



**UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA**



Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije

ODNOS ENERGETSKE EFIKASNOSTI I POUZDANOSTI U BEŽIČNIM SENZORSKIM MREŽAMA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor:
Prof. dr Dragana Bajić
Ko-mentor:
dr Goran Dimić

Kandidat:
mr Nikola Zogović

Novi Sad, 2013. godine

UNIVERZITET U NOVOM SADU

Odnos energetske
efikasnosti i pouzdanosti u
bežičnim senzorskim mrežama

Nikola Zogović

za diplomu

Doktora tehničkih nauka

Disertacija podneta

Departmanu za energetiku, elektroniku i telekomunikacije,

Fakulteta tehničkih nauka,

Univerziteta u Novom Sadu,

Srbija,

2013.

Mentor: prof. dr Dragana Bajić

Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije,
Fakultet tehničkih nauka,
Univerzitet u Novom Sadu

Ko-mentor: dr Goran Dimić

naučni saradnik,
Institut „Mihajlo Pupin“, Beograd

Članovi komisije za ocenu i odbranu teze:

Predsednik: prof. dr Vladimir Crnojević

Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije,
Fakultet tehničkih nauka,
Univerzitet u Novom Sadu

prof. dr Aleksa Zejak

naučni savetnik,
RT-RK, Novi Sad

doc. dr Tatjana Lončar-Turukalo

Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije,
Fakultet tehničkih nauka,
Univerzitet u Novom Sadu

Key Words Documentation	
Accession number, ANO:	
Identification number, INO:	
Document type, DT:	monographic publication
Type of record, TR:	printed textual material
Contents code, CC:	doctoral dissertation
Author, AU:	Nikola Zogović, M.Sc.
Mentor, MN:	Dragana Bajić, PhD
Co-mentor, CMN:	Goran Dimić, PhD
Title, TI:	Energy-Efficiency and Reliability Trade-Off in Wireless Sensor Networks
Language of text, LT:	serbian
Language of abstract, LA:	serbian and english
Country of publication, CP:	Serbia
Locality of publication, LP:	Vojvodina
Publication year, PY:	2013.
Publisher, PB:	Faculty of Technical Sciences
Publication place, PP:	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6.
Physical description, PD:	5 chapters, 135 pages, 44 figures, 9 tables, 144 references
Scientific field, SF:	electrical engineering
Scientific discipline, SD:	telecommunications and signal processing, telecommunication networks
Subject / Key words, S/KW:	wireless communications, energy-efficiency, reliability, packet-loss, Pareto optimization
UC:	
Holding data, HD:	the library Faculty of Technical Sciences
Note, N:	
Abstract, AB:	In this dissertation we quantify energy-efficiency and reliability trade-off in wireless sensor networks at physical and medium access control layers. We find the trade-off optimal solutions in the sense of multi-objective Pareto optimality, without preferences.
Accepted by the Scientific Board on, ASB:	
Defended on, DE:	
Defense Board, DB:	
President:	Vladimir Crnojević, PhD, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad
Member:	Aleksa Zejak, PhD, Military Academy, Belgrade; RT-RK, Novi Sad
Member:	Tatjana Lončar-Turukalo, PhD, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad
Co-mentor:	Goran Dimić, PhD, Mihajlo Pupin Institute, Belgrade
Mentor:	Dragana Bajić, PhD, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad

Ključna Dokumentacijska Informacija	
Redni broj, RBR:	
Identifikacioni broj, IBR:	
Tip dokumentacije, TD:	monografska publikacija
Tip zapisa, TZ:	štampani tekstualni materijal
Vrsta rada, VR:	doktorska teza
Autor, AU:	mr Nikola Zogović
Mentor, MN:	dr Dragana Bajić
Ko-mentor, KMN:	dr Goran Dimić
Naslov rada, NR:	Odnos energetske efikasnosti i pouzdanosti u bežičnim senzorskim mrežama
Jezik publikacije, JP:	srpski
Jezik izvoda, JI:	srpski i engleski
Zemlja publikovanja, ZP:	Srbija
Uže geografsko područje, UGP:	Vojvodina
Godina, GO:	2013.
Izdavač, IZ:	Fakultet tehničkih nauka
Mesto i adresa, MA:	Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6.
Fizički opis rada, FO:	5 poglavlja, 135 strane, 44 slike, 9 tabele, 144 citata
Naučna oblast, NO:	elektrotehnika
Naučna disciplina, ND:	telekomunikacije i obrada signala, telekomunikacione mreže
Predmetna odrednica / Ključne reči, PO:	bežične komunikacije, energetska efikasnost, pouzdanost, gubitak paketa, Pareto optimizacija
UDK:	
Čuva se, ČU:	u biblioteci Fakulteta tehničkih nauka
Važna napomena, VN:	
Izvod, IZ:	U ovoj disertaciji je kvantitativno određen odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti u bežičnim senzorskim mrežama na fizičkom sloju i sloju kontrole pristupa medijumu. Pronađene su optimalne vrednosti ovog odnosa u smislu višeciljne optimizacije sa Pareto pristupom, bez preferenci.
Datum prihvatanja teme, DP:	
Datum odbrane, DO:	
Članovi komisije, KO:	
Predsednik:	dr Vladimir Crnojević, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
Član:	dr Aleksa Zejak, Vojna akademija, Beograd; RT-RK, Novi Sad
Član:	dr Tatjana Lončar-Turukalo, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
Ko-mentor:	dr Goran Dimić, Institut „Mihajlo Pupin”, Beograd
Mentor:	dr Dragana Bajić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Rad na ovoj disertaciji finansijski je podržalo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, kroz projekte III43002 i TR32051.

Zahvaljujem se profesoru Dragani Bajić i Goranu Dimiću za nesebičnu pomoć koju su pružili tokom rada na ovoj disertaciji. Profesoru Dragani Bajić se posebno zahvaljujem za pomoć oko izrade rARQ modela, a Goranu Dimiću za pomoć oko definisanja RFP modela.

Posebnu zahvalnost dugujem supruzi Neveni na razumevanju, podršci i savetima, kao i deci: Đurđi, Momčilu i Nebojši za neizbežne žrtve koje su podneli zbog mog angažovanja.

LISTA RADOVA

Radovi u časopisima:

1. Zogović, Nikola ; Dimić, Goran ; Bajić, Dragana; *PHY-MAC Cross-Layer Approach to Energy-Efficiency and Packet-Loss Trade-off in Low-Power, Low-Rate Wireless Communications*, IEEE Communications Letters, Volume: 17 , Issue: 4, 2013, pp 661 – 664

Probrani konferencijski radovi:

1. Dragana Bajić, Goran Dimić, Nikola Zogović: *A Hybride Procedure with Selective Retransmission for Aggregated Packets of Unequal Length* IEEE International Conference on Communications 2013: IEEE ICC'13- Selected Areas in Communications Symposium (ICC'13 SAC), Budapest, Hungary, June 2013
2. Goran Dimić, Nikola Zogović, Dragana Bajić, *Supportive Relay with Heterogeneous Transceivers: Quantification of Energy Efficiency Improvement* IEEE International Conference on Communications 2013: IEEE ICC'13 - Workshop on Energy Efficiency in Wireless Networks & Wireless Networks for Energy Efficiency (E2Nets), Budapest, Hungary, June 2013
3. Goran Dimić and Nikola Zogović and Dragana Bajić, „*Energy efficiency of supportive relay with novel wireless transmitter power consumption model*“, 2012 Int. Conf. On Selected Topics in Mobile Wireless Networking (iCOST), Avignon, France, 2nd - 4th July, 2012
4. Goran Dimic and Nikola Zogovic and Dragana Bajic, „*A wireless transceiver power consumption model and two-hop vs. Single-hop energy efficiency ratio*“, Future Network & Mobile Summit 2012, Berlin, Germany, 4th - 6th July, 2012

5. Nikola Zogović, Goran Dimić, Dragana Bajić, „*PHY-MAC Cross-Layer Approach to Energy-Efficiency Improvement in Low-Power Communications*“, *The Eighth International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), Aachen, Germany, 6th - 9th November, 2011*
6. Nikola Zogović, Goran Dimić, Dragana Bajić, „*Packet length and transmission power adaptation for energy-efficiency in low-power wireless communications*“, Zbornik radova TELSIKS, Niš, 2011.
7. Nikola Zogović, Goran Dimić, Dragana Bajić, „*The impact of packet length and packet error rate on energy-efficiency in low-power wireless communications*“, *The Second International Workshop on Sensing Technologies in Agriculture, Forestry and Environment EcoSense11*, Beograd, april 2011.
8. Nikola Zogović, Goran Dimić, Dragana Bajić, „*Channel loss based energy consumption model for low-power wireless communication*“, *3rd Wireless Sensor Networks –Theory and Practice Workshop*, Pariz, Francuska, februar 2011.
9. Nikola Zogović, Goran Dimić, Dragana Bajić, „*Low-power wireless transceiver – total channel-loss based power consumption model*“, *9th Int. Symp. On Electronics and Telecommun. ISETC'10, Timisoara, Romania, Nov 2010*.
10. Miloš Jevtić, Nikola Zogović, Goran Dimić, „*Evaluation of Wireless Sensor Network Simulators*“, Zbornik radova TELFOR, Beograd, novembar 2009.
11. Nikola Zogovic, Goran Dimic, „*Zahtevi i tehnološke mogućnosti za komunikaciju u preciznoj poljoprivredi*“, Zbornik radova TELFOR, Beograd, novembar 2008.
12. Nikola Zogovic, Goran Dimic, „*Evaluacija radio-primopredajnika za primenu u bežičnim senzorskim mrežama*“, Zbornik radova ETRAN, Beograd, jun 2008.

