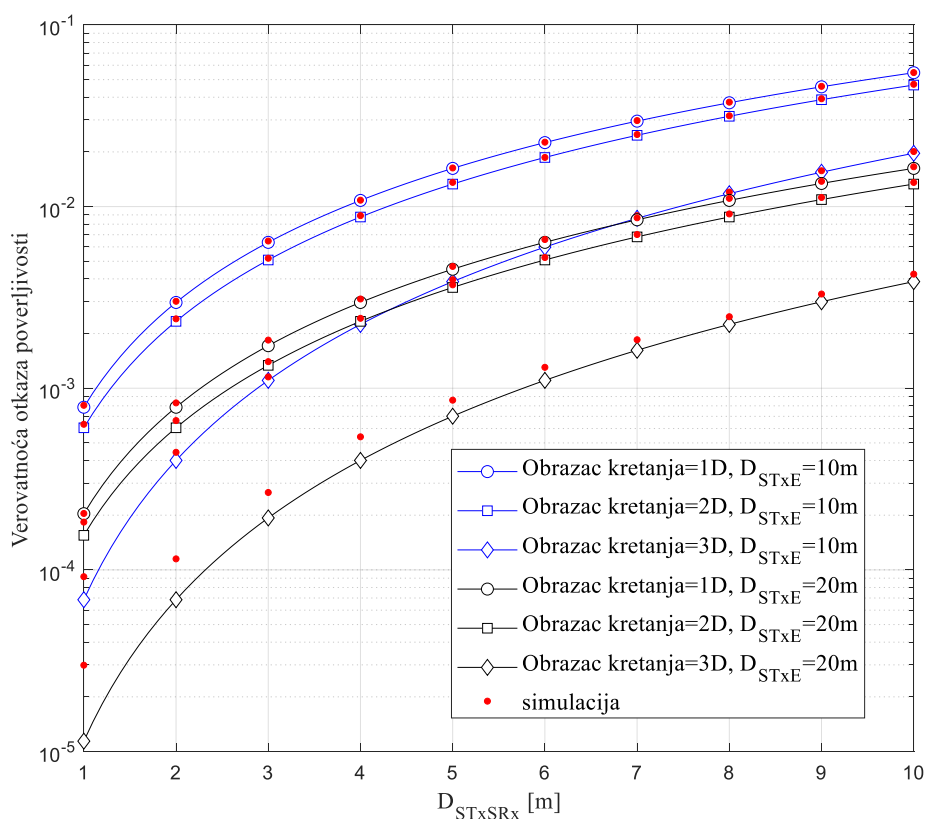
Zamenom jednačina (5.45) i (5.46) u (5.42) dobija se konačan izraz za verovatnoću otkaza poverljivosti

$$P_{SOP, LB} = \frac{1}{\delta} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \frac{1}{\left(\frac{\beta_k + 1}{\delta} \right)} - \frac{1}{\delta \Gamma(m_E)} \sum_{k=1}^{n_E} B_k \left(\frac{m_E}{\Omega_E} \right)^{-\left(\frac{\beta_k + 1}{\delta} \right)} \times \sum_{k_2=0}^{m_E-1} \frac{1}{k_2!} G_{2,2}^{1,2} \left(\frac{m_E}{\Omega_E} \frac{\Omega_2}{m_2 \gamma_{th}} \middle| \begin{matrix} 1, 1 + \frac{\beta_k + 1}{\delta} - k_2 \\ m_E + \frac{\beta_k + 1}{\delta}, 0 \end{matrix} \right) \times \left(\frac{\Omega_2}{m_2 \gamma_{th}} \right)^{-\left(\frac{\beta_k + 1}{\delta} \right)}. \quad (5.47)$$

Na slici 5.10. prikazani su numerički rezultati za verovatnoću otkaza poverljivosti, dok je na slici 5.11. pokazana zavisnost kapaciteta poverljivosti od parametara sistema.

Na slici 5.10. je prikazana verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} za različite obrasce kretanja prislušivača. Analizirani su scenariji u kojima se menja maksimalno rastojanje između sekundarnog predajnika i prislušivača. Rastojanje između namenskog izvora energije do

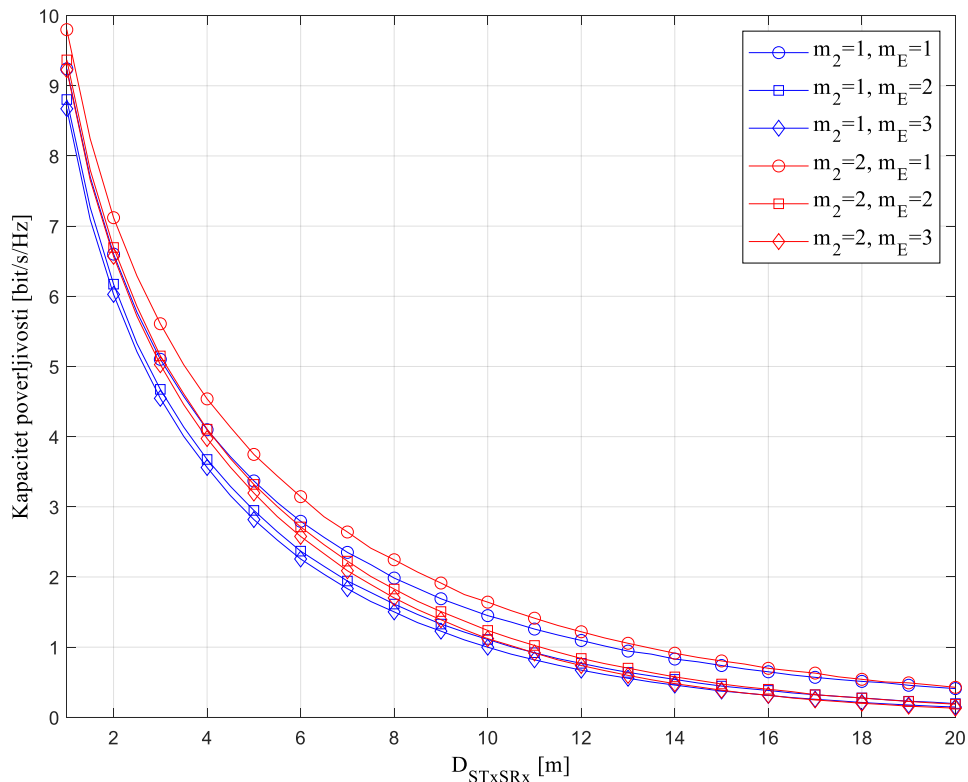
sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m, vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB. Pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB, pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika $\Omega_2 = 40$ dB, dok je pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do prislušivača $\Omega_E = 10$ dB. Prag kapaciteta poverljivosti je $R_s = 0.4$ [bit/s/Hz]. Koeficijent konverzije energije je $\eta = 0.9$, dok je faktor prikupljanja energije $\alpha = 0.5$. Nakagami- m parametar u svim kanalima je jednak 1, što odgovara Rejljevom propagacionom okruženju. Verovatnoća otkaza poverljivosti sekundarne mreže raste sa povećanjem rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika. Ovakav rezultat je u skladu sa očekivanim, jer se sa porastom rastojanja na sekundarnom linku smanjuje prijemna snaga sekundarnog prijemnika. Vrednost verovatnoće otkaza se poboljšava porastom maksimalnog rastojanja između sekundarnog predajnika i prislušivača, jer je u tom slučaju prijemna snaga na prislušivaču manja. Poređenjem uticaja obrasca kretanja prislušivača na verovatnoću otkaza poverljivosti, može se zaključiti da se najbolji rezultati postižu kada se prislušivač kreće po 3D obrascu. Za male vrednosti verovatnoće otkaza poverljivosti, javlja se manje odstupanje u dobijenim rezultatima putem numeričke analize i simulacije, jer su numerički rezultati dobijeni primenom aproksimativne formule.



Slika 5.10. – Verovatnoća otkaza poverljivosti za različite obrasce kretanja mobilnog prislušivača.

Kapacitet poverljivosti u funkciji rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} prikazan je na slici 5.11. Analiza je izvršena za različite vrednosti Nakagami- m parametra u kanalima između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, m_2 i sekundarnog predajnika i prislušivača, m_E . Rastojanje između namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m, vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB. Pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB,

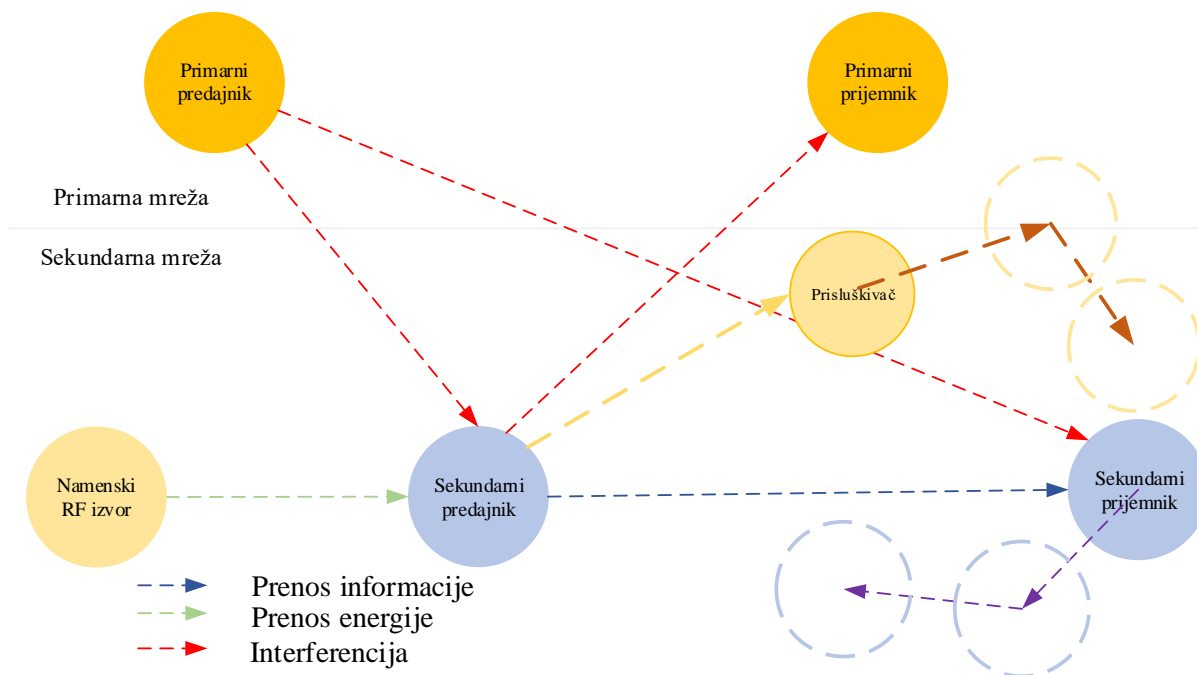
dok je pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika $\Omega_2 = 30$ dB. Kretanje prislušivača je opisano 2D obrascem kretanja. Prag kapaciteta poverljivosti je $R_s = 0.5$ [bit/s/Hz]. Kapacitet poverljivosti sekundarne mreže opada sa povećanjem rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, jer je manja prijemna snaga na sekundarnom prijemniku. Kapacitet poverljivosti je veći kada je Nakagami- m parametar m_2 u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika veći, dok se bolje performanse postižu kada je Nakagami- m parametar m_E u kanalu između sekundarnog predajnika i prislušivača manji.



Slika 5.11. – Kapacitet poverljivosti za različite parametre Nakagami- m fedinga m_2 i m_E .