13. Nikola Zogovic, „Pregled komercijalno raspoloživih platformi za realizaciju bežičnih senzorskih mreža“, Zbornik radova ETRAN, Herceg Novi, jun 2007.

LISTA SLIKA

Slika 1. Opšti prikaz bežične senzorske mreže.....	29
Slika 2. Univerzalna senzorska platforma	30
Slika 3. Blok dijagrami predajnika (a) i prijemnika (b).....	40
Slika 4. Zavisnost ukupne energije po bitu od bitske brzine i slabljenja kanala za CC1000 RPP	43
Slika 5. Enkapsulacija po slojevima OSI referentnog modela.....	59
Slika 6. $p_{TX}(L)$ za CC1000 i osetljivost prijemnika od -85 dB.....	67
Slika 7. $p_{TX}(L)$ za CC1101 i osetljivost prijemnika od -90 dB.....	67
Slika 8. $p_{TX}(L)$ za CC2420 i osetljivost prijemnika od -90 dB.....	68
Slika 9. $p_{TX}(L)$ za AT86RF212 i osetljivost prijemnika od -90 dB.....	68
Slika 10. Apsolutno odstupanje L-modela od specifikacije proizvođača	69
Slika 11. Relativno odstupanje L-modela od specifikacije proizvođača	69
Slika 12. L regioni komunikacije.....	70
Slika 13. Opšta šema pojačavača snage	71
Slika 14. CC1101 $p_{TX}(p_{tx})$ kriva, $v_{opt} = 0,58$	75
Slika 15. Relativna greška $p_{TX}(p_{tx})$ krive za v_{opt} i $v = 1$	76
Slika 16. Ergodičan dijagram stanja klasične ARQ tehnike	79
Slika 17. Ergodičan dijagram stanja rARQ tehnike.....	81
Slika 18. Poređenje gubitka paketa, primer 1 rARQ i ARQ.....	85
Slika 19. Poređenje očekivanog broja pokušaja slanja ANY paketa, primer 1 rARQ i ARQ	86
Slika 20. Poređenje gubitka paketa, primer 2 rARQ i ARQ.....	87
Slika 21. Poređenje očekivanog broja pokušaja slanja ANY paketa, primer 2 rARQ i ARQ	87
Slika 22. (a) Struktura jediničnog paketa, (b) struktura okvira koji sadrži m fragmenata.....	91
Slika 23. Zavisnost energetske efikasnosti od dužine paketa i verovatnoće greške paketa za slabljenje kanala od 94 dBm I dužinu kontronih podataka 20 b	103
Slika 24. $E_{b,data,tot,min}$ za različite L i l_c	103
Slika 25. l_{opt} za različite L i l_c	104
Slika 26. $p_{tx,opt}$ za različite L i l_c	104
Slika 27. Relativna ušteda energije u slanju paketa AFR tehnikom u odnosu na slanje OptTPPL tehnikom.....	105

Slika 28. $E_{b,data,tot,min}$ za različite tehnike transmisije relativno prema MaxTP tehnici	106
Slika 29. Prostor ciljeva (ARQ) – PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	109
Slika 30. Dužina paketa – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	109
Slika 31. Maksimalan broj pokušaja slanja paketa – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	110
Slika 32. Predajna snaga – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	110
Slika 33. Očekivan broj pokušaja slanja paketa, n , u zavisnosti od gubitka paketa, za PECSO optimalne tačke, za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	111
Slika 34. Prostor ciljeva (rARQ) – PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	113
Slika 35. Dužina paketa (rARQ) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	113
Slika 36. Maksimalan broj pokušaja slanja paketa (rARQ) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	114
Slika 37. Predajna snaga (rARQ) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	114
Slika 38. Očekivan broj pokušaja slanja paketa, n , u zavisnosti od gubitka paketa (rARQ), za PECSO optimalne tačke, za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	115
Slika 39. Prostor ciljeva (rARQ) – PECSO i Pareto optimalne tačke za Rayleigh kanal, $L =$ 94 dB	117
Slika 40. Bitska brzina (rARQ) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	117
Slika 41. Dužina paketa (rARQ) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	118
Slika 42. Očekivan maksimalan broj pokušaja (rARQ) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$	118

Slika 43. Predajna snaga (rARQ) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$ 119

Slika 44. Očekivan broj pokušaja slanja paketa, n , u zavisnosti od gubitka paketa (rARQ), za PECSO optimalne tačke, za Rayleigh kanal, $L = 94 \text{ dB}$ 119

LISTA TABELA

Tabela 1. Platforme za BSM, [86]	30
Tabela 2. RPP-i koji rade u slobodnim opsezima oko 315/433/868/915 MHz [87].....	34
Tabela 3. RPP-i koji rade u slobodnom opsegu oko 2,4 GHz [87].....	35
Tabela 4. Uticaj PHY i MAC parametara na energetska efikasnost i pouzdanost	54
Tabela 5. L-model parametri za različite radio-primopredajnike	66
Tabela 6. Parametri radio-primopredajnika	74
Tabela 7. Fitovani i izvedeni parametri modela RPP-a	76
Tabela 8. Opsezi vrednosti promenljivih u prostoru odlučivanja	96
Tabela 9. Parametrizovane promenjive prostora odlučivanja.....	97

Sadržaj

Lista radova.....	9
Radovi u časopisima:.....	9
Probrani konferencijski radovi:	9
Lista slika.....	12
Lista tabela.....	15
Apstrakt.....	18
Abstract.....	20
1. Uvod.....	22
2. Pregled stanja	28
2.1. Bežične senzorske mreže	28
2.1.1 BSM druge generacije	29
2.1.2 Standardi.....	35
2.1.3 Primene BSM	36
2.1.4 Osnovni problemi u BSM dizajnu	37
2.2. Energetska efikasnost u BSM i tehnike za poboljšanje	39
2.2.1 Tehnike za E2 poboljšanje	42
2.3 Pouzdanost u BSM i tehnike za njenu kontrolu	48
2.3.1 Kontrola pouzdanosti na PHY i MAC slojevima.....	49
2.4 Pregled uticaja PHY i MAC parametara na energetska efikasnost i pouzdanost; definicija problema	54
3. Model sistema	56
3.1 Metrike za energetska efikasnost	56
3.2 Metrike za pouzdanost	60
3.3 Modeli za potrošnju energije.....	63
3.3.1 L-model	65
3.3.2 RFP-model.....	70
3.4 rARQ tehnika i modelovanje gubitka paketa	77

3.4.1	Opis tehnika automatske retransmisije	78
3.4.2	Gubitak paketa i očekivani broj pokušaja slanja paketa.....	81
3.4.3	rARQ primeri i poređenje sa klasičnim ARQ	84
3.5	Tehnike slanja paketa	88
3.5.1	MaxTP tehnika slanja paketa.....	88
3.5.2	1%TP tehnika slanja paketa.....	88
3.5.3	OptTP tehnika slanja paketa	89
3.5.4	OptTPPL tehnika slanja paketa	89
3.5.5	120AFR tehnika slanja paketa	90
3.6	Pareto pristup višeciljnoj optimizaciji.....	92
3.6.1	Pareto optimalnost	92
3.6.2	Metodi za rešavanje problema Pareto optimalnosti.....	93
3.6.3	PEC metod.....	94
4.	Definicija E2-pouzdanost problema, rešenje i rezultati	96
4.1	Potpuna definicija problema.....	96
4.1.1	Prostor odlučivanja	96
4.1.2	Prostor ciljeva	99
4.1.3	Definicija problema za odgovarajuće tehnike transmisije.....	99
4.2	Energetska efikasnost pod uslovom potpune pouzdanosti.....	101
4.3	Odnos energetske efikasnosti i pouzdanosti	107
4.3.1	Odnos energetske efikasnosti i pouzdanosti za fiksnu bitsku brzinu	107
4.3.2	Odnos energetske efikasnosti i pouzdanosti.....	115
5.	Zaključak	120
5.1	Dalji pravci istraživanja	122
	Literatura.....	124

APSTRAKT

Cilj ove disertacije je kvantitativno određivanje odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti u bežičnim senzorskim mrežama na fizičkom (PHY) sloju i sloju kontrole pristupa medijumu, kao i pronalaženje optimalnih vrednosti ovog odnosa u smislu višeciljne optimizacije sa Pareto pristupom, bez preferenci. Pokazalo se da prostor odlučivanja ima veliki broj dimenzija koje oslikavaju prva dva komunikaciona sloja, dok prostor ciljeva može da se definiše na različite načine, u zavisnosti od izabranh metrika za energetske efikasnost i pouzdanost.

Zbog kompleksnosti problema, prostor odlučivanja se svodi na projekciju četiri dimenzije, koje na ciljeve utiču konkurentno: bitska brzina, dužina paketa, maksimalan broj pokušaja slanja paketa i predajna snaga, dok su ostale dimenzije postavljene na optimalne vrednosti. Prostor ciljeva je definisan preko metrika ukupne energije po bitu korisnih podataka (za energetske efikasnost) i procenta uspešno prenetih paketa (za pouzdanost).

Rezultati analize energetske efikasnosti, pod uslovom potpune pouzdanosti, pokazuju da može da se postigne čak 20-50% bolja energetska efikasnost ako se adaptivne tehnike na oba sloja združe u odnosu na adaptivne tehnike na PHY sloju. Sve adaptivne tehnike pokazuju znatno poboljšanje energetske efikasnosti u odnosu na uobičajenu praksu slanja kratkih paketa maksimalnom raspoloživom snagom.

Analiza odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti, kada se odnos podešava dužinom paketa, predajnom snagom i brojem pokušaja, pokazuje da odnos može da se podešava ali da Pareto front nije kontinualan. Ova činjenica je suprotna intuiciji, a odgovor leži u razlici prostora gde su energetska efikasnost i pouzdanost definisani kao kontinualne veličine i prostora ciljeva definisanog kao skup tačaka dostižnih iz prostora odlučivanja.

Pokazuje se da se modifikacijom celobrojne dimenzije prostora odlučivanja – maksimalan broj pokušaja slanja paketa, u realnu dimenziju – srednja vrednost maksimalnog broja pokušaja slanja paketa, povećava rezolucija oba prostora, a intervali diskontinuiteta Pareto fronta mogu da se svedu na prihvatljive, sa praktične tačke gledišta.

Analiza odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti kada prostor odlučivanja ima sve četiri dimenzije pokazuje da je sa povećanjem broja dimenzija u prostoru odlučivanja moguće postići bolje Pareto optimalne vrednosti ciljeva.

Za potrebe disertacije, razvijeni su originalni RFP-model zavisnosti ukupne snage predajnika

od predajne snage i rARQ-model, pomoću kojeg je, koristeći ergodičnu prirodu procesa slanja paketa, moguće transformisati celobrojnu dimenzije prostora odlučivanja – maksimalan broj pokušaja slanja paketa, u realnu dimanziju – srednja vrednost maksimalnog broja pokušaja slanja paketa.

ABSTRACT

The goal of this dissertation is to quantify energy-efficiency and reliability trade-off in wireless sensor networks at physical and medium access control layers as well as to find the trade-off optimal solutions in the sense of multi-objective Pareto optimality, without preferences. It is shown that decision space consists of a number of dimensions, which correspond to the first two communications layers, while objective space definition depends on chosen metrics for energy-efficiency and reliability.

Due to multi-objective problem complexity, decision space is reduced to its 4-dimension projection, 4 dimensions that affect concurrent change of the objectives: data rate, packet length, maximal number of packet transmission trials, and transmission power, while the other dimensions are fixed to the optimal values. The objective space is defined by two metrics: total energy per bit of useful data for energy efficiency, and per cent of successfully received packets for reliability.

Results of energy-efficiency analysis, under the constraint of full reliability, show that energy-efficiency can be improved even for 20-50% when joint adaptive techniques, encompassing both levels, are performed compared to physical layer adaptive techniques performed severally. All adaptive techniques improve energy-efficiency significantly compared to current practice transmission in wireless sensor networks, transmission of short packets with maximal available transmission power.

Energy-efficiency and reliability trade-off analysis, when the trade-off is tuned by packet length, transmission power and the number of trials, show that the trade-off is tuneable but contrary to intuition, Pareto front is not a continual locus. This fact becomes obvious if we have in mind the difference between the objective space defined as the set consisting of all points reachable from the decision space, which is not continual, and the objective space consisting of all (energy, reliability) pairs that are continual.

It is shown that by modifying positive integer decision variable – the maximal number of packet transmission trials - to non-negative real variable – the expected value of the maximal number of packet transmission trials – resolution of both spaces: decision and objective, are improved, while Pareto front discontinuity intervals are reduced to the level that is acceptable from the practical point of view.

Energy-efficiency and reliability trade-off analysis when all four decision dimensions are involved, show that Pareto optimal solutions are improving with the number of decision variables.

Original RFP-model and rARQ-model are developed to enable analysis in this dissertation. RFP-model stands for total transmitter consumption dependence on transmission power, while rARQ-model employs ergodicity of packet transmission process to modify positive integer decision variable - the maximal number of packet transmission trials - to non-negative real decision variable – the expected value of the maximal number of packet transmission trials.

1. UVOD

Bežične senzorske mreže (BSM) se tokom poslednjih petnaestak godina intenzivno razvijaju, pokušavajući da reše fundamentalne probleme, prvenstveno iz oblasti senzorskih pretvarača, distribuiranih računarskih sistema i posebno bežičnih komunikacija. S obzirom na to da su BSM zamišljene tako da se sastoje od baterijski napajanih čvorova koji se ne održavaju u toku životnog veka mreže, logično je da se kao primarni problem namentuo problem energetske efikasnosti. U nastojanju da zadovolje uslov životnog veka mreže, koji je u direktnoj zavisnosti od potrošnje energije, israživači su često dolazili u situaciju da potrebnu energetska efikasnost plaćaju gubitkom performansi kvaliteta servisa ispod minimalne funkcionalnosti mreže, odnosno, ulazili su u oblast oko nulnih performansi kvaliteta servisa za nultu energiju. Da bi se ovaj problem izbegao, potrebno je da se energetska efikasnost i željene performanse kvaliteta servisa razmatraju istovremeno, kako bi se pronašla ona rešenja kod kojih se minimalnom mogućom energijom postižu zadovoljavajuće performanse kvaliteta servisa.

Sa druge strane, analize ključnih izazova u BSM [49] pokazuju da je nedovoljna pouzdanost glavna osobina BSM koja koči širu komercijalizaciju njihove primene u raznim oblastima. Pouzdanost u BSM podrazumeva verovatnoću da će BSM da isporuči podatak o posmatranom fenomenu krajnjem korisniku. Pouzdanost ima nekoliko komponenata: verovatnoću da će senzor da detektuje fenomen, verovatnoću da će fenomen da bude u dometu BSM čvorova, verovatnoću da će podaci o detektovanom fenomenu da budu preneti preko bežičnih linkova do odredišta, itd. Kako je kao glavni potrošač energije kod BSM čvorova izdvojen radio-primopredajnik koji čak za 2 reda veličine više energije troši od ostalih delova BSM čvora, najviše energije za obezbeđenje pouzdanosti se troši za bežični prenos podataka. Problem pouzdanog prenosa u osnovi uvek ima pouzdanost na sloju linka pa je odnos energije potrošene da bi se ostvarila neka pouzdanost u prenosu na sloju linka i te pouzdanosti glavni problem odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti u BSM.