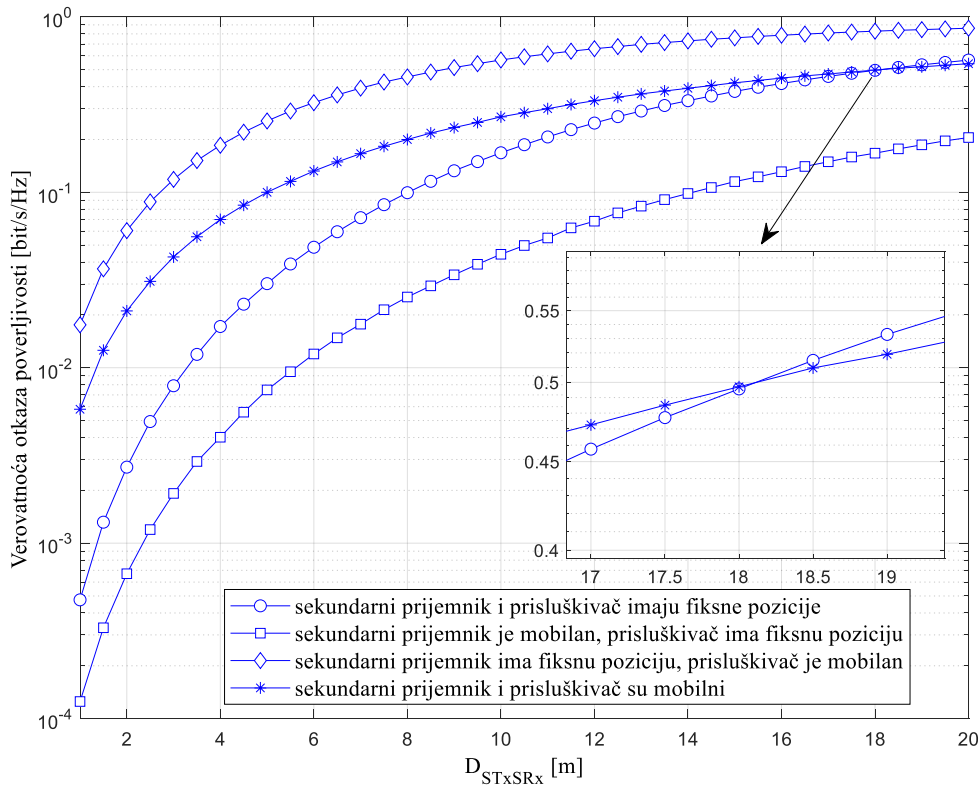
5.1.4 Verovatnoća otkaza poverljivosti u slučaju kada su sekundarni prijemnik i prislušivač mobilni

U okviru ovog odeljka posmatra se sistem prikazan na slici 5.12. u kojem sekundarni predajnik čija je pozicija fiksna komunicira sa mobilnim sekundarnim prijemnikom. Komunikacija je ugrožena prisustvom mobilnog prislušivača. Kretanje sekundarnog prijemnika i prislušivača je opisano primenom RWP modela kretanja.



Slika 5.12. – Model kooperativnog kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije, mobilnim sekundarnim prijemnikom i mobilnim prislušivačem.

Na slici 5.13. je prikazano poređenje vrednosti verovatnoće otkaza poverljivosti za različite scenarije u kojima sekundarni prijemnik i prislušivač mogu imati fiksne pozicije ili se mogu kretati. Verovatnoća otkaza poverljivosti prikazana je u funkciji maksimalnog rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} . Maksimalno rastojanje između sekundarnog predajnika i prislušivača je $D_{STxE} = 10$ m, a rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m. Vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB. Pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB. Pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika je 30 dB, dok je pojačanje snage u kanalu između sekundarnog predajnika i prislušivača 20 dB. Sekundarni prijemnik i prislušivač u scenariju kada su mobilni koriste 2D obrazac kretanja. Prag kapaciteta poverljivosti je $R_s = 0.5$ [bit/s/Hz]. Verovatnoća otkaza poverljivosti sekundarne mreže dostiže najviše vrednosti u scenariju kada sekundarni prijemnik ima fiksnu poziciju, dok je prislušivač mobilan. U tom slučaju rastojanje između sekundarnog predajnika i prislušivača može imati vrednosti manje od maksimalne vrednosti rastojanja, samim tim prislušivač je bliži sekundarnom predajniku. Najbolji rezultati se postižu u scenariju kada prislušivač ima fiksnu poziciju, a sekundarni prijemnik je mobilan pa je sekundarni prijemnik bliži sekundarnom predajniku. Za vrednost maksimalnog rastojanja od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika koja je manja od 18 m verovatnoća otkaza poverljivosti postiže veće vrednosti kada su sekundarni prijemnik i prislušivač mobilni. Nakon što vrednost maksimalnog rastojanja od sekundarnog predajnika do sekundarnog prijemnika pređe 18 m, veća vrednost verovatnoće otkaza poverljivosti se postiže kada sekundarni prijemnik i prislušivač imaju fiksne pozicije.



Slika 5.13. – Verovatnoća otkaza poverljivosti za različite obrasce kretanja sekundarnog prijemnika i prislušivača.

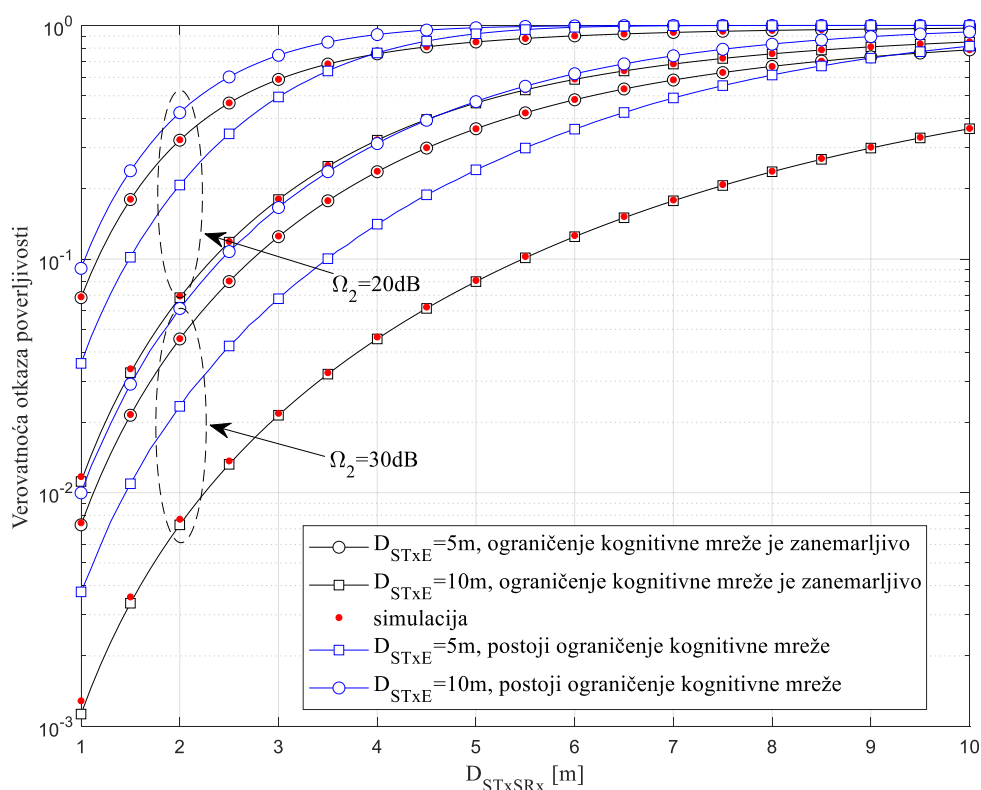
5.2 Verovatnoća otkaza poverljivosti u kooperativnom kognitivnom sistemu sa namenskim izvorom energije

U ovom odeljku je prikazan kooperativni kognitivni sistem u kojem je komunikacija između predajnika i prijemnika u sekundarnoj mreži ograničena nivoom interferencije na primarnom prijemniku. Predajna snaga sekundarnog predajnika u tom slučaju ne zavisi samo od prikupljene energije sa namenskog izvora već i od ograničenja primarne mreže. Sekundarni predajnik prenosi informaciju do sekundarnog prijemnika u prisustvu prislušivača koji može da presretne poslatu informaciju. Sekundarni prijemnik i prislušivač mogu imati fiksne pozicije ili se kreću koristeći RWP model kretanja.

U ovom odeljku su prikazana poređenja performansi kooperativnog kognitivnog sistema u scenarijima kada postoji ograničenje kognitivne mreže i kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo.

Na slici 5.14. izvršeno je poređenje vrednosti verovatnoće otkaza poverljivosti u scenarijima kada postoji ograničenje kognitivne mreže i kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo. Zavisnosti su prikazane u funkciji rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} . Analizirani su scenariji u kojima se menja vrednost pojačanja snage u kanalu između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, kao i rastojanje između sekundarnog predajnika i prislušivača. Rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m, vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB. Pojačanje

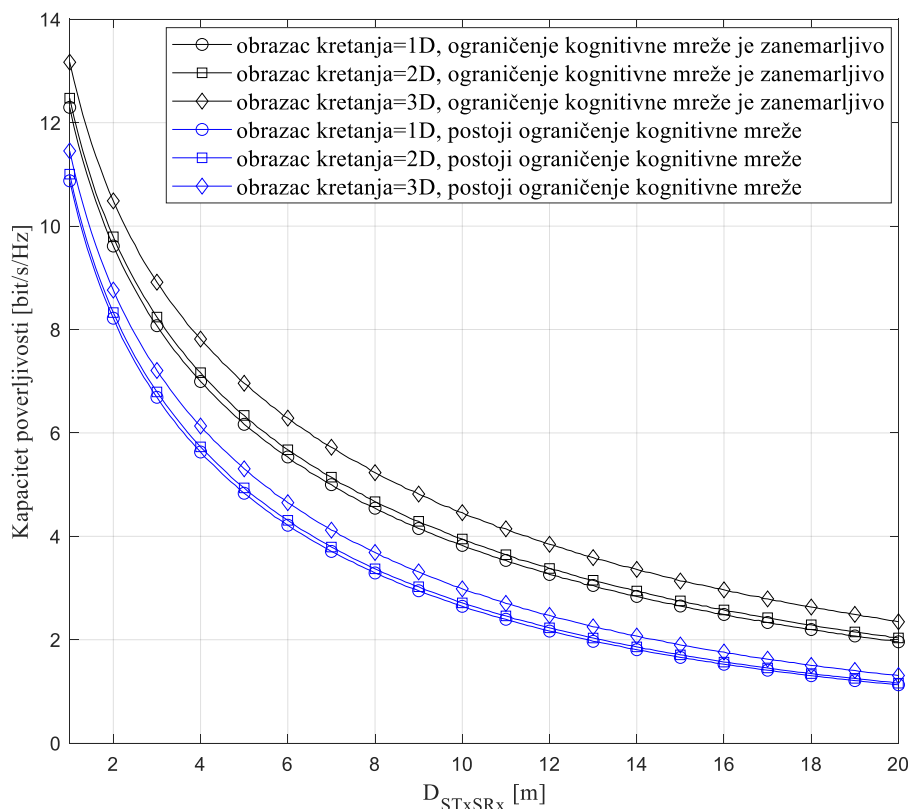
snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB. Pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do prislušivača je $\Omega_E = 20$ dB. Prag kapaciteta poverljivosti je $R_s = 1.25$ [bit/s/Hz]. Koeficijent konverzije energije je $\eta = 0.9$, dok je koeficijent vremenskog udela pri prikupljanju energije $\alpha = 0.5$. Ograničenje kognitivne mreže je definisano verovatnoćom otkaza primarne mreže $P_{out,PU} = 0.01$, pragom interferencije $Q_p = 8$ dB i srednjim pojačanjem snage u kanalu između sekundarnog predajnika i primarnog prijemnika $\Lambda_{STx} = 1$. U svim scenarijima, verovatnoća otkaza poverljivosti sekundarne mreže je veća u slučaju kada postoji ograničenje kognitivne mreže u odnosu na slučaj kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo. Razlika je manje uočljiva kada je rastojanje između sekundarnog predajnika i prislušivača manje, dok je za veće vrednosti rastojanja između sekundarnog predajnika i prislušivača razlika u dobijenim vrednostima značajnija.



Slika 5.14. – Verovatnoća otkaza poverljivosti u zavisnosti od rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika D_{STxSRx} .

Na slici 5.15. prikazana je zavisnost kapaciteta poverljivosti u funkciji maksimalnog rastojanja između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, D_{STxSRx} . Analiza performansi je izvršena u scenarijima kada postoji ograničenje kognitivne mreže i kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo. U svim scenarijima su sekundarni prijemnik i prislušivač mobilni i koriste RWP model za opisivanje kretanja pri čemu sekundarni prijemnik koristi 1D obrazac kretanja, dok se obrazac kretanja prislušivača menja u zavisnosti od posmatranog scenarija, kao što je prikazano na slici 5.15. Rastojanje između namenskog izvora energije i sekundarnog predajnika je $D_{PBSTx} = 1$ m, vrednost predajne snage namenskog izvora energije je $P_{PB} = 20$ dB. Pojačanje snage u kanalu od namenskog izvora energije do sekundarnog predajnika je $\Omega_1 = 10$ dB. Prag kapaciteta poverljivosti je $R_s = 1.25$ [bit/s/Hz]. Koeficijent konverzije energije je $\eta = 0.9$, dok

je koeficijent vremenskog udela pri prikupljanju energije $\alpha = 0.5$. Ograničenje kognitivne mreže je definisano verovatnoćom otkaza primarne mreže $P_{out,PU} = 0.01$, pragom interferencije $Q_p = 5$ dB i srednjim pojačanjem snage u kanalu između sekundarnog predajnika i primarnog prijemnika $\Lambda_{STx} = 1$. U svim scenarijima, kapacitet poverljivosti sekundarne mreže je manji u slučaju kada postoji ograničenje kognitivne mreže u odnosu na slučaj kada je ograničenje kognitivne mreže zanemarljivo. Poređenjem uticaja obrasca kretanja prislušivača na kapacitet poverljivosti, može se zaključiti da se najbolji rezultati postižu kada se prislušivač kreće po 3D obrascu.



Slika 5.15. – Poređenje verovatnoće otkaza poverljivosti za sistem sa i bez ograničenja kognitivne mreže i različite obrasce kretanja mobilnog prislušivača.