Zbog nedostatka detaljne analize odnosa energetske efikasnosti i performansi kvaliteta servisa u BSM, naročito pouzdanosti, u ovoj disertaciji se pokušao širi pristup, koji kao krajnji cilj ima kvantifikaciju odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti na sloju podataka (linka) i pronalazjenja onih rešenja od kojih ne postoje druga, bolja rešenja, koja istovremeno daju i bolju energetska efikasnost i pouzdanost.

Generalno, postoje dva pristupa istovremenom razmatranju više ciljeva. Prvi je da se izabere jedan cilj koji će biti optimizovan, a ostali se postavljaju kao ograničenja. Drugi pristup je da se traže rešenja gde su svi ciljevi optimalni pri čemu se optimalnost definiše konceptom višeciljne optimizacije. U ovoj disertaciji je odabran Pareto pristup višeciljnoj optimizaciji za optimizaciju odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti, pomoću promenljivih koje je moguće podesiti na fizičkom sloju i/ili sloju kontrole pristupa medijumu.

Pareto pristup višeciljnoj optimizaciji inženjerskih problema može da se posmatra sa dva aspekta. Prvi aspekt je matematički, u kojem su kriterijumi selekcije optimalnih ciljeva jasno definisani [85]. Sa matematičke tačke gledišta, a posebno u današnje vreme kada je pomoću računara moguće uraditi opsežna izračunavanja i pretrživanja, ukoliko su jasno definisani prostor odlučivanja, prostor ciljeva i funkcije preslikavanja, mogu da se odrede Pareto optimalna rešenja ili barem da se približno odrede. Drugi aspekt je inženjerski, a glavni problem aspekta se sastoji u matematički jasnom definisanju prostora ciljeva, prostora odlučivanja i funkcija preslikavanja, pri čemu: prostor odlučivanja odslikava raspoložive resurse; prostor ciljeva odslikava željene performanse; a funkcije preslikavanja odslikavaju tehnike kojima se upravlja upotrebom resursa. Kada su prostori i funkcije definisani, matematičkim aparatom se dolazi do Pareto optimalnih rešenja i analizom rešenja je moguće donosti odluke o modifikaciji bilo prostora, bilo funkcija u cilju postizanja boljih Pareto optimalnih rešenja.

Prostor odlučivanja može da se sastoji od dimenzija po kojima se ciljevi menjaju konkurentno i/ili dimenzija po kojima se ciljevi istovremeno ili poboljšavaju ili pogoršavaju. Sa stanovišta Pareto optimizacije, za pronalaženje Pareto optimalnih tačaka, bitne su samo one dimenzije po kojima se ciljevi menjaju konkurentno. Dimenzije po kojima se ciljevi istovremeno pomeraju na istu stranu utiču na volumen prostora ciljeva ali samo pomoću njih, ne može da se dođe do Pareto optimalnih tačaka. Pristup u ovoj disertaciji je da se najpre odredi kompletan prostor odlučivanja sa svim dimenzijama na fizičkom sloju (PHY) i sloju kontrole pristupa medijumu (eng. *Medium Access Control* – MAC), a da se onda, u cilju smanjenja kompleksnosti problema, za optimizaciju izvrši projekcija prostora odlučivanja samo na one dimenzije prostora po kojima se ciljevi menjaju konkurentno, dok se ostale dimenzije fiksiraju na neke vrednosti. U tom smislu, prostor odlučivanja je sveden na 4 dimenzije: bitska brzina, dužina paketa, maksimalan broj pokušaja slanja paketa i predajna snaga.

Kako su energetska efikasnost i pouzdanost kvalitativni pojmovi, za definisanje prostora

ciljeva, potrebno je da se odrede odgovarajuće metrike pomoću kojih je moguće kvantifikovati ova dva cilja. Kako za oba cilja postoji više metrika, u ovoj disertaciji su odabrane ukupna očekivana energija po bitu korisnih podataka (po bitu podataka za koje viši sloj traži od MAC i PHY slojeva servis), za energetske efikasnost i vjerovatnoća uspešnog prenosa paketa (1-vjerovatnoća gubitka paketa), za pouzdanost jer u najvećoj meri odlikavaju energetske efikasnost, odnosno, pouzdanosti na ova dva sloja.

Da bi se ispratila evolucija BSM, analiza odnosa ciljeva polazi od energetske efikasnosti pod uslovom potpune pouzdanosti, a zatim je uvedena relaksacija pouzdanosti pa je problem odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti razmotren za sve vrednosti pouzdanosti. Najpre je razmotren slučaj da informacijom o slabljenju kanala raspolaže samo predajnik, pri čemu je moguće prilagoditi samo one promenjive koje nije potrebno podesiti na prijemnoj strani. Zatim je razmotren slučaj da i prijemnik raspolaže informacijom o slabljenju kanala.

Zbog prirode bežičnog kanala da se slabljenje kanala menja vremenski i prostorno, najpre je razmotren AWGN kanal, osnovni teorijski model bežičnog kanala, a zatim i realističan model kanala sa blok Rayleigh fadingom bez frekvencijske selekcije.

Za određivanje funkcija preslikavanja potrebno je da se definišu tehnike kojima se upravlja resursima, kao i matematički modeli tih tehnika. Zbog nedostatka dovoljno preciznog modela zavisnosti ukupne snage koju troši predajnik od izlazne snage predajnika, razvijeni su L-model i šire primenjiv RFP-model. Za razliku od prethodnih modela, koji istovremeno razmatraju zavisnost ukupne snage predajnika od snage predate anteni i prostornu komponentu slabljenja kanala, L-model uvodi slabljenje kanala u celosti, uračunavajući i vremensku komponentu slabljenja, dok RFP-model ide korak dalje i razdvaja model zavisnosti ukupne snage predajnika od snage predate anteni od modela za slabljenje kanala.

Da bi se videlo koliko je transmisija u savremenoj praksi energetske efikasna i koliko pouzdanost obezbeđuje, kao i kolika dobit po ova dva cilja može da se ostvari uvođenjem adaptivnih tehnika, analizirano je i upoređeno nekoliko tehnika transmisije. Tehnike polaze od transmisije kratkih paketa maksimalnom raspoloživom snagom što je savremena praksa, a zatim se uvode jedna po jedna adaptivne tehnike: 1%TP – tehnika slanja kratkih paketa tako da vjerovatnoća greške paketa bude 1%; OptTP – tehnika slanja kratkih paketa optimalnom snagom tako da se ostvari minimalna energija po bitu; OptTPPL – tehnika slanja paketa optimalne dužine optimalnom snagom tako da energija po bitu bude minimalna; 120AFR – tehnika slanja

agregiranih paketa, optimalne dužine, optimalnom snagom tako da energija po bitu bude minimalna. Prethodne tehnike su razmatrane za slučaj evaluacije energetske efikasnosti pod uslovom potpune pouzdanosti.

Da bi pouzdanost mogla da bude manja od potpune, svakako je potrebno uvesti kontrolu maksimalnog broja pokušaja slanja paketa. Uvođenjem adaptivne tehnike automatske retransmisije paketa omogućena je analiza energetske efikasnosti i pouzdanosti.

Da bi se rešio problem niske rezolucije u prostoru odlučivanja, koji se javlja zbog celobrojne dimenzije prostora - maksimalan broj pokušaja slanja paketa, uvedena je modifikacija prostora odlučivanja tako što se umesto ove dimenzije koristi njena očekivana vrednost, pri čemu je razvijena originalna tehnika automatskih retransmisija, kojom očekivana vrednost maksimalnog broja pokušaja slanja paketa može da se podesi na bilo koju nenegativnu realnu vrednost.

Analizom odnosa ciljeva kada informacijom o slabljenju kanala raspolažu i predajnik (eng. *transmitter* - TX) i prijemnik (eng. *receiver* - RX), adaptacijom sve četiri promenjive u prostoru odlučivanja, završava se ispitivanje odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti u ovoj disertaciji.

Za sve analize odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti, najpre je razvijen teorijski model, koji je zatim konkretizovan na primeru upotrebe CC1000 radio uređaja male snage, namenjenog za komunikaciju u BSM.

Disertacija je organizovana u 5 poglavlja.

U drugom poglavlju su razmotreni svi aspekti bežičnih senzorskih mreža, koji su bitni za razumevanje problema odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti. U potpoglavljju 2.1.1 izložena je vremenska perspektiva razvoja senzorskih mreža sa posebnim akcentom na drugu generaciju, kada one postaju i bežične. Dat je i kratak pregled savremene komunikacione tehnologije, koja se koristi u BSM, radi lakšeg sagledavanja mogućnosti primene adaptivnih tehnika transmisije na konkretnim BSM čvorovima. U potpoglavljju 2.1.2 razmotreno je stanje standardizacije u BSM oblasti, sa posebnim osvrtom na komunikacione standarde. U potpoglavljju 2.1.3 dat je pregled važnijih primena BSM dok su u potpoglavljju 2.1.4 obrazloženi energetska efikasnost i kvalitet servisa kao osnovni problemi, koji se javljaju u dizajnu BSM.

U potpoglavljju 2.2 razmotreni su svi parametri (zadate veličine) i sve promenjive na PHY i MAC slojevima, koji utiču na energetska efikasnost, kao i načini uticaja. Dat je pregled postojećih tehnika, koje eksploatišu promenljivost parametara i/ili mogućnost podešavanja

promenljivih veličina za poboljšanje energetske efikasnosti. Isto je urađeno i za pouzdanost u potpoglavlju 2.3, a zatim je u potpoglavlju 2.4 napravljen uporedan tabelaran prikaz uticaja svih parametara i promenljivih na ova dva cilja, sa namerom da se detektuju oni parametri i promenjive na PHY i MAC slojevima čijom se promenom ciljevi menjaju konkurentno. Konačno, problem odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti je definisan kao problem višeciljne optimizacije i data je opšta matematička formulacija problema.

U trećem poglavlju su analizirani svi aspekti bitni za modelovanje sistema transmisije i matematički alati za rešavanje problema: metrike, modeli, tehnike transmisije i matematički aparat za Pareto optimizaciju nelinearnih i nekonveksnih problema.

U potpoglavlju 3.1 razmotrene su metrike za energetske efikasnosti na PHY i MAC slojevima. Metrike su definisane na jedan od dva načina: prvi način definiše odnos efektivne izlazne energije i ukupne energije koja ulazi u sistem; drugi način definiše kolika je ukupna postignuta performansa po jedinici uložene energije. Izložene su metrike za energetske efikasnosti na nivou komponenti i na nivou mreže.

U potpoglavlju 3.2, metrike za pouzdanost na PHY i MAC slojevima razvrstane su u zavisnosti od toga da li proces transmisije ispunjava uslove ergodičnosti ili ne. Ukoliko je proces ergodičan pouzdanost može da se modeluje očekivanom vrednošću slučajne promenjive. U suprotnom, ukoliko proces nije ergodičan, pouzdanost se izražava verovatnoćom da će slučajna promenjiva da uzme vrednost van definisanih granica.

Modeli ukupne snage koju troši predajnik da bi na prijemu postigao određeni nivo signala: L-model i šire primenljiv RFP-model, detaljno su izloženi u potpoglavlju 3.3

U potpoglavlju 3.4 detaljno su izložene i modelovane klasična ARQ tehnika i rARQ okvir za tehnike kod kojih je moguće podesiti očekivanu vrednost maksimalnog broja pokušaja slanja paketa na bilo koju nenegativnu realnu vrednost. Dato je i poređenje očekivanog broja retransmisija i gubitka paketa za dve konkretne rARQ realizacije sa klasičnom ARQ tehnikom.

U potpoglavlju 3.5 su definisane MaxTP, 1%TP, OptTP, OptTPPL i 120AFR tehnike transmisije.

U potpoglavlju 3.6 rekapituliran je PEC metod za Pareto optimizaciju, koji je primenljiv na nelinearne i nekonveksne probleme višeciljne optimizacije.

U četvrtom poglavlju je konkretizovan problem optimizacije odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti pri čemu je komunikacioni sistem baziran na CC1000 radio uređaju.

U potpoglavlju 4.1 su date definicije prostora odlučivanja, prostora ciljeva i funkcija preslikavanja iz prostora odlučivanja u prostor ciljeva za različite tehnike transmisije.

U potpoglavlju 4.2 prikazano je poredjenje energetske efikasnosti za različite tehnike transmisije pod uslovom potpune pouzdanosti.

U potpoglavlju 4.3 je analiziran odnos energetske efikasnosti i pouzdanosti za slučajeve da informacijom o slabljenju kanala raspolaže samo predajnik i za slučaj da informacijom o slabljenju kanala raspolažu i predajnik i prijemnik. U slučaju kada informacijom o slabljenju kanala raspolaže samo predajnik, prikazana je dobit od modifikacije prostora odlučivanja iz prostora manje rezolucije u prostor veće rezolucije, transformacijom celobrojne dimenzije prostora - maksimalan broj pokušaja slanja paketa, u njenu očekivanu vrednost, koja upotrebom rARQ tehnike može da se podesi na bilo koju nenegativnu realnu vrednost.

U poglavlju 5 su izloženi zaključci disertacije i naznačeni su pravci daljeg istraživanja.

2. PREGLED STANJA

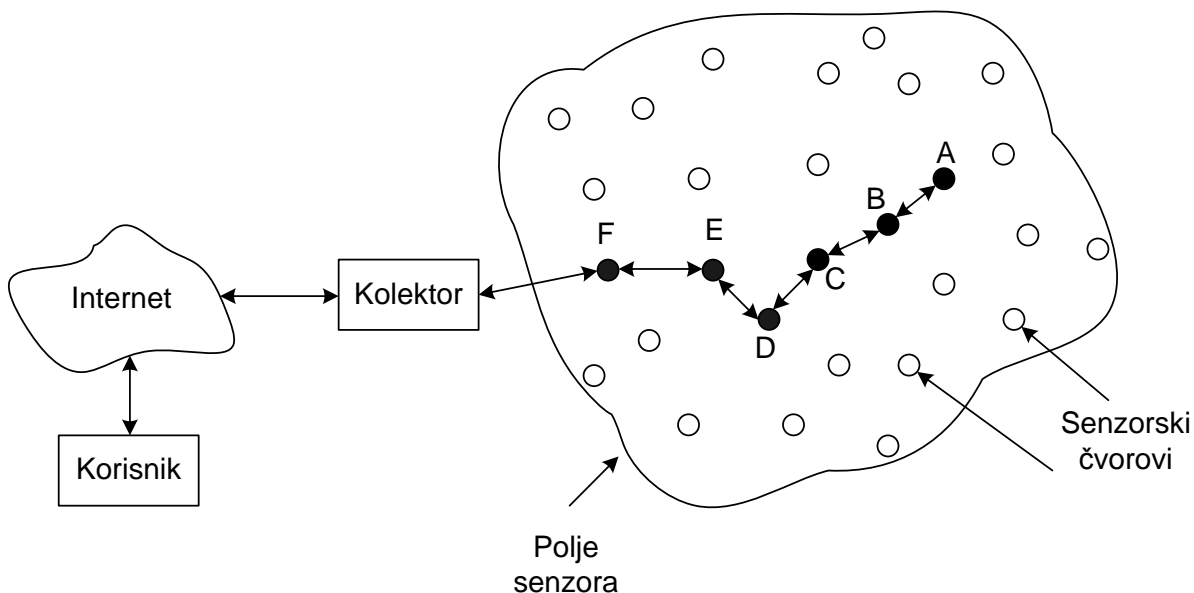
2.1. Bežične senzorske mreže

Krajem devedesetih godina dvadesetog veka, kada su radio-primopredajnici (RPP), mikrokontroleri i jednostavniji senzori postali dovoljno jeftini, javila se ideja o pravljenju bežičnih senzorskih uređaja, koji će moći da se umreže i prikupljaju podatke o raznim fenomenima [1-3, 89]. Početna očekivanja su bila da bi takvi uređaji mogli da koštaju ispod 1\$ po komadu, kada su u pitanju velike količine, i da bi bežične senzorske mreže (BSM), koje bi se formirale od takvih uređaja, mogle da imaju i više hiljada čvorova. Ekonomska predviđanja su pokazivala da će BSM tehnologija da bude jedan od glavnih poslova u 21. veku [4], a da bi u budućnosti mogao da bude formiran tzv. "Senzorski omotač" Zemlje i da bi podaci prikupljeni na ovaj način mogli da promene čovekovu percepciju. Istraživanje i razvoj BSM sistema traje već dvadesetak godina [88] i može se identifikovati pod nekoliko različitih naziva [114].