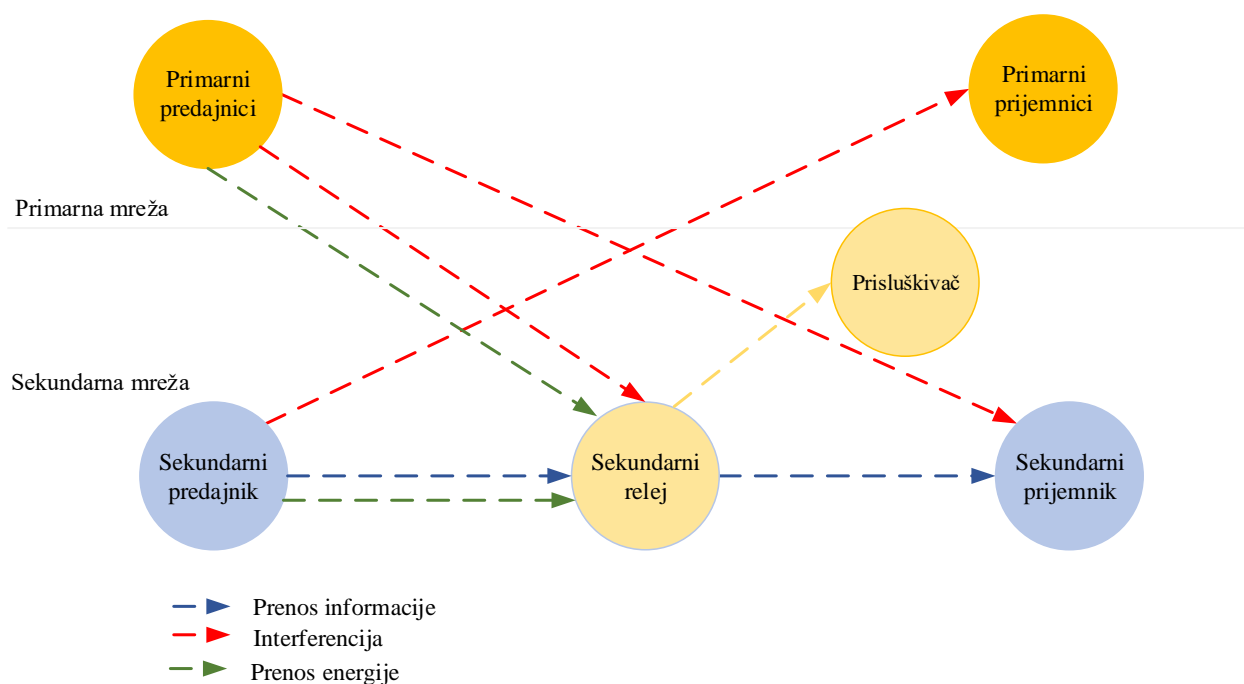
5.3 Verovatnoća otkaza poverljivosti u kognitivnom relejnom sistemu

U ovom odeljku, posmatra se sistem prikazan na slici 5.16. u kojem sekundarni predajnik komunicira sa sekundarnim prijemnikom posredstvom sekundarnog releja u prisustvu prislušivača. Pretpostavka je da ne postoji direktna linija optičke vidljivosti između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika, pa se komunikacija između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijemnika odvija posredstvom sekundarnog releja koji nema sopstveno napajanje već se napaja energijom iz izvora u okruženju. Pretpostavka je da ne postoji ni direktna linija optičke vidljivosti između sekundarnog predajnika i prislušivača, pa prislušivač vrši presretanje signala emitovanog sa sekundarnog releja.

Analiza stepena poverljivosti u sistemu je izvršena procenom kapaciteta poverljivosti i verovatnoće otkaza poverljivosti, koja se definiše kao verovatnoća da kapacitet poverljivosti bude ispod definisanog praga, R_s . Za posmatrani sistem, potrebno je definisati kapacitet poverljivosti između sekundarnog predajnika i sekundarnog releja, kao i kapacitet poverljivosti između sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika. Kako ne postoji direktna linija optičke vidljivosti između sekundarnog predajnika i prisluškivača, kapacitet poverljivosti na linku od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja se može napisati u obliku

$$C_{STxSR} = \frac{1-\alpha}{2} \log_2(1+\gamma_{SR}), \quad (5.48)$$

gde je γ_{SR} odnos signal/šum na sekundarnom releju i predstavljen je jednačinom (2.15).



Slika 5.16. – Model kognitivnog relejnog sistema sa prisluškivačem.

Link između sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika je podložan prisluškivanju pa se kapacitet poverljivosti može napisati u obliku

$$C_{SRSR_x} = \begin{cases} \frac{1-\alpha}{2} (\log_2(1+\gamma_{SR_x}) - \log_2(1+\gamma_E)), & \gamma_{SR_x} > \gamma_E, \\ 0, & \gamma_{SR_x} \leq \gamma_E, \end{cases} \quad (5.49)$$

gde je γ_{SR_x} odnos signal/šum na sekundarnom prijemniku predstavljen jednačinom (2.21), a γ_E predstavlja odnos signal/šum na prisluškivaču.

Sistem koji se analizira predstavlja kaskadni sistem sa serijskom vezom dve deonice, pa je kapacitet poverljivosti jednak kapacitetu poverljivosti linka sa manjim kapacitetom poverljivosti i može se napisati u obliku [135]

$$C_s = \min(C_{STxSR}, C_{SRSR_x}). \quad (5.50)$$

Verovatnoća otkaza poverljivosti je definisana sledećom verovatnoćom

$$P_{SOP} = \Pr\{C_S < R_S\}. \quad (5.51)$$

Prijemni odnos signal/šum na prislušivaču se može napisati u formi

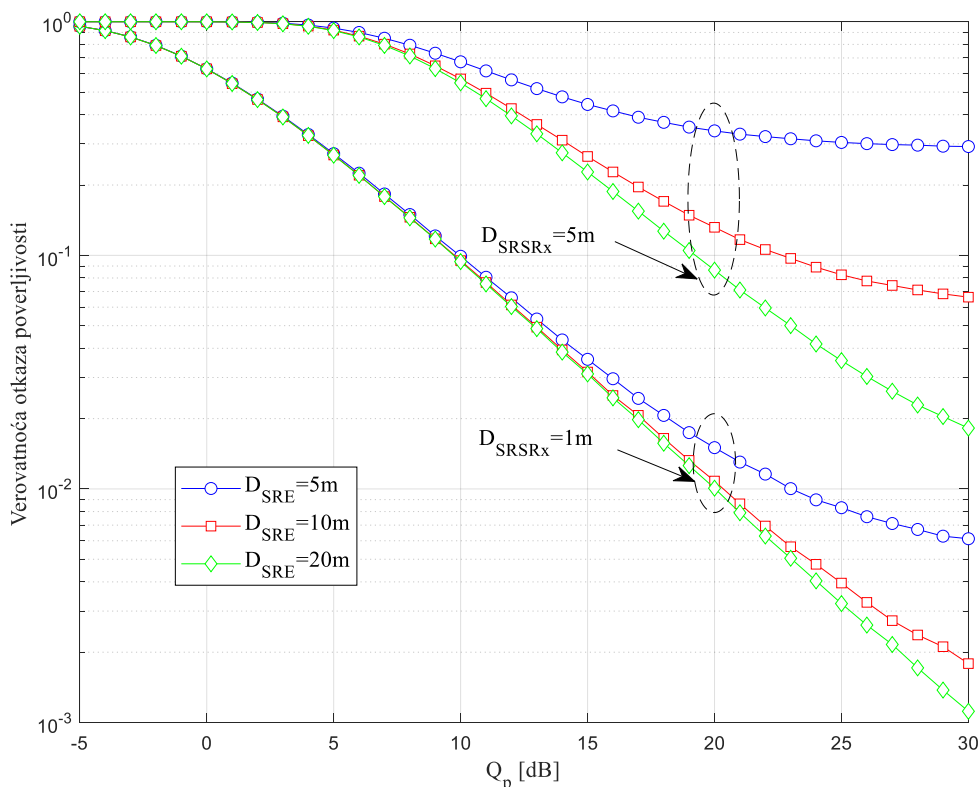
$$\gamma_E = \frac{P_{SR} |h_{SRE}|^2}{D_{SRE}^\delta \sigma_E^2} = \frac{P_{SR} \gamma_{SRE}}{D_{SRE}^\delta \sigma_E^2}, \quad (5.52)$$

gde je $\gamma_{SRE} = |h_{SRE}|^2$, D_{SRE} rastojanje između sekundarnog releja i prislušivača, a n_E je aditivna komponenta belog Gausovog šuma na prislušivaču sa srednjom vrednošću snage σ_E^2 .

Izraz za prijemni odnos signal/šum na prislušivaču postaje

$$\gamma_E = \begin{cases} \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)} (\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \frac{\gamma_{SRE}}{D_{SRE}^\delta \sigma_E^2}, & \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)} (\gamma_{STxSR} + I_{SR}) \leq k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}, \\ k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}} \frac{\gamma_{SRE}}{D_{SRE}^\delta \sigma_E^2}, & \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)} (\gamma_{STxSR} + I_{SR}) > k_{SR} \frac{Q_p}{\Lambda_{SR}}. \end{cases} \quad (5.53)$$

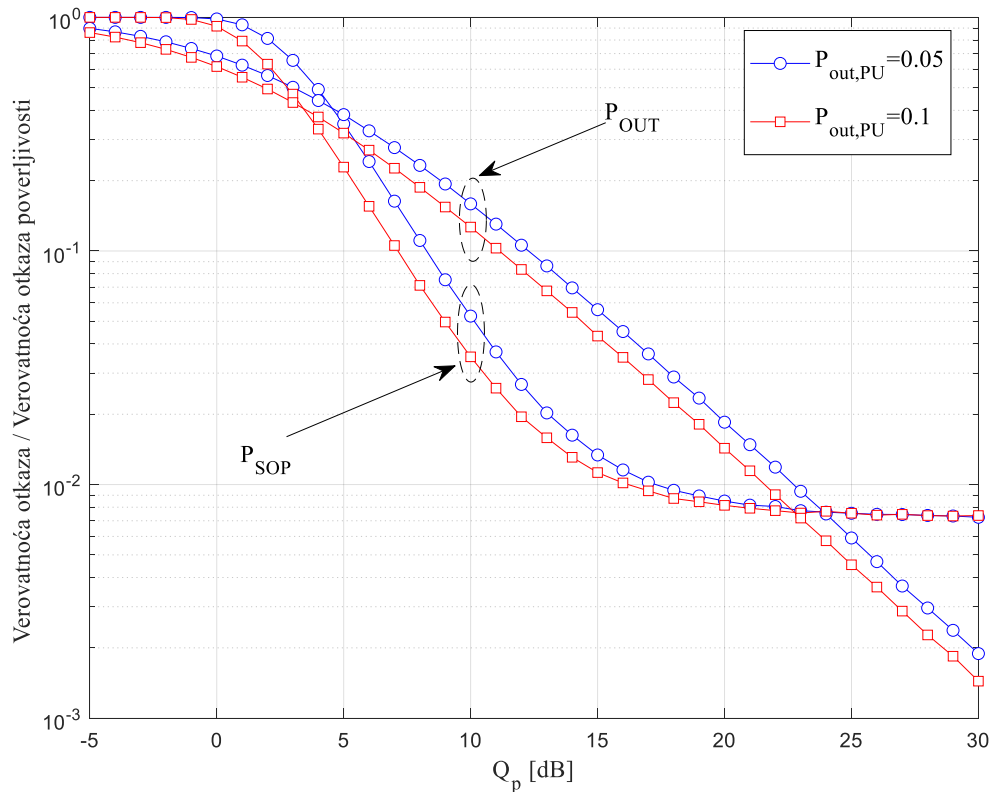
Na slici 5.17. prikazana je verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji praga interferencije Q_p . Analiza je izvršena za različite vrednosti rastojanja između sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika i sekundarnog releja i prislušivača. Faktor konverzije energije je $\eta = 0.9$, dok je koeficijent vremenskog udela pri prikupljanju energije $\alpha = 0.5$. Rastojanje od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja je $D_{STxSR} = 1$ m. Pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja je $\Omega_{STxSR} = 10$ dB, pojačanje snage u kanalu od sekundarnog releja do sekundarnog prijemnika je $\Omega_{SRxR} = 10$ dB, dok je pojačanje snage u kanalu od sekundarnog releja do prislušivača $\Omega_E = 0$ dB. Verovatnoća otkaza primarne mreže je $P_{out,PU} = 0.05$, dok su srednja pojačanja snage u kanalima od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika Λ_{STx} i od sekundarnog releja do primarnog prijemnika Λ_{SR} jednaka 1. Srednje pojačanje snage signala interferencije sa primarnog predajnika do sekundarnog releja je $\Omega_{I_R} = 0$ dB, dok je srednje pojačanje snage signala interferencije sa primarnog predajnika do sekundarnog prijemnika $\Omega_{I_{Rx}} = -10$ dB. Prag kapaciteta poverljivosti je $R_S = 1.25$ [bit/s/Hz]. Performanse sistema se poboljšavaju sa povećanjem praga interferencije Q_p . Bolje performanse sistema se postižu kada je rastojanje između sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika manje. Za istu vrednost rastojanja između sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika bolje performanse se postižu kada je rastojanje između sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika manje.



Slika 5.17. – Verovatnoća otkaza poverljivosti u zavisnosti od praga interferencije Q_p .

Na slici 5.18. prikazane su verovatnoća otkaza i verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji praga interferencije Q_p za različite vrednosti verovatnoće otkaza primarne mreže. Faktor prikupljanja energije je $\alpha = 0.5$. Rastojanje od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja je $D_{STxSR} = 1$ m, rastojanje od sekundarnog releja do sekundarnog prijemnika je $D_{SRSRx} = 1$ m, dok je rastojanje od sekundarnog releja do prislušivača $D_{SRE} = 5$ m. Pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do sekundarnog releja je $\Omega_{STxSR} = 10$ dB, pojačanje snage u kanalu od sekundarnog releja do sekundarnog prijemnika je $\Omega_{SRSRx} = 10$ dB, dok je pojačanje snage u kanalu od sekundarnog releja do prislušivača $\Omega_E = 0$ dB. Srednje pojačanje snage u kanalu od sekundarnog predajnika do primarnog prijemnika je $\Lambda_{STx} = 1$, dok je srednje pojačanje snage u kanalu od sekundarnog releja do primarnog prijemnika je $\Lambda_{SR} = 1$. Srednje pojačanje snage signala interferencije sa primarnog predajnika do sekundarnog releja je $\Omega_{I_r} = 0$ dB, dok je srednje pojačanje snage signala interferencije sa primarnog predajnika do sekundarnog prijemnika $\Omega_{I_{Rx}} = -10$ dB. Prag kapaciteta poverljivosti je $R_s = 1.25$ [bit/s/Hz]. Performanse sistema se poboljšavaju sa povećanjem praga interferencije Q_p , jer su dopuštene veće dozvoljene predajne snage na sekundarnom predajniku i sekundarnom releju. Verovatnoća otkaza primarne mreže $P_{out,PU}$ takođe ima uticaja na predajne snage sekundarnog predajnika i sekundarnog releja, jer su veće predajne snage dozvoljene sa većom maksimalno dozvoljenom vrednošću verovatnoće otkaza, pa su odnosi prijemnog signala i šuma na sekundarnom releju i na sekundarnom prijemniku veći. Za veće vrednosti praga interferencije Q_p verovatnoća otkaza ulazi u zasićenje i prestaje da zavisi od

verovatnoće otkaza primarne mreže, jer predajna snaga sekundarnog releja zavisi samo od prikupljene energije.



Slika 5.18. – Verovatnoća otkaza i verovatnoća otkaza poverljivosti u zavisnosti od praga interferencije Q_p .

Na slikama 5.19.-5.21. predstavljena je analiza verovatnoće otkaza poverljivosti za kognitivni relejni sistem u kome sekundarni predajnik, sekundarni prijemnik i prislušivač imaju fiksne pozicije, dok se pozicija sekundarnog releja menja po x - i y - koordinatama Dekartovog koordinatnog sistema. U tabeli 5.3 predstavljeni su parametri simulacije.

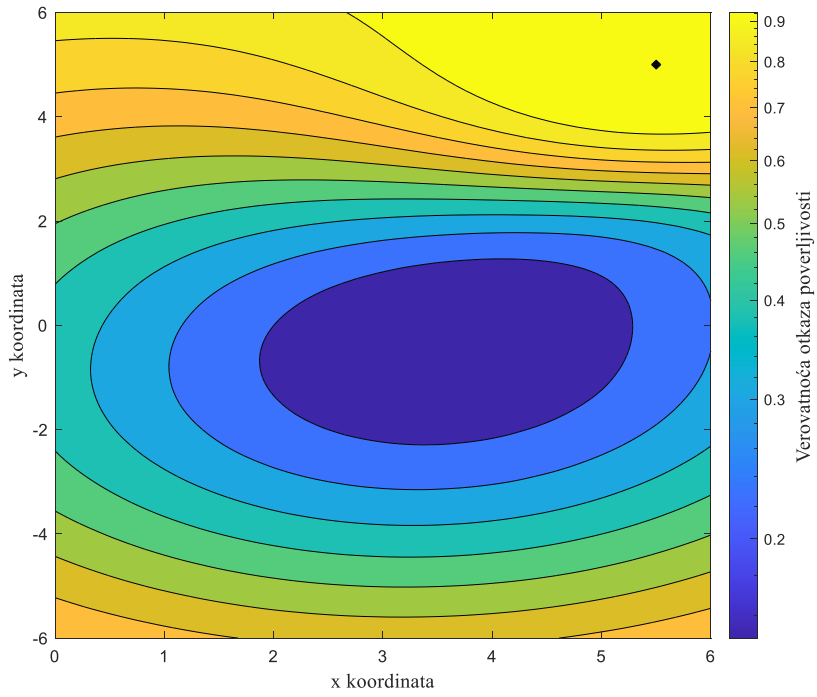
Tabela 5.3. Parametri simulacije kognitivnog relejnog sistema

Parametar	Slika 5.19.	Slika 5.20.	Slika 5.21.
$P_{out,PU}$	0.05	0.05	0.05
Q_p [dB]	15	15	15
Λ_{STx}	1	1	1
Λ_{SR}	1	1	1
Ω_1 [dB]	20	20	20
Ω_2 [dB]	20	20	20
Ω_E [dB]	10	10	10
Koordinate sekundarnog predajnika	(0,0)	(0,0)	(0,0)
Koordinate sekundarnog prijelnika	(6,0)	(6,0)	(6,0)
Koordinate prisluškivača	(5.5,5)	(5.5,1)	(5.5,0)
R_S [bit/s/Hz]	0.5	0.5	0.5
η	0.9	0.9	0.9
α	0.5	0.5	0.5
m_1	1	1	1
m_2	1	1	1
m_E	1	1	1

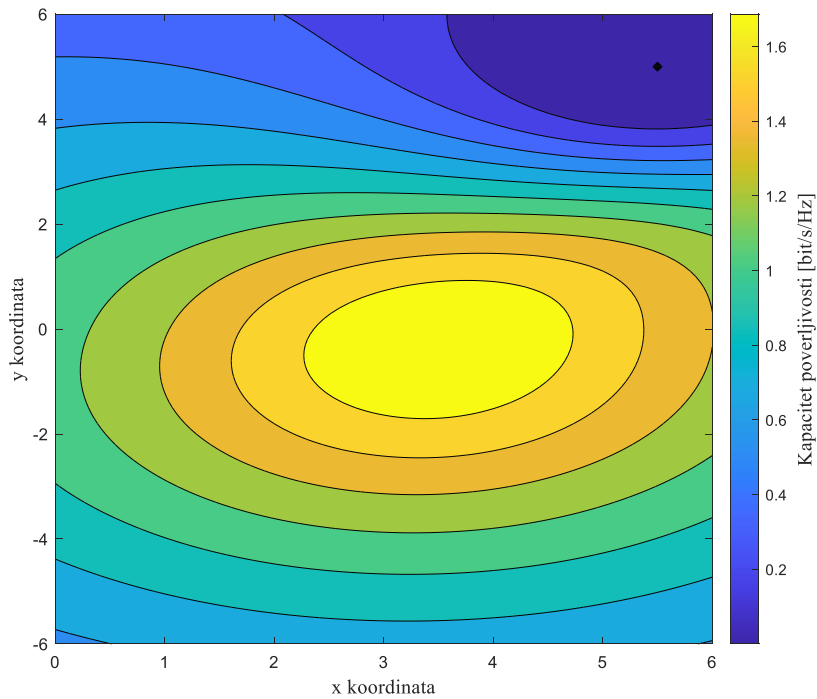
Na slici 5.19. a) je prikazana verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji pozicije releja, dok je na slici 5.19. b) prikazan kapacitet poverljivosti u funkciji pozicije releja. Pretpostavka je da se sekundarni predajnik nalazi u koordinatnom početku Dekartovog koordinatnog sistema, (0,0), dok su pozicije sekundarnog prijelnika i prisluškivača u Dekartovom koordinatnom sistemu (6,0) i (5.5,5), respektivno. Na osnovu dobijenih rezultata, može se odrediti optimalna pozicija releja pri kojoj se minimizuje verovatnoća otkaza poverljivosti, dok se maksimizuje vrednost kapaciteta poverljivosti. U ovom scenariju optimalna pozicija releja je (3.7,-0.3).

Na slici 5.20. a) je prikazana verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji pozicije releja, dok je na slici 5.20. b) prikazan kapacitet poverljivosti u funkciji pozicije releja, pri čemu se prisluškivač približio sekundarnom prijelniku u odnosu na prethodno analiziran scenario. Pretpostavka je da se sekundarni predajnik nalazi u koordinatnom početku Dekartovog koordinatnog sistema, (0,0), dok su pozicije sekundarnog prijelnika i prisluškivača u Dekartovom koordinatnom sistemu (6,0) i (5.5,1), respektivno. U ovom scenariju, optimalna pozicija releja je (5.65,-0.1), pri kojoj je verovatnoća otkaza poverljivosti minimalna, dok je vrednost kapaciteta poverljivosti maksimalna.

Na slici 5.21. a) je prikazana verovatnoća otkaza poverljivosti u funkciji pozicije releja, dok je na slici 5.21. b) prikazan kapacitet poverljivosti u funkciji pozicije releja, pri čemu je prisluškivač postavljen između sekundarnog predajnika i sekundarnog prijelnika. Pretpostavka je da se sekundarni predajnik nalazi u koordinatnom početku Dekartovog koordinatnog sistema, (0,0), dok su pozicije sekundarnog prijelnika i prisluškivača u Dekartovom koordinatnom sistemu (6,0) i (5.5,0), respektivno. Na osnovu dobijenih rezultata, može se odrediti optimalna pozicija releja pri kojoj se minimizuje verovatnoća otkaza poverljivosti, dok se maksimizuje vrednost kapaciteta poverljivosti. U ovom scenariju, optimalna pozicija releja je (5.95, 0) što odgovara slučaju da se relej nalazi bliže sekundarnom prijelniku. Ukoliko bi se uveo uslov da se relej nalazi u oblasti na putanji pre prisluškivača, optimalna pozicija releja bi bila (2.3, 0).

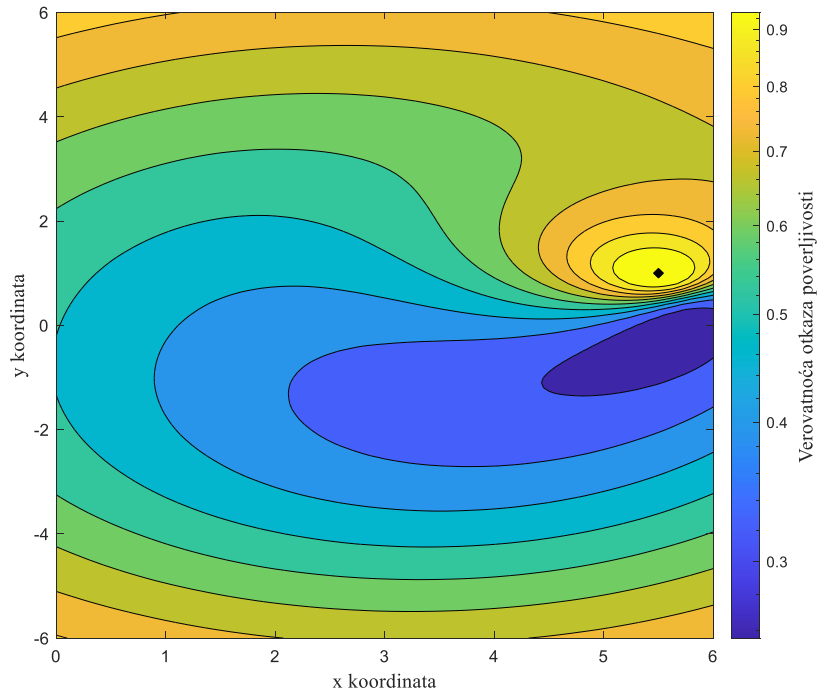


a)

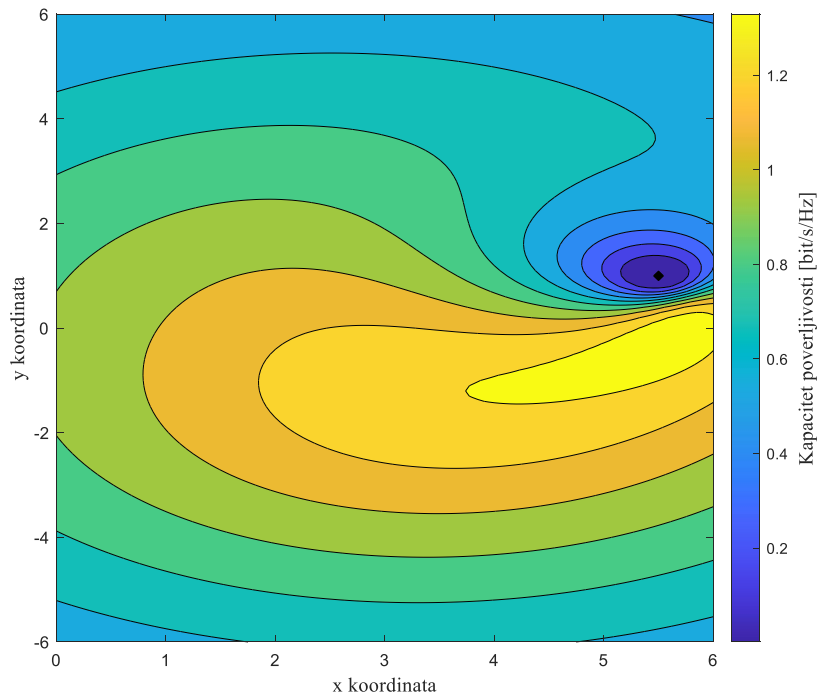


b)

Slika 5.19. – a) Verovatnoća otkaza poverljivosti i b) kapacitet poverljivosti u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je pozicija prislušivača (5.5, 5).