BSM, kako ih danas posmatramo, su logičan nastavak procesa umrežavanja senzora. U [3] je prikazana 30-godišnja istorijska perspektiva umrežavanja senzora i data je projekcija očekivanja razvoja u BSM oblasti u budućnosti. Autori definišu 3 generacije BSM uređaja. Prva generacija obuhvata robusne senzorske sisteme koji imaju neprekidno i neograničeno napajanje, npr. osmatrački radar. Drugu generaciju čine senzorske platforme kakve se danas projektuju, baterijski su napajane ili iz nekog ograničenog obnovljivog izvora i veličine su ne veće od kutije šibica. Senzorske platforme treće generacije bi bile veličine zrna peska i napajane iz obnovljivih izvora napajanja. U prvoj generaciji ne postoje ograničenja za tehnologiju umrežavanja. Dozvoljeno je da čvorovi budu umreženi i žično. Kod druge generacije postoji potreba da čvorovi budu umreženi bežično radi lakšeg postavljanja mreže. Zbog energetske ograničenja, a da bi čvorovi mogli međusobno da komuniciraju, predviđena rastojanja između čvorova spadaju u domen kratkih (do nekoliko stotina metara). Kod treće generacije očekivana rastojanja spadaju u domen ultra kratkih (nekoliko centimetara). Na pojavu druge generacije senzorskih platformi, pored jeftinih radio-primopredajnika, mikrokontrolera i senzora, presudan uticaj je imao i razvoj energetske efikasne tehnika umrežavanja [3, 90]. U nastavku teksta, pod BSM se podrazumeva mreža formirana od senzorskih čvorova druge generacije.

2.1.1 BSM druge generacije

Opšta BSM je prikazana na slici 1. Mreža je sastavljena od senzorskih čvorova, koji prikupljene podatke šalju do kolektora podataka, u opštem slučaju u više skokova. Kolektor obezbeđuje pristup globalnoj mreži i na taj način se pozicija korisnika ograničava jedino mogućnošću pristupa Internetu. Glavni tok podataka je od senzora prema korisniku mada može da bude i obrnuto, kada korisnik zadaje upite senzorskoj mreži ili kada se vrši reprogramiranje čvorova. BSM topologija zavisi od same primene i može da bude ravna (eng. *flat*) ili strukturirana. Životni vek BSM grubo može da se podeli u dve faze. Prva faza podrazumeva postavljanje senzorskih čvorova i uspostavljanje mreže, a drugu fazu čini održavanje mreže i prenos podataka. Postavljanje čvorova može da bude strogo kontrolisano, kada je svakom čvoru tačno određena pozicija, ili nasumično, recimo, kada se čvorovi izbacuju iz aviona pa sami zauzimaju neke pozicije. Kako je za svaku razmenjenu poruku između čvorova mreže potrebna neka količina energije, broj razmenjenih poruka u fazi uspostavljanja i fazi održavanja direktno utiče na životni vek mreže i poželjno je da bude što manji.

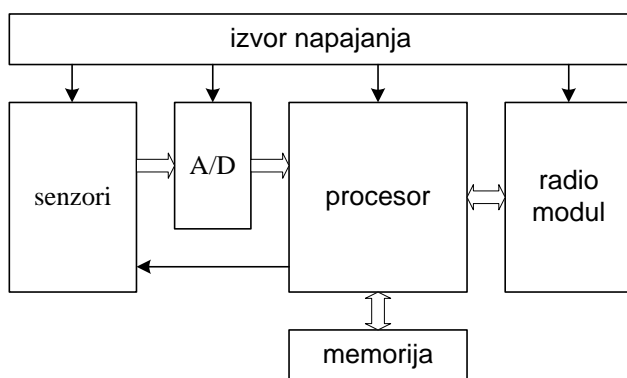


Slika 1. Opšti prikaz bežične senzorske mreže

Sa komercijalnog aspekta, BSM platforme mogu da se podele u dve grupe. Prvu grupu činile bi sve platforme koje su definisane spram specifične primene i prave se da zadovolje samo zahteve te primene. Za drugu grupu ideja je da se napravi platforma koja može da nosi različite senzore, u zavisnosti od primene, i da obezbeđuje obradu i prenos podataka, odnosno, neka vrsta

univerzalne platforme, nezavisne od same primene. Ova ideja je vremenom evoluirala tako da je univerzalna senzorska platforma dobila opšte prihvaćenu formu prikazanu na slici 2.

Izvor napajanja je obično kombinacija AA baterije, kondenzatora i solarnih ćelija ili nekih drugih ćelija koje mogu da prikupljaju energiju iz okoline. Procesor, A/D konvertor i memoriju moguće je integrisati na jednom čipu, a radio modul se realizuje ili kao zaseban modul ili zajedno sa procesorom, A/D konvertorom i memorijom u monolitnom čipu [119]. Prethodne komponente se realizuju kao fiksni deo platforme, a senzori se povezuju preko interfejsa za proširenje. Na ovaj način je omogućeno istovremeno povezivanje više različitih senzora na istu platformu ili povezivanje različitih senzora na različite platforme iste vrste.



Slika 2. Univerzalna senzorska platforma

Još jedna podela senzorskih čvorova je na skalarnu, senzori koji generišu samo jedan tip podataka (npr. senzor temperature) i složeni senzori, koji generišu podatke iz predefinisane skupa podataka (npr. multimedijalni senzori).

Sumarni pregled BSM platformi i njihovih karakteristika dat je u tabeli 1.

Tabela 1. Platforme za BSM, [86]

Platforma	Proizvođač	Procesor	Memorija	Radio primo-predajnik	Domet (m)	senzori	Cena (EUR)
<i>eyesIFXv2</i>	<i>Infineon</i>	TI MSP430, 8 MHz	10kB RAM 48kB ROM 4MB <i>Flash</i>	<i>Infineon</i> TDA5250 869 MHz 1 – 64 kbps	600	svetlost temperatura	/
<i>Intel Mote 2</i> (projekat)	<i>Intel</i>	<i>Intel</i> PXA271	256kB SRAM 32MB SDRAM 32MB <i>Flash</i>	<i>Chipcon</i> CC2420, 2.4GHz, 250 kbps IEEE 802.15.4	~ 100	multimedija	/
<i>MICA2</i>	<i>Crossbow</i>	<i>Atmel</i> ATmega128L 8 MHz	128kB RAM 4kB EEPROM 512kB <i>Flash</i>	<i>Chipcon</i> CC1000, 869 MHz 0.6 – 76.8 kbps	300	<i>Crossbow</i> MTS, MDA	150
<i>MICAz</i>	<i>Crossbow</i>	TI MSP430, 8 MHz	10kB RAM 48kB ROM 1MB <i>Flash</i>	<i>Chipcon</i> CC2420, 2.4GHz, 250 kbps IEEE 802.15.4	80	<i>Crossbow</i> MTS, MDA	150

<i>Cricket</i> (razvojna platforma)	<i>Crossbow</i>	<i>Atmel</i> ATmega128L 8 MHz	10kB RAM 48kB ROM 4MB <i>Flash</i>	<i>Chipcon</i> CC1000, 869 MHz 0.6 – 76.8 kbps	300	<i>Crossbow</i> MTS, MDA, ultrazvučni	200
<i>TELOSB</i> (razvojna platforma)	<i>Crossbow</i>	TI MSP430, 8 MHz	10kB RAM 48kB ROM 1MB <i>Flash</i>	<i>Chipcon</i> CC2420, 2.4GHz, 250 kbps IEEE 802.15.4	80	<i>Crossbow</i> MTS, MDA	120
<i>TinyNode</i>	<i>Shockfish</i>	TI MSP430, 8 MHz	10kB RAM 48kB ROM 512kB <i>Flash</i>	<i>Xemics</i> XE1205, 869 MHz 1.2 – 152.3 kbps	2000	svetlost temperatura vlažnost	200
<i>BTnode3</i>	<i>Art of Technology</i>	<i>Atmel</i> ATmega128L 8 MHz	64+180kB RAM 128kB <i>Flash</i> 4kB EPROM	1. <i>Chipcon</i> CC1000, 433-915 MHz, 76.8 kbps 2. <i>Zeevo</i> ZV4002 Bluetooth, 723.2 kbps	1. ~ 200 2. ~x10	<i>TECO</i> <i>Particle</i> senzori	200
<i>Tmote Sky</i>	<i>Mote IV</i>	TI MSP430, 8 MHz	10kB RAM 48kB <i>Flash</i>	<i>Chipcon</i> CC2420, 2.4GHz, 250 kbps IEEE 802.15.4	~ 100	svetlost temperatura vlažnost	100
<i>Tmote Invent</i>	<i>Mote IV</i>	TI MSP430, 8 MHz	10kB RAM 48kB <i>Flash</i>	<i>Chipcon</i> CC2420, 2.4GHz, 250 kbps IEEE 802.15.4	~ 100	svetlost temperatura kretanje zvuk	/

Pošto se pokazalo da još uvek nije moguće realizovati BSM sa velikim brojem čvorova, koje će da imaju zadovoljavajuće dug životni vek, prvenstveno zbog ograničenog napajanja, pojavila se ideja da kao senzorske platforme budu upotrebljene postojeće platforme sa dovoljnom količinom energije, a ima ih u velikom broju. Prirodan izbor su mobilni telefoni [6, 137] i motorna vozila [144].