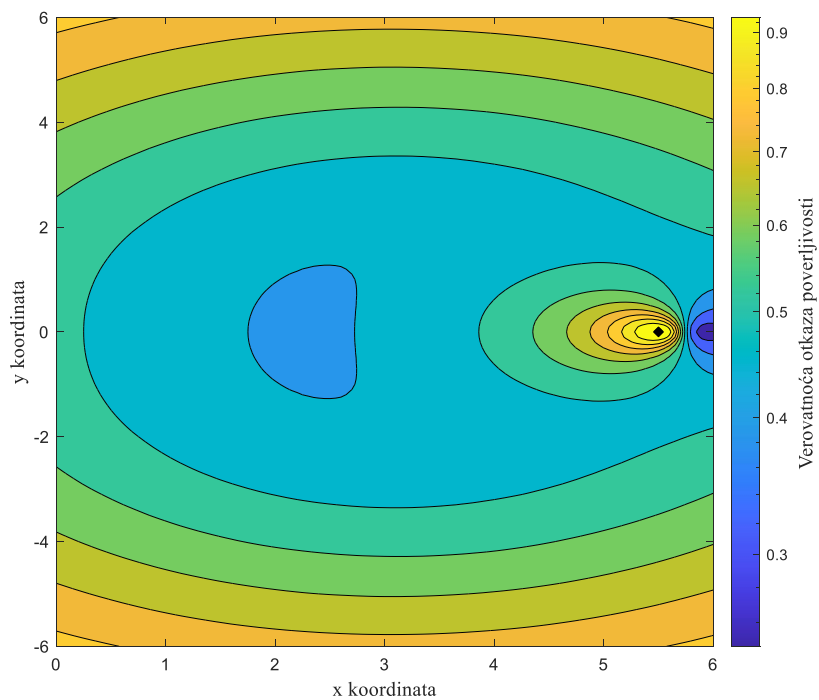


a)

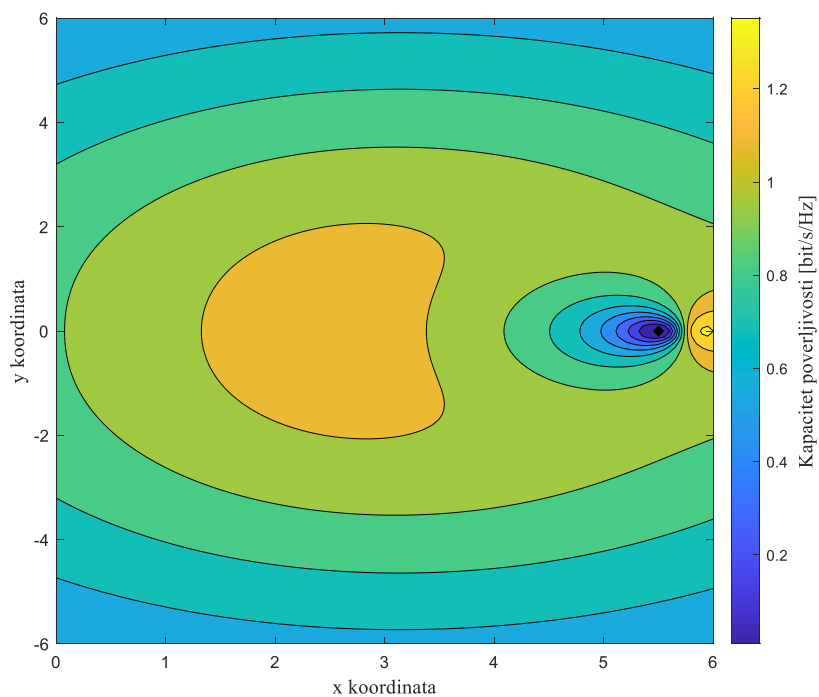


b)

Slika 5.20. – a) Verovatnoća otkaza poverljivosti i b) kapacitet poverljivosti u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je pozicija prislušivača (5.5, 1).



a)



b)

Slika 5.21. – a) Verovatnoća otkaza poverljivosti i b) kapacitet poverljivosti u zavisnosti od pozicije sekundarnog releja, u slučaju kada je pozicija prislušivača (5.5, 0).

6. Zaključak

Konstantan napredak u razvoju tehnologija, kao i porast broja uređaja i usluga u bežičnim telekomunikacijama doveo je do potrebe za novim, inovativnijim i efikasnijim pristupima spektralnim resursima. IoT koncept sa novim generacijama telekomunikacionih tehnologija omogućava kreiranje pametnih komunikacionih sistema koji sadrže veliki broj uređaja i senzora, koji su malih dimenzija, skromnih mogućnosti napajanja i ograničenih računskih sposobnosti. Poznato je da koncept kognitivnog radija omogućava poboljšanje iskorišćenosti spektralnih resursa, pri čemu kognitivni pristup spektru sa kontrolisanim nivoom interferencije na mestu prijemnika primarnih korisnika spektra predstavlja jedno od najznačajnijih rešenja. Zaštita primarnog korisnika spektra ostvaruje se u tom slučaju adaptacijom predajne snage sekundarnog korisnika, u skladu sa dostupnom informacijom o stanju u kanalu ka primarnom korisniku. Međutim, u realnom, dinamičnom okruženju kanal ka primarnom korisniku je vremenski promenljiv, pa je informacija o stanju u kanalu praktično uvek nesavršena ili zastarela. Stoga je u kognitivnoj mreži koja se sastoji od velikog broja računski ograničenih uređaja, za pristup spektralnim resursima poželjno korišćenje rešenja manje računске složenosti. Ovaj uslov je zadovoljen u slučaju primene pristupa sa kontrolisanim nivoom interferencije i statističkom informacijom o stanju u kanalu, gde ne postoji strogo ograničenje interferencije, već se definisani prag interferencije premašuje u određenom, dozvoljenom procentu vremena.

Osim korišćenja spektralno efikasnih rešenja, dizajn mreže sa velikim brojem uređaja male snage zahteva i energetski efikasna praktična rešenja. Uređaji se mogu napajati baterijama, ali je njihov životni vek ograničen, a sama zamena nije pogodna u slučaju velikog broja uređaja ili je čak i rizična ako se oni nalaze na teško pristupačnim mestima. Tehnike bežičnog prenosa energije predstavljaju inovativno i pogodno rešenje, gde se energija prikuplja od izvora u okruženju i pretvara u upotrebljivu električnu energiju. Iako postoje razni prirodni izvori energije koji se mogu koristiti, prikupljanje energije iz RF signala omogućava neophodnu pouzdanost u snabdevanju, kao i mogućnost istovremenog prenosa informacija i energije. RF izvori energije mogu da vrše bežično napajanje uređaja energijom u uslovima kada drugi izvori energije nisu dostupni, s obzirom da danas napretkom tehnologije postoji sve više RF izvora energije u okruženju. Takvim pristupom se štiti životna sredina, a prikupljanje energije omogućava na teško pristupačnim mestima.

Osnovni cilj disertacije je analiza kooperativnih kognitivnih sistema smanjene računске složenosti kojima se unapređuje spektralna efikasnost, sa primenom energetski efikasnog rešenja sa napajanjem bežičnim izvorom energije. Izvršena je analiza performansi kooperativnog kognitivnog sistema u kojem sekundarni predajnik emituje signal u opsegu učestanosti licenciranog, primarnog korisnika spektra na osnovu pristupa sa kontrolisanim nivoom interferencije. Adaptacija snage sekundarnog predajnika vrši se na osnovu poznate statističke informacije o stanju u kanalu čime je smanjena implementaciona i računska složenost sistema. Napajanje sekundarnog predajnika vrši se primenom namenskog RF izvora energije, pri čemu se za prikupljanje energije koristi pristup baziran na prenosu sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu. Dodatno, kako u sistemima sa velikim brojem uređaja koji emituju malom snagom često ne postoji direktna

linija optičke vidljivosti, izvršena je i analiza performansi kooperativnog kognitivnog sistema sa energetske ograničenim relejem koji prikuplja energiju od sekundarnog predajnika i primarnih predajnika. Za prikupljanje energije na releju koristi se pristup baziran na prenosu sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu ili baziran na podeli snage. Analiza predloženih sistema izvršena je pod pretpostavkom da feding u propagacionom okruženju podleže Nakagami- m raspodeli, kao i za scenario sa Rejljevom raspodelom fedinga u okruženju. Kako se u realnim scenarijima, sekundarni korisnik ne nalazi na fiksnoj lokaciji već je pokretan, izvršena je analiza performansi za slučaj mobilnog sekundarnog korisnika, pri čemu se za model kretanja koristi široko prihvaćeni RWP model. Posebna pažnja posvećena je zaštiti informacija na fizičkom sloju i analizi verovatnoće otkaza poverljivosti sekundarnog sistema.

Uvodna glava sadrži opis motivacije za istraživanje izloženo u disertaciji. Dat je detaljan pregled literature i publikovanih rezultata istraživanja iz oblasti istovremenog prenosa informacija i energije, kao i kooperativnih kognitivnih sistema sa kontrolisanim nivoom interferencije. U drugoj glavi disertacije izloženi su modeli sistema i opisani protokoli za prenos informacija i energije. Posebna pažnja je posvećena modelima kanala kojima se opisuje uticaj propagacionog okruženja, modelu kretanja prijemnika i uticaja kretanja na karakteristike prijemnog odnosa snage signala i šuma.

U trećoj glavi disertacije izložena je detaljna analiza performansi sistema za slučaj kada se koristi bežični prenos energije sa namenskih izvora, kao i izvora energije u okruženju, kada svi čvorovi u sistemu imaju fiksne pozicije. Izvedeni su originalni analitički izrazi u zatvorenom obliku za verovatnoću otkaza sistema u slučaju kada se prenos informacija od predajnika do prijemnika izvršava posredstvom energetske ograničenog relejnog čvora, pri čemu sekundarni sistem spektralnim resursima pristupa koristeći kontrolu nivoa interferencije na mestu primarnog prijemnika, na osnovu statističke informacije o stanju u kanalu. Tačnost izvedenih analitičkih izraza potvrđena je primenom nezavisno razvijenog simulacionog modela. Prikazan je uticaj različitih parametara na performanse sistema. Bolje performanse se postižu kada su uslovi ograničenja interferencije u primarnoj mreži manje restriktivni, odnosno kada su veće vrednosti dozvoljenog praga interferencije i verovatnoće premašenja interferencije u primarnoj mreži, što rezultuje povećanom dozvoljenom snagom sekundarnog korisnika. Takođe, performanse kognitivnog sistema se poboljšavaju ukoliko pojačanja u kanalima u sekundarnoj mreži imaju veće vrednosti, a pojačanja u kanalima od sekundarne ka primarnoj mreži imaju manje vrednosti. U slučaju kada se sistem napaja sa namenskog izvora za bežični prenos energije, performanse se poboljšavaju sa većom dostupnom snagom, ukoliko zahtev ograničenja primarne mreže ne predstavlja restriktivniji uslov. Kada se koristi protokol za bežično prikupljanje energije baziran na prenosu sa raspodelom intervala za prenos energije i informacija u vremenu na performanse sistema, izračunata je optimalna vrednost faktora za raspodelu vremena za koju se dobijaju najbolje vrednosti performansi sistema. U scenariju u kome se prenos informacije u sekundarnoj mreži vrši posredstvom sekundarnog releja određena je optimalna pozicija releja pri kojoj se dobijaju najbolje performanse sistema.

Analiza kooperativnog kognitivnog sistema u četvrtoj glavi proširena je na slučaj kada sekundarni prijemnik nema fiksnu poziciju, već se kreće po RWP modelu kretanja, kojim su obuhvaćeni 1D, 2D i 3D obrasci kretanja korisnika. Izvedeni su originalni analitički izrazi u zatvorenom obliku za verovatnoću otkaza i ergodični kapacitet kognitivnog sistema sa namenskim izvorom energije. Dobijeni rezultati potvrđeni su primenom nezavisnog simulacionog modela. Najbolje performanse postižu se kada se korisnik kreće po 1D obrascu kretanja, dok do degradacije performansi dolazi kada korisnik ima mogućnost kretanja po 3D obrascu. Analiza performansi sistema sa mobilnim korisnikom izvršena je i za slučaj kada se prenos vrši uz pomoć energetske ograničenog releja i izvršena je analiza optimalne pozicije releja pri kojoj se dobijaju najbolje performanse sistema.

Zaštita informacija u bežičnom telekomunikacionom sistemu na fizičkom sloju analizirana je u glavi 5. Izvršena je analiza parametara sistema i kanala koji utiču na smanjenje mogućnosti prisluškivanja prenosa informacija između legitimnih korisnika od strane prisluškivača. Analiza performansi je izvršena u slučaju kada je sekundarni prijemnik mobilan ili ima fiksnu poziciju, pri čemu su razmatrani scenariji kada se prisluškivač kreće na osnovu definisanog modela kretanja ili ima fiksnu poziciju. Za razmatrane slučajeve mobilnosti sekundarnog korisnika i prisluškivača izvedeni su analitički izrazi u zatvorenom obliku za verovatnoću otkaza poverljivosti. Izvedeni izrazi predstavljaju donje granice performansi sistema i sa visokom tačnošću opisuju performanse sekundarnog sistema po pitanju zaštite informacija. Pokazan je uticaj parametara sistema i kanala i mobilnosti korisnika i prisluškivača na verovatnoću otkaza poverljivosti i kapacitet poverljivosti. Za različite pozicije prisluškivača u sistemu izvršeno je određivanje optimalne pozicije releja pri kojoj se dobija minimalna vrednost verovatnoće otkaza poverljivosti. Ukoliko se prisluškivač nalazi dalje od sekundarne mreže, sekundarni relej teži da se udalji od prisluškivača, ali da ostane bliže sekundarnom prijemniku. Kako se prisluškivač približava sekundarnoj mreži, sekundarni relej se više približava sekundarnom prijemniku, dok u slučaju kada se prisluškivač nađe na putanji između sekundarnog releja i sekundarnog prijemnika, bolje performanse se postižu kada je sekundarni relej bliži sekundarnom predajniku.

Analiza izvršena u tezi daje detaljan uvid u mogućnosti spektralno i energetske efikasne kooperativnog sistema sa kognitivnim pristupom spektru i bežičnim prenosom energije. Izvedeni analitički rezultati i simulacioni modeli predstavljaju osnovu za dalji razvoj analize i primenu drugih tehnika kooperativnog prenosa informacija i energije.

Literatura

- [1] F. Jameel, Z. Hamid, F. Jabeen, S. Zeadally and M. A. Javed, "A Survey of Device-to-Device Communications: Research Issues and Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2133-2168, April 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2828120.
- [2] R. Dangi, P. Lalwani, G. Choudhary, I. You and G. Pau, "Study and Investigation on 5G Technology: A Systematic Review," *Sensors*, vol. 22, no. 1, pp. 26, December 2021, doi:10.3390/s22010026.
- [3] I. Salah, M. M. Mabrook, A. I. Hussein and K. H. Rahouma, "Comparative Study of Efficiency Enhancement Technologies in 5G Networks - A survey," *Procedia Computer Science*, vol. 182, pp. 150-158, March 2021, doi: 10.1016/j.procs.2021.02.020.
- [4] Ericsson, "Mobile data traffic outlook," [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/dataforecasts/mobile-traffic-forecast> [Accessed 10 June 2023].
- [5] A. Dogra, R. K. Jha and S. Jain, "A Survey on Beyond 5G Network With the Advent of 6G: Architecture and Emerging Technologies," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 67512-67547, October 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031234.
- [6] Statista, "Number of Internet of Things (IoT) connected devices worldwide from 2019 to 2023, with forecasts from 2022 to 2030," [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>, [Accessed 10 December 2023].
- [7] N. Ashraf, S. A. Sheikh, S. A. Khan, I. Shayea and M. Jalal, "Simultaneous Wireless Information and Power Transfer With Cooperative Relaying for Next-Generation Wireless Networks: A Review," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 71482-71504, May 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3078703.
- [8] S. Zeadally, F.K. Shaikh, A. Talpur and Q.Z. Sheng, "Design architectures for energy harvesting in the Internet of Things," *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier*, vol. 128, pp. 109901, August 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109901.
- [9] F. Yildiz, "Potential Ambient Energy-Harvesting Sources and Techniques," *The Journal of Technology Studies*, vol. 35, pp. 40-48, September 2009, doi:10.21061/jots.v35i1.a.6.
- [10] S. E. Hassani, H. E. Hassani and N. Boutammachte, "RF Energy Harvesting for 5G: An Overview," *2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Tangier, Morocco, pp. 1-6, December 2017, doi: 10.1109/IRSEC.2017.8477242.

- [11] T. Paing, J. Shin, R. Zane and Z. Popovic, "Resistor Emulation Approach to Low-Power RF Energy Harvesting," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 3, pp. 1494-1501, May 2008, doi: 10.1109/TPEL.2008.921167.
- [12] S. Özyurt, A. F. Coşkun, S. Büyükçorak, G. Karabulut Kurt and O. Kucur, "A Survey on Multiuser SWIPT Communications for 5G+," in *IEEE Access*, vol. 10, pp. 109814-109849, October 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3212774.
- [13] L. Liu, R. Zhang and K. -C. Chua, "Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting," *2012 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings*, Cambridge, MA, USA, pp. 950-954, July 2012, doi: 10.1109/ISIT.2012.6284703.
- [14] V.-D. Phan, T.N. Nguyen, M. Tran, T.T. Trang, M. Voznak, D.-H. Ha and T.-L. Nguyen, "Power Beacon-Assisted Energy Harvesting in a Half-Duplex Communication Network under Co-Channel Interference over a Rayleigh Fading Environment: Energy Efficiency and Outage Probability Analysis," *Energies*, vol. 12, pp. 2579, July 2019, doi:10.3390/en12132579
- [15] S. Khoshabi Nobar, K. Adli Mehr, J. Musevi Niya and B. Mozaffari Tazehkand, "Cognitive Radio Sensor Network With Green Power Beacon," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 5, pp. 1549-1561, March 2017, doi: 10.1109/JSEN.2017.2647878.
- [16] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," *2008 IEEE International Symposium on Information Theory*, Toronto, ON, Canada, pp. 1612-1616, July 2008, doi: 10.1109/ISIT.2008.4595260.
- [17] FCC, "Spectrum Policy Task Force," [Online]. Available: <https://www.fcc.gov/document/spectrum-policy-task-force>, [Accessed 10 June 2023].
- [18] F. Hu, B. Chen and K. Zhu, "Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15754-15776, February 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2802450.
- [19] M. H. Islam *et al.*, "Spectrum Survey in Singapore: Occupancy Measurements and Analyses," *2008 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008)*, Singapore, pp. 1-7, May 2008, doi: 10.1109/CROWNCOM.2008.4562457.
- [20] D. Datla, A. M. Wyglinski and G. J. Minden, "A Spectrum Surveying Framework for Dynamic Spectrum Access Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 4158-4168, October 2009, doi: 10.1109/TVT.2009.2021601.
- [21] F. Hu, B. Chen and K. Zhu, "Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15754-15776, February 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2802450.
- [22] A. A. Khan, M. H. Rehmani and A. Rachedi, "Cognitive-Radio-Based Internet of Things: Applications, Architectures, Spectrum Related Functionalities, and Future Research Directions," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 17-25, June 2017, doi: 10.1109/MWC.2017.1600404.
- [23] F. A. Awin, Y. M. Alginahi, E. Abdel-Raheem and K. Tepe, "Technical Issues on Cognitive Radio-Based Internet of Things Systems: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97887-97908, July 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929915.
- [24] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric and S. Srinivasa, "Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894-914, May 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2015717.

- [25] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," in *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, August 1999, doi: 10.1109/98.788210.
- [26] K. -L. A. Yau, J. Qadir, C. Wu, M. A. Imran and M. H. Ling, "Cognition-Inspired 5G Cellular Networks: A Review and the Road Ahead," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 35072-35090, July 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2849446.
- [27] Y. -C. Liang, K. -C. Chen, G. Y. Li and P. Mahonen, "Cognitive radio networking and communications: an overview," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 7, pp. 3386-3407, September 2011, doi: 10.1109/TVT.2011.2158673.
- [28] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 2, pp. 649-658, February 2007, doi: 10.1109/TWC.2007.05447.
- [29] L. Musavian and S. Aissa, "Capacity and power allocation for spectrum-sharing communications in fading channels," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 148-156, January 2009, doi: 10.1109/T-WC.2009.070265.
- [30] B. Kumar, S.K. Dhurandher and I. Woungang, "A survey of overlay and underlay paradigms in cognitive radio networks," *International Journal of Communication Systems*, vol. 31, Issue 2, October 2017, doi:10.1002/dac.3443.
- [31] J. Jarrouj, V. Blagojevic and P. Ivanis, "Outage Probability and Ergodic Capacity of Spectrum-Sharing Systems with MRC Diversity," *Frequenz*, vol. 70, pp. 157-171, February 2016, doi:10.1515/freq-2015-0160.
- [32] H. A. Suraweera, P. J. Smith and M. Shafi, "Capacity Limits and Performance Analysis of Cognitive Radio With Imperfect Channel Knowledge," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 4, pp. 1811-1822, May 2010, doi: 10.1109/TVT.2010.2043454.
- [33] J. Jarrouj, V. Blagojevic and P. Ivanis, "Outage probability of SINR for underlay cognitive radio systems in Nakagami fading," *Frequenz*, vol. 68, pp. 563-572, October 2014, doi:10.1515/ freq-2014-0029.
- [34] H. Kim, H. Wang, S. Lim and D. Hong, "On the Impact of Outdated Channel Information on the Capacity of Secondary User in Spectrum Sharing Environments," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 1, pp. 284-295, January 2012, doi: 10.1109/TWC.2011.112311.110307.
- [35] S. Lim, H. Wang, H. Kim and D. Hong, "Mean Value-Based Power Allocation without Instantaneous CSI Feedback in Spectrum Sharing Systems," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 3, pp. 874-879, March 2012, doi: 10.1109/TWC.2012.020712.102197.
- [36] X. Guan, W. Yang and Y. Cai, "Outage Performance of Statistical CSI Assisted Cognitive Relay with Interference from Primary User," in *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 7, pp. 1416-1419, July 2013, doi: 10.1109/LCOMM.2013.060513.130882.
- [37] C. Kabiri, H. -J. Zepernick and H. Tran, "Outage probability of a cognitive cooperative relay network with multiple primary users under primary outage constraint," *2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Hanoi, Vietnam, October 2016, pp. 38-42, doi: 10.1109/ATC.2016.7764809.
- [38] D. Lee, "Performance analysis of scheduled STBC using statistical CSI under multiple interferers with different power in CR-MIMO systems," *Physical Communication*, vol. 27, pp. 125-132, April 2018, doi: 10.1016/j.phycom.2018.02.007.