Postoje dva trenda u dizajnu BSM sa aspekta RPP-a. Prvi trend je da se koriste RPP-i koji su napravljeni po nekom od postojećih standarda. Na početku druge generacije senzora eksperimentisalo se sa RPP-ima pravljenim po IEEE 802.11 standardu za bežične lokalne mreže (WLAN) i Bluetooth standardu za personalne bežične mreže (WPAN). Zbog velikog broja nedostataka, kada su u pitanju BSM, od ovih RPP-a se vremenom odustalo. U novije vreme koriste se RPP-i pravljeni po IEEE 802.15.4 standardu za bežične personalne mreže male brzine i ZigBee standardu, koji je nadograđen na prethodnom. Prethodni standardi mogu da zadovolje potrebe komunikacije u BSM aplikacijama u manjoj ili većoj meri ali nikako u potpunosti. Iz tog razloga postoji i drugi trend, a to je da se koriste RPP-i pravljeni namenski za BSM.

BSM zahtevaju RPP-e sa karakteristikama koje se razlikuju od karakteristika RPP-a ostalih bežičnih mreža (npr. WLAN, WPAN). Za BSM nije odvojen poseban deo radio spektra tako da moraju da koriste neki od slobodnih delova. Iako istraživanja pokazuju da su tehnologije proširenog spektra (eng. *spread spectrum*) i veoma širokog spektra (eng. UWB – *ultra wide band*) pogodnije za upotrebu u BSM, tehnologije koje podrazumevaju uzan spektar (eng. *narrow*

band) se najčešće koriste [21, 119]. BSM rade u opsezima oko 315/433/868/915 MHz ili u opsegu 2400-2483,5 MHz. IEEE 802.15.4 standard definiše fizički sloj za rad u opsezima oko 868, 915 i 2450 MHz. U zavisnosti od komunikacionog sloja koji je u interesu razvoja ili istraživanja, postojeći RPP-i nude prenos na različitim nivoima tako da je moguće izabrati prenos na nivou bita, bajta ili paketa podataka.

Prenos podataka u BSM najčešće je moguće realizovati na relativno malim brzinama prenosa. Noviji RPP-i sve više nude mogućnost izbora brzine prenosa čak i promenu brzine prenosa u toku rada. Brzine se kreću od nekoliko stotina bita u sekundi do 1000 *kb/s*. IEEE 802.15.4 standard predviđa prenos podataka fiksnim brzinama od: 250 *kb/s* na 2450 MHz, 20 *kb/s* na 868 MHz i 40 *kb/s* na 915 MHz. Domet, kao i kod svih radio komunikacija, zavisi od predvidivih faktora kao što su snage predaje, osetljivost prijemnika i nepredvidivih faktora kao što su karakteristike medijuma. Domet se najčešće definiše za zatvoreni i za otvoreni prostor. Iako rastojanje između senzora nije unapred definisano, BSM obično rade u personalnom domenu, odnosno, nekoliko desetina metara. Neki RPP-i pružaju mogućnost komunikacije i na znatno većim rastojanjima.

Potrošnja energije u procesima predaje i prijema podataka ima najveći udeo u ukupnoj potrošnji celokupne senzorske platforme tako da su parametri vezani za ova dva procesa uvek precizno navedeni. RPP može da se nađe u režimima predaje, prijema, *standby*-a i režimu spavanja (eng. *sleep*). *Standby* je režim kada nema aktivnosti niti u predaji niti u prijemu, a RPP se nalazi u čekanju na neku od ove dve aktivnosti. Režim spavanja je kada je RPP isključen. Podaci koje treba prenositi u BSM su vremenski grupisani tako da RPP-i najvećim delom vremena mogu da budu u režimu spavanja. Energija koja se troši prilikom prijema podataka uporediva je sa energijom koja se troši za slanje podataka, a u nekim slučajevima je i veća. Poželjno je da RPP provodi što manje vremena u stanju spremnosti bilo za slanje bilo za prijem podataka. Kada će RPP i koliko da bude u nekom stanju određuje protokol za pristup medijumu. Snaga predaje kod nekih RPP-a može da se podešava tako da se ostvari što manja potrošnja. Sa stanovišta potrošnje energije bitna je i energija koja se troši na pokretanje pojedinih delova RPP-a. Od dužine trajanja neaktivnog stanja RPP-a zavisi da li će on to vreme provesti u *standby* ili *sleep* režimu. Za neke RPP-e proizvođači navode vremena potrebna za prelasku između dve stanja kao i za pokretanje pojedinih komponenata RPP-a, npr. oscilatora.

Pred fizički sloj u BSM postavljena su specifična ograničenja u odnosu na ostale bežične

sisteme. Ovde treba objediniti zahteve kao što su komunikacija na malom rastojanju, uzak spektralni opseg, veliki periodi neaktivnosti mreže u odnosu na aktivne periode i kao najveći izazov, ograničenja za srednju i vršnu snagu. U [119] je izložena problematika vezana za fizički sloj u BSM i dat je primer realizacije RPP-a u CMOS integrisanoj tehnologiji.

Na fizičkom sloju komunikacija se odvija na nivou simbola. Kako se simboli preslikavaju u bite određeno je vrstom modulacije. U BSM poruke koje se prenose najčešće nisu duže od nekoliko bajtova. Pri prenosu tako kratkih poruka bilo da se prenos odvija na nivou bita, bajtova ili paketa, simboli potrebni za preambulu i sinhronizaciju, koji prethode svakom poslatom nizu bita, čine značajan deo ukupno poslatih simbola. Koliko simbola je potrebno za preambulu, a koliko za sinhronizaciju određuje nekoliko parametara, npr. vrsta modulacije i karakteristike medijuma, koji određuju verovatnoću greške. Generalno, što je više simbola upotrebljeno za preambulu i sinhronizaciju, može da se ostvari pouzdaniji prenos niza bita. IEEE 802.15.4 standard definiše dužinu preambule od 4 okteta (4 x 8 bita).

Verovatnoća greške definiše se za jedinicu podataka u kojima se prenos odvija. Tako se kod prenosa bita koristi BER (eng. *Bit Error Rate*), odnosno PER (eng. *Packet Error Rate*) kod prenosa u paketima. BER se u bežičnom prenosu kreće od 10^{-6} , što se smatra izuzetno malom greškom do 10^{-3} i više. Orijentacione vrednosti za PER u bežičnom prenosu zavise od dužine predviđenih paketa. Na primer, vrednost PER od 1% za predviđenu dužinu paketa od 100 bita približno odgovara vrednosti BER od 10^{-4} . IEEE 802.15.4 standard definiše zahtevani PER manji od 1% za prosečnu dužinu niza bita od 20 okteta.

Zbog specifičnih zahteva u komunikaciji, koje je često teško ispuniti pridržavajući se stroge podele po nivoima, kod BSM se često koriste tehnike koje spajaju poslove rezervisane za različite mrežne slojeve (eng. *Cross Layer Design*). Najčešće se kombinuju fizički, link i mrežni OSI ekvivalentni slojevi. RPP-i osim emisije i prijema niza bita mogu da omoguće i neke dodatne mehanizme. Ovde ćemo dodatne mehanizme da podelimo u dve grupe. Prvu grupu čine mehanizmi koji omogućavaju lakšu realizaciju link i mrežnog sloja, a drugu grupu, mehanizmi koji omogućavaju kombinovanje mrežnih slojeva odnosno detekciju ili merenje nekih pojava vezanih za komunikaciju. RSSI (eng. *Received Signal Strength Indicator*) je indikator snage primljenog signala; CCA (eng. *Clear Channel Assessment*) služi za donošenje odluke da li je komunikacioni kanal slobodan ili neko vrši emisiju; LQI (eng. *Link Quality Indicator*) daje podatak o kvalitetu linka; PQI (eng. *Packet Quality Indicator*) i PQT (eng. *Packet Quality*

Threshold) daju podatak o kvalitetu primljenog paketa; CS (eng. *Carrier Sense*), CD (eng. *Carrier Detect*) i CSI (eng. *Carrier Sense Indicator*) su mehanizmi za detekciju nosioca signala; FEC (eng. *Forward Error Correction*) služi za detekciju i korekciju grešaka u primljenom nizu bita; CRC (eng. *Cyclic Redundancy Check*) je mehanizam za proveru ispravnosti primljenog niza bajtova; FC (eng. *Frame Checksum*) je kontrolna suma okvira podataka i služi za detektovanje ispravnosti prenetog okvira; FEI (eng. *Frequency Error Indicator*) se koristi za detektovanje greške u frekvenciji, Shock Burst (eng. *Nordic Semiconductor ASA Shock BurstTM*) je mehanizam u vlasništvu firme „*Nordic Semiconductor*“ za slanje niza bita bez pauzi; AFC (eng. *Automatic Frequency Control*) služi za automatsku kontrolu frekvencije; AGC (eng. *Automatic Gain Control*) je mehanizam za automatsku kontrolu pojačanja; FHSS (eng. *Frequency Hopping Spread Spectrum*) je mehanizam koji omogućuje tehniku skakanja po frekvencijama i prenos signala u proširenom spektru; MC (eng. *Multi Channel*) podrška za prenosa po više kanala; ED (eng. *Energy Detection*) služi za detekciju energije.

Uporedne karakteristike aktuelnih RPP-a prikazane su u tabeli 2 i tabeli 3. Izabrani RPP-i su podeljeni u dve grupe. Prvu grupu čine RPP-i koji rade na frekvencijama ispod 1 GHz i njihove karakteristike su prikazane u tabeli 2. Drugu grupu čine RPP-i koji rade na frekvencijama iznad 1 GHz i njihove karakteristike su prikazane u tabeli 3.

Tabela 2. RPP-i koji rade u slobodnim opsezima oko 315/433/868/915 MHz [87]

model	CC1000	CC1100	XE1205	nRF905
Godina proizvodnje	2004	2005	2006	2004
RF opseg [MHz]	433/868/915	315/433/868/915	433/868/915	433/868/915
Nivo prenosa	bit	paket	bit	bit
Domet [m]	300 na 4,8 kbps		1800 na 48 kbps	
Brzina prenosa [kbps]	0,6 - 76,8	1,2 - 500	1,2 - 152,3	50
Snaga predaje [dB]	- 20 - 5/10	-30 - 10	-3 - 15	-10 -10
Osetljivost prijemnika [dB]	- 110	- 110	- 120	- 100
Potrošnja predaja [mA]	5,3 – 26,7	12,3 – 30,7	33 – 62	9 - 30
Potrošnja prijem [mA]	8	15	14	12,5
Potrošnja "stand by" / "sleep" režim [µA]	105/0,2	160/0,4	850/0,2	12,5/2,5
Podržane modulacije	FSK/OOK	FSK/OOK/ MSK/GFSK	2 nivoska FSK	GFSK
Vreme pokretanja oscilatora [µs]	250	180	850	650
Dužina preambule [bit]	16 – 128	nx8 + 16/32; n = 4/8	32 – 56 (24 + 8 ÷32)	10 (200 µs)
BER ili PER	0,1 % (BER)	1% (PER)	0,1 % (BER)	0,1 % (BER)
Dodatni mehanizmi	RSSI	CCA, LQI, RSSI, PQT, CS, FEC, Interleaving	RSSI, FEI, prepoznavanje šablona	Shock burst, CD, CRC

Tabela 3. RPP-i koji rade u slobodom opsegu oko 2,4 GHz [87]

model	CC2400	CC2420	CC2500	nRF2401	AT86RF230	MRF24J40
Godina proizvodnje	2003	2003	2005	2004	2006	2006
RF opseg [MHz]	2400-2483,5	2400-2483,5	2400-2483,5	2400-2524	2400-2483,5	2400-2483,5
Nivo prenosa	paket	paket	paket	paket	paket	paket
Standard		ZigBee, IEEE 802.15.4			ZigBee, IEEE 802.15.4	ZigBee, IEEE 802.15.4, MiWi™
Domet [m]	personalni	personalni	personalni	personalni	personalni	personalni
Brzina prenosa [kbps]	10, 250, 1000	250	1,2 – 500 kbaud	0 - 1000	250	250
Snaga predaje [dB]	- 25 - 0	-25 - 0	-30 - 1	-20 -4	- 17 - 3	- 38,75 - 0
Osetljivost prijemnika [dB]	- 101	- 95	- 104	- 90	- 101	- 91
Potrošnja predaja [mA]	11 – 19	8,5 – 17,4	11,1 – 21,5	8,8 – 13	10 – 17	22
Potrošnja prijem [mA]	24	18,8	13,3 – 19,6	18 – 25	16	18
Potrošnja “stand by” / “sleep” režim [μA]	1200/1,5	426/20	1500/0,4	12/0,4	1700/0,1	/2
Podržane modulacije	FSK/GFSK	O-QPSK	OOK/2-FSK /GFSK/MSK	GFSK	O-QPSK	O-QPSK
Vreme pokretanja oscilatora [μs] Sleep/Standby	1130/100	1000/192	150/85	3000/200	1000/180	2000/
Dužina preambule [bit]	32 preambula + 32 sync	32	16 - 192 B preambula + 32 sync	8	32	32
BER ili PER	0,1 % (BER)	1% (PER)	1 % (PER)	0,1 % (BER)	1% (PER)	1% (PER)
Dodatni mehanizmi	RSSI, LQI, AFC, AGC, 32 B FIFO bafer, CRC, FHSS i MC	Paket podrška, RSSI, LQI, AGC, CCA, 128 B TX i RX FIFO baferi, FHSS i MC	AFC, CRC, RSSI, CSI, PQI, CCA, LQI, FEC, 64 B TX i RX FIFO baferi, PCB, FHSS i MC	Direktan mod, ShockBurst, DuoCeiver™	ED, RSSI, LQI, CCA, FCS, CRC, 128 B TX/RX bafer	RSSI, CCA, LQI, CRC, FCS, 144 B RX i 4x128 B TX FIFO baferi

2.1.2 Standardi

Iako postoji više standarda koji sa različitih aspekata definišu BSM još uvek postoji određena neusklađenost i trka za dominaciju. U [16] su razmotreni postojeći standardi koji definišu senzorske uređaje. Među ovim standardima se izdvaja IEEE 1451.5 [20] verzija standarda za umrežavanje pametnih pretvarača senzorskih signala.

Najbitniji standardi koji definišu komunikacione podsisteme su IEEE 802.15.4 [17], standard za komunikaciju malom snagom, malom brzinom u personalnom domenu. Ovaj standard definiše PHY i MAC slojeve radio-primordajnika. Na ovaj standarad se nadovezuje popularni ZigBee

standard [18], koji obezbeđuje ostale komponente komunikacionog steka da bi omogućio prilagođenje i potpunu integraciju senzorskih čvorova. Zamišljen kao verzija IP-v6¹ protokola prilagođena za umrežavanja malih uređaja, 6LoWPAN [19] standard definiše mrežni sloj komunikacije i lako se nadovezuje na IEEE 802.15.4, standard, ali ga je moguće koristiti i u kombinaciji sa drugim PHY i MAC protokolima.

2.1.3 Primene BSM

BSM su do sada pronašle široku primenu. Neki od radova u kojima mogu da se pronađu pregledi i mogućnosti primena su [92-94, 113]. BSM pronalaze primenu, generalno na dva polja. Prvo polje su nove primene, koje sa dosadašnjim tehnologijama nisu bile moguće, a drugo polje su postojeće primene, gde BSM mogu da obezbede jeftinije prikupljnje podataka uz bolji ili bar uporediv kvalitet podataka sa postojećim senzorskim sistemima. Ovde su nabrojane samo neke od važnijih primena da bi se stekao bolji uvid u širinu primenjivosti BSM tehnologije.

1. *Zdravstvo* - generalni problem prikupljanja podataka o fiziološkom stanju i ponašanju pacijenata da bi mogli da se izvrše dijagnoza, monitorisanje ili kontrola hroničnih bolesti može da se u dobroj meri reši upotrebom BSM tehnologije [103, 104, 109]. BSM takođe mogu da doprinesu pravovremenom delovanju zdravstvenog sistema u hitnim situacijama [91] kao i sve obimnijem prebacivanju aktivnosti savremene medicine u domen preventive, koji je jeftiniji. Takođe, BSM pronalaze sve veću primenu u pravilnom kondicioniranju ljudi spram njihovih potreba, bilo da su u pitanju sportisti