- [39] N.P. Nguyen, T.L. Thanh, T.Q. Duong, and A. Nallanathan, "Secure communications in cognitive underlay networks over Nakagami- m channel," *Physical Communication*, vol. 25, pp.610-618, December 2017, doi: 10.1016/j.phycom.2016.05.003.
- [40] J. M. Moualeu, D. B. da Costa, W. Hamouda, U. S. Dias and R. A. A. de Souza, "Physical Layer Security Over α - κ - μ and α - η - μ Fading Channels," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 1, pp. 1025-1029, January 2019, doi: 10.1109/TVT.2018.2884832.
- [41] L. Wang, "Physical Layer Security in Wireless Cooperative Networks," *Springer*, Berlin, 2018, ISBN: 978-3-319-87179-0.
- [42] M. Bloch, J. Barros, M. R. D. Rodrigues and S. W. McLaughlin, "Wireless Information-Theoretic Security," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no. 6, pp. 2515-2534, June 2008, doi: 10.1109/TIT.2008.921908.
- [43] A. D. Wyner, "The wire-tap channel," in *The Bell System Technical Journal*, vol. 54, no. 8, pp. 1355-1387, October 1975, doi: 10.1002/j.1538-7305.1975.tb02040.x.
- [44] X. Liu and X. Zhang, "NOMA-Based Resource Allocation for Cluster-Based Cognitive Industrial Internet of Things," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 8, pp. 5379-5388, August 2020, doi: 10.1109/TII.2019.2947435.
- [45] J. Adu Ansere, G. Han, H. Wang, C. Choi and C. Wu, "A Reliable Energy Efficient Dynamic Spectrum Sensing for Cognitive Radio IoT Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 4, pp. 6748-6759, August 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2911109.
- [46] S. Ulukus, A. Yener, E. Erkip, O. Simeone, M. Zorzi, P. Grover, K. Huang, "Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 3, pp. 360-381, March 2015, doi: 10.1109/JSAC.2015.2391531.
- [47] Powercast, "Powercast Overview – RF Energy Harvesting and Wireless Power for Micropower Applications," [Online]. Available: <https://www.powercastco.com/company/about/> [Accessed 10 August 2020].
- [48] K. Lee and J. Ko, "RF-Based Energy Transfer Through Packets: Still a Dream? or a Dream Come True?," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 163840-163850, October 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2950711.
- [49] J. Huang, Y. Zhou, Z. Ning and H. Gharavi, "Wireless Power Transfer and Energy Harvesting: Current Status and Future Prospects," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 4, pp. 163-169, August 2019, doi: 10.1109/MWC.2019.1800378.
- [50] M. Amjad, O. Chughtai, M. Naeem and W. Ejaz, "SWIPT-Assisted Energy Efficiency Optimization in 5G/B5G Cooperative IoT Network," *Energies*, vol. 14, pp. 2515, April 2021, doi: 10.3390/en14092515
- [51] C. Xu, M. Zheng, W. Liang, H. Yu and Y. -C. Liang, "Outage Performance of Underlay Multihop Cognitive Relay Networks With Energy Harvesting," in *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 6, pp. 1148-1151, June 2016, doi: 10.1109/LCOMM.2016.2547985.
- [52] T. X. Doan, T. M. Hoang, T. Q. Duong and H. Q. Ngo, "Energy Harvesting-Based D2D Communications in the Presence of Interference and Ambient RF Sources," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5224-5234, March 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2681696.
- [53] S. Park, H. Kim and D. Hong, "Cognitive Radio Networks with Energy Harvesting," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 3, pp. 1386-1397, March 2013, doi: 10.1109/TWC.2013.012413.121009.

- [54] S. Lee, R. Zhang and K. Huang, "Opportunistic Wireless Energy Harvesting in Cognitive Radio Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 9, pp. 4788-4799, September 2013, doi: 10.1109/TWC.2013.072613.130323.
- [55] V.M. Blagojevic, A.M. Cvetkovic and P. Ivanis, "Performance analysis of energy harvesting DF relay system in generalized-K fading environment," *Physical Communication*, vol.28, pp. 190-200, June 2018, doi: 10.1016/j.phycom.2018.04.006.
- [56] Y. Gu and S. Aïssa, "RF-Based Energy Harvesting in Decode-and-Forward Relaying Systems: Ergodic and Outage Capacities," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 11, pp. 6425-6434, November 2015, doi: 10.1109/TWC.2015.2453418.
- [57] S. Yang, G. Lu and Y. Ren, "Optimal power allocation and relay location for DF energy harvesting relaying sensor networks," *Sensors*, vol. 19, pp. 2326, May 2019, doi:10.3390/s19102326.
- [58] H. Xu, H. Gao, C. Zhou, R. Duan and X. Yhou, "Resource allocation in cognitive radio wireless sensor networks with energy harvesting," *Sensors*, vol. 19, pp. 5115, November 2019, doi:10.3390/s19235115.
- [59] N. Kozić, V. Blagojević, and P. Ivaniš, "Performance Analysis of Underlay Cognitive Radio System with Self-Sustainable Relay and Statistical CSI," *Sensors*, vol. 21, no. 11, pp. 3727, May 2021, doi: 10.3390/s21113727.
- [60] N. Kozić, V. Blagojević, and P. Ivaniš, "Ergodic Capacity Analysis of Cognitive System with Self-Sustainable Relay and Statistical CSI," *29th Telecommunications Forum (TELFOR)*, pp. 1-4, Belgrade, Serbia, November 2021, doi: 10.1109/TELFOR52709.2021.9653387
- [61] A. Cvetkovic, V. Blagojevic and P. Ivanis, "Performance Analysis of Nonlinear Energy-Harvesting DF Relay System in Interference-Limited Nakagami-m Fading Environment," *Etri Journal*, vol.39, pp.803-812, December 2017, doi: 10.4218/etrij.2017-0096.
- [62] F. Zhang, T. Jing, Y. Huo and K. Jiang, "Outage probability minimization for energy harvesting cognitive radio sensor networks," *Sensors*, vol. 17, pp. 224, January 2017, doi:10.3390/s17020224.
- [63] H. Toan, V. Bao and K. Le, "Performance analysis of cognitive underlay two-way relay networks with interference and imperfect channel state information," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 53, March 2018, doi:10.1186/s13638-018-1063-z.
- [64] B. Prasad, S. Dhar Roy and S. Kundu, "Performance of cognitive relay network with energy harvesting relay under imperfect CSI," *International Journal of Communication Systems*, vol. 31, August 2016, doi:10.1002/dac.3549.
- [65] T. M. Hoang, N. L. Van, B. C. Nguyen and L.T. Dung, "On the performance of energy harvesting non-orthogonal multiple access relaying system with imperfect channel state information over Rayleigh fading channels," *Sensors*, vol. 19, pp. 3327, July 2019, doi:10.3390/s19153327.
- [66] M. Amjad, O. Chughtai, M. Naeem and W. Ejaz, "SWIPT-Assisted Energy Efficiency Optimization in 5G/B5G Cooperative IoT Network," *Energies*, vol. 14, pp. 2515, April 2021, doi: 10.3390/en14092515.
- [67] P. T. Tin, B. H. Dinh, T.N. Nguyen, D.H. Ha and T.T. Trang, "Power Beacon-Assisted Energy Harvesting Wireless Physical Layer Cooperative Relaying Networks: Performance Analysis," *Symmetry*, vol. 12, pp. 106, January 2020, doi: 10.3390/sym12010106.

- [68] O. S. Badarneh, "A comprehensive analysis of the achievable throughput in interference-limited wireless-powered networks with nonlinear energy harvester," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 31, pp. 1-17, October 2020, doi:10.1002/ett.4141.
- [69] F. Zhao, H. Lin, C. Zhong, Z. Hadzi-Velkov, G. K. Karagiannidis and Z. Zhang, "On the Capacity of Wireless Powered Communication Systems Over Rician Fading Channels," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 1, pp. 404-417, January 2018, doi: 10.1109/TCOMM.2017.2754488.
- [70] P. T. Tin, V.-D. Phan, T. N. Nguyen, L. T. Tu, B. V. Minh, M. Voznak and P. Fazio, "Outage Analysis of the Power Splitting Based Underlay Cooperative Cognitive Radio Networks," *Sensors*, vol. 21, pp. 7653, November 2021, doi: 10.3390/s21227653.
- [71] N. P. Le, "Outage Probability Analysis in Power-Beacon Assisted Energy Harvesting Cognitive Relay Wireless Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, September 2017, doi: 10.1155/2017/2019404.
- [72] V. A. Aalo, C. Mukasa and G. P. Efthymoglou, "Effect of Mobility on the Outage and BER Performances of Digital Transmissions over Nakagami- m Fading Channels," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 2715-2721, April 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2421502.
- [73] O. S. Badarneh, D. B. Da Costa and P. H. J. Nardelli, "Wireless-Powered Communication Networks With Random Mobility," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 166476-166492, November 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2952954.
- [74] O. S. Badarneh, D. Benevides da Costa and P. H. Juliano Nardelli, "Transmit Antenna Selection in Wireless-Powered Communication Networks," *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Istanbul, Turkey, pp. 1-6, September 2019, doi: 10.1109/PIMRC.2019.8904398.
- [75] N. Kozić, V. Blagojević, A. Cvetković, and P. Ivaniš, "Performance Analysis of Wirelessly Powered Cognitive Radio Network with Statistical CSI and Random Mobility," *Sensors*, vol. 23, no. 9, pp. 4518, May 2023, doi: 10.3390/s23094518.
- [76] E. Meesa-Ard and S. Pattaramalai, "Evaluating the Mobility Impact on the Performance of Heterogeneous Wireless Networks Over $\eta - \mu$ Fading Channels," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 65017-65032, January 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075702.
- [77] V. A. Aalo, P. S. Bithas and G. P. Efthymoglou, "Ergodic Capacity of Generalized Fading Channels With Mobility," in *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, vol. 3, pp. 15-25, November 2021, doi: 10.1109/OJVT.2021.3131321.
- [78] E. Meesa-Ard, S. Pattaramalai and M. D. C. Madapatha, "Evaluating the Impact of Mobility over K-II Generalized Fading Channels in Digital Communication," *2018 8th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC)*, Beijing, China, pp. 35-39, September 2018, doi: 10.1109/ICEIEC.2018.8473558.
- [79] C. Li, J. Yao, H. Wang, U. Ahmed and S. Du, "Effect of Mobile Wireless on Outage and BER Performances Over Rician Fading Channel," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 91799-91806, May 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2994350.
- [80] E. Meesa-ard and S. Pattaramalai, "Analyzing the Impact of Mobility over α - μ Generalized Fading Channels in Wireless Communication," *2018 3rd International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS)*, Nagoya, Japan, pp. 318-322, April 2018, doi: 10.1109/CCOMS.2018.8463314.

- [81] T. Camp, J. Boleng and V. Davies, "A survey of mobility models for ad hoc network research," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, pp. 483-502, August 2002, doi:10.1002/wcm.72.
- [82] V. A. Aalo, P. S. Bithas and G. P. Efthymoglou, "On the Impact of User Mobility on the Performance of Wireless Receivers," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 197300-197311, October 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3034450.
- [83] J. Yao, C. Li, S. Du, W. Wu and R. Gao, "Outage Probability over Nakagami – m Fading Channel in the Random Direction Mobile Model," *2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, Korea (South), pp. 427-430, October 2020, doi: 10.1109/ICTC49870.2020.9289423.
- [84] M. Das and B. Sahu, "Effect of MRC Diversity on Outage Probability in Mobile Networks," *2019 Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*, Bangalore, India, pp. 1-4, October 2019, doi: 10.1109/GCAT47503.2019.8978423.
- [85] K. Govindan, K. Zeng and P. Mohapatra, "Probability Density of the Received Power in Mobile Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 11, pp. 3613-3619, November 2011, doi: 10.1109/TWC.2011.080611.102250.
- [86] P. Ju, W. Song and A. -L. Jin, "Exact Outage Probability for a Wireless Diversity Network With Spatially Random Mobile Relays," in *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 9, pp. 1641-1644, September 2014, doi: 10.1109/LCOMM.2014.2345671.
- [87] K. O. Odeyemi, P. A. Owolawi and O. O. Olakanmi, "On the performance of underlay cognitive radio system with random mobility under imperfect channel state information," *International Journal of Communication System*, vol. 33, July 2020, doi: 10.1002/dac.4561
- [88] L. Zhang, R. Zhang, Y. -C. Liang, Y. Xin and S. Cui, "On the relationship between the multi-antenna secrecy communications and cognitive radio communications," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 6, pp. 1877-1886, June 2010, doi: 10.1109/TCOMM.2010.06.090063.
- [89] Z. Shu, Y. Yang, Y. Qian and R. Q. Hu, "Impact of Interference on Secrecy Capacity in a Cognitive Radio Network," *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011*, Houston, TX, USA, pp. 1-6, December 2011, doi: 10.1109/GLOCOM.2011.6133652.
- [90] Z. Shu, Y. Qian and S. Ci, "On physical layer security for cognitive radio networks," in *IEEE Network*, vol. 27, no. 3, pp. 28-33, May 2013, doi: 10.1109/MNET.2013.6523805.
- [91] G. Zhang, Y. Gao, H. Luo, S. Wang, M. Guo and N. Sha, "Security Performance Analysis for Best Relay Selection in Energy-Harvesting Cooperative Communication Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 26-36, December 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2960819.
- [92] G. Zhang, Y. Gao, H. Luo, N. Sha, S. Wang and K. Xu, "Security Performance Analysis for Relay Selection in Cooperative Communication System under Nakagami-m Fading Channel," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E102-B, no. 3, pp. 603-612, September 2018, doi: 10.1587/transcom.2018EBP3153.
- [93] Y. Zou, M. Sun, J. Zhu and H. Guo, "Security-Reliability Tradeoff for Distributed Antenna Systems in Heterogeneous Cellular Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 12, pp. 8444-8456, December 2018, doi: 10.1109/TWC.2018.2877610.
- [94] A. H. Abd El-Malek, A. M. Salhab, S. A. Zummo and M. -S. Alouini, "Security-Reliability Trade-Off Analysis for Multiuser SIMO Mixed RF/FSO Relay Networks With Opportunistic User Scheduling," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 9, pp. 5904-5918, September 2016, doi: 10.1109/TWC.2016.2572681.

- [95] N. D. Milošević, J. A. Anastasov, A. M. Cvetković, D. M. Milović and D. N. Milić, “On the Intercept Probability of DF Relaying Wireless Communication,” *Wireless Personal Communications*, vol. 104, pp. 1523-1533, February 2019, doi: 10.1007/s11277-018-6096-4.
- [96] Y. Zou, X. Wang and W. Shen, “Optimal Relay Selection for Physical-Layer Security in Cooperative Wireless Networks,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 10, pp. 2099-2111, October 2013, doi: 10.1109/JSAC.2013.131011.
- [97] K. Odeyemi, P. A. Owolawi and O. Olakanmi, “Secrecy outage probability in energy harvesting aided underlay cognitive radio network under eavesdroppers scenarios,” *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 31, August 2020, doi: 10.1002/ett.4041.
- [98] H. Lei *et al.*, “On Secrecy Outage of Relay Selection in Underlay Cognitive Radio Networks Over Nakagami- m Fading Channels,” in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 3, no. 4, pp. 614-627, December 2017, doi: 10.1109/TCCN.2017.2758372.
- [99] P. Nguyen, T. L. Tu, T. Q. Duong and A. Nallanathan, “Secure communications in cognitive underlay networks over Nakagami- channel,” *Physical Communication*, vol. 25, June 2016, doi: 10.1016/j.phycom.2016.05.003.
- [100] X. Shang, H. Yin, Y. Wang, M. Li and Y. Wang, “Secrecy Performance Analysis of Wireless Powered Sensor Networks Under Saturation Nonlinear Energy Harvesting and Activation Threshold,” *Sensors*, vol. 20, pp. 1632, March 2020, doi: 10.3390/s20061632.
- [101] R. U. Nabar, H. Bolcskei and F. W. Kneubuhler, “Fading relay channels: performance limits and space-time signal design,” in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22, no. 6, pp. 1099-1109, August 2004, doi: 10.1109/JSAC.2004.830922.
- [102] S. Ma, Y. Yang and H. Sharif, “Distributed MIMO technologies in cooperative wireless networks,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 5, pp. 78-82, May 2011, doi: 10.1109/MCOM.2011.5762801.
- [103] E. C. Van der Meulen, “Three-terminal communication channels,” *Advances in Applied Probability*, vol. 3, pp. 120–154, 1971, doi: 10.2307/1426331.
- [104] T. Cover and A. E. Gamal, “Capacity theorems for the relay channel,” in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 25, no. 5, pp. 572-584, September 1979, doi: 10.1109/TIT.1979.1056084.
- [105] M. Dohler and Y. Li, “Cooperative Communications: Hardware, Channel and PHY,” John Wiley & Sons, United Kingdom, January 2010, ISBN: 978-0-470-99768-0
- [106] J. N. Laneman, D. N. C. Tse and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, December 2004, doi: 10.1109/TIT.2004.838089.
- [107] A. Nosratinia, T. E. Hunter and A. Hedayat, “Cooperative communication in wireless networks,” in *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74-80, October 2004, doi: 10.1109/MCOM.2004.1341264.
- [108] J. N. Laneman, G. W. Wornell and D. N. C. Tse, “An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks,” *Proceedings. 2001 IEEE International Symposium on Information Theory (IEEE Cat. No.01CH37252)*, Washington, DC, USA, June 2001, pp. 294-, doi: 10.1109/ISIT.2001.936157.
- [109] L. Fei, Li Qinghua, L. Tao and Y. Guangxin, “Impact of Relay Location According to SER for Amplify-and-Forward Cooperative Communications,” *2007 International Workshop on*

Anti-Counterfeiting, Security and Identification (ASID), Xizmen, China, pp. 324-327, April 2007, doi: 10.1109/IWASID.2007.373648.

- [110] S. Borade, L. Zheng and R. Gallager, "Amplify-and-Forward in Wireless Relay Networks: Rate, Diversity, and Network Size," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3302-3318, October 2007, doi: 10.1109/TIT.2007.904774.
- [111] Y. Li, "Distributed coding for cooperative wireless networks: An overview and recent advances," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 8, pp. 71-77, August 2009, doi: 10.1109/MCOM.2009.5181895.
- [112] J. Boyer, D. D. Falconer and H. Yanikomeroglu, "Multihop diversity in wireless relaying channels," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 10, pp. 1820-1830, October 2004, doi: 10.1109/TCOMM.2004.836447.
- [113] B. Talha and M. Pätzold, "Channel Models for Mobile-to-Mobile Cooperative Communication Systems: A State of the Art Review," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 33-43, June 2011, doi: 10.1109/MVT.2011.940793.
- [114] Y. Wu, J. Chen, G. Li and D. Kong, "Performance Analysis of a Multi-Hop Parallel Hybrid FSO/RF System over a Gamma-Gamma Turbulence Channel with Pointing Errors and a Nakagami-m Fading Channel," *Photonics*, vol. 9, pp. 631, September 2022, doi: 10.3390/photonics9090631
- [115] A. Jovicic and P. Viswanath, "Cognitive Radio: An Information-Theoretic Perspective," in *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 9, pp. 3945-3958, September 2009, doi: 10.1109/TIT.2009.2025539.
- [116] J. M. Peha, "Approaches to spectrum sharing," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 2, pp. 10-12, February 2005, doi: 10.1109/MCOM.2005.1391490.
- [117] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Capacity of Fading Channels Under Spectrum-Sharing Constraints," *2006 IEEE International Conference on Communications*, Istanbul, Turkey, June 2006, pp. 4373-4378, doi: 10.1109/ICC.2006.255326.
- [118] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani and R. A. Kennedy, "Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, July 2013, doi: 10.1109/TWC.2013.062413.122042.
- [119] M. Nakagami, "The m-Distribution—A General Formula of Intensity Distribution of Rapid Fading," *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, Pergamon, pp. 3-36, 1960, doi: 10.1016/B978-0-08-009306-2.50005-4
- [120] H. Suzuki, "A Statistical Model for Urban Radio Propagation," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 25, no. 7, pp. 673-680, July 1977, doi: 10.1109/TCOM.1977.1093888.
- [121] M. D. Yacoub, J. E. V. Bautista and L. Guerra de Rezende Guedes, "On higher order statistics of the Nakagami-m distribution," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 3, pp. 790-794, May 1999, doi: 10.1109/25.764995.
- [122] C. Bettstetter, G. Resta and P. Santi, "The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 2, no. 3, pp. 257-269, July-September 2003, doi: 10.1109/TMC.2003.1233531.
- [123] M. Abramowitz and I. A. Stegun, "Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables," *National Bureau of Standards*, Washington, DC, USA, vol. 55, p. 319, 1972, ISBN: 978-0-486-61272-0

- [124] M. D. Yacoub, J. E. V. Bautista and L. Guerra de Rezende Guedes, "On higher order statistics of the Nakagami-m distribution," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 3, pp. 790-794, May 1999, doi: 10.1109/25.764995.
- [125] M. C. Jeruchim, P. Balaban and K. S. Shanmugam, "Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology and Techniques," *Springer Science & Business Media*, October 2000, doi: 10.1007/b117713
- [126] Y. R. Zheng and C. Xiao, "Simulation models with correct statistical properties for Rayleigh fading channels," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 6, pp. 920-928, June 2003, doi: 10.1109/TCOMM.2003.813259.
- [127] A. Papoulis, "Probability, Random Variables, and Stochastic Processes," McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1991, ISBN: 0-07-048477-5
- [128] Wolfram Research, "Functions Wolfram," [Online]. Available: <https://functions.wolfram.com/> [Accessed 20 December 2022].
- [129] I.S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik, "Table of Integrals, Series and Products, 5th ed.," *Academic Press Inc*, San Diego, CA, USA, 1994, ISBN: 9780122947551
- [130] A. Goldsmith, "Wireless Communications," *Cambridge University Press*, UK, 2005, doi: 10.1017/CBO9780511841224
- [131] L. Musavian and S. Aissa, "Capacity and power allocation for spectrum-sharing communications in fading channels," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 1, pp. 148-156, January 2009, doi: 10.1109/T-WC.2009.070265.
- [132] S. Wang, M. Xia, K. Huang and Y. -C. Wu, "Wirelessly Powered Two-Way Communication With Nonlinear Energy Harvesting Model: Rate Regions Under Fixed and Mobile Relay," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 12, pp. 8190-8204, December 2017, doi: 10.1109/TWC.2017.2758767
- [133] M. ElKashlan, L. Wang, T. Q. Duong, G. K. Karagiannidis and A. Nallanathan, "On the Security of Cognitive Radio Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, no. 8, pp. 3790-3795, August 2015, doi: 10.1109/TVT.2014.2358624.
- [134] J. Sun, H. Bie, X. Li, J. Zhang, G. Pan and K. M. Rabie, "Secrecy Performance Analysis of SIMO Systems Over Correlated $\kappa - \mu$ Shadowed Fading Channels," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 86090-86101, June 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2924950.
- [135] N. A. Sarker, A. S. M. Badrudduza, S. M. Riazul Islam, Sheikh Habibul Islam, Milton Kumar Kundu, Imran Shafique Ansari and Kyung-Sup Kwak "On the Intercept Probability and Secure Outage Analysis of Mixed ($\alpha - \kappa - \mu$)-Shadowed and Málaga Turbulent Models," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 133849-133860, September 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3113010.

Biografija autora

Nadica Kozić je rođena 24.11.1987. godine u Kruševcu, Republika Srbija. Osnovnu školu je završila u Počakovini sa odličnim uspehom, kao nosilac Vukove diplome i đak generacije. Matematičku gimnaziju u Kruševcu završila je sa odličnim uspehom, kao nosilac Vukove diplome. Osnovne akademske studije je upisala na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu 2006. godine, a diplomirala 2010. godine, na smeru Telekomunikacije i informacione tehnologije. Diplomski rad na temu „Pregled procedura za automatsku retransmisiju paketa (ARQ, HARQ) i primena” odbranila je sa ocenom 10 (deset). Nadica Kozić je ostvarila prosek ocena u toku osnovnih akademskih studija 9,09. Master akademske diplomske studije upisala je 2010. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na smeru Telekomunikacije i informacione tehnologije. Master rad je odbranila 2012. godine, sa ocenom 10 (deset) na temu „Analiza performansi zaštitnih kodova primenjenih u kooperativnim relejnim sistemima”. Prosek ocena na master akademskim studijama je bio 9,67. Nadica Kozić je stekla zvanje diplomirani inženjer - master elektrotehnike i računarstva i 2015. godine upisala doktorske akademske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu na smeru Telekomunikacije. Na doktorskim studijama položila je sve ispite sa ocenom 10.

Odmah po diplomiranju zaposlila se na Vojnotehničkom institutu kao istraživač u Sektoru za elektronske sisteme. Načelnik odseka sistema za elektronsko ratovanje u Sektoru za elektronske sisteme postaje 2017. godine. Ministarstvo odbrane Republike Srbije je 2019. godine Nadici Kozić dodelilo nagradu za učinjeno delo i postignute rezultate od posebnog značaja, za postignute rezultate u oblasti nauke i razvoja naoružanja i vojne opreme kao najboljem istraživaču.

Od januara 2020. godine do maja 2021. godine Nadica Kozić je radila u kompaniji Ibis Instruments na poziciji rukovodioca odeljenja za razvoj softvera. Od maja 2021. godine Nadica Kozić je zaposlena u Banci Poštanska štedionica na poziciji vodećeg inženjera IT infrastrukture u sektoru za informacione tehnologije.

Autor je i koautor više radova koji su saopšteni i publikovani na naučnim skupovima vezanim za telekomunikacije. Objavila je dva rada u časopisima međunarodnog značaja (kategorije M21), jedanaest radova u zbornicima međunarodnih naučnih skupova (kategorije M33), četiri rada u naučnim časopisima nacionalnog značaja (kategorije M52), četiri rada u zbornicima naučnih skupova nacionalnog značaja (kategorije M63), jedno tehničko rešenje klasifikovano kao industrijski prototip u grupi tehnička i razvojna rešenja (kategorije M82) i dva tehnička rešenja klasifikovana kao softver u grupi tehnička i razvojna rešenja (kategorije M85).

Izjava o autorstvu

Ime i prezime autora Nadica Kozić

Broj indeksa 2015/5029

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

Kooperativni kognitivni telekomunikacioni sistemi sa bežičnim prenosom energije i statističkom informacijom o stanju u kanalu

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

U Beogradu, 26.02.2024.

Potpis autora

Kozik Hoquiza

Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada

Ime i prezime autora Nadica Kozić

Broj indeksa 2015/5029

Studijski program Telekomunikacije

Naslov rada Kooperativni kognitivni telekomunikacioni sistemi sa bežičnim prenosom energije i statističkom informacijom o stanju u kanalu

Mentor dr Vesna Blagojević, vanredni profesor

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la radi pohranjivanja u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, 26.02.2024.

Kozic Haguzza

Izjava o korišćenju

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković" da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Kooperativni kognitivni telekomunikacioni sistemi sa bežičnim prenosom energije i statističkom informacijom o stanju u kanalu

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio/la.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo - nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo - nekomercijalno - deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo - bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo - deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.
Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

Potpis autora

U Beogradu, 26.02.2024.

Kozut Haguzsa

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo - nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo - nekomercijalno - bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo - nekomercijalno - deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo - bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo - deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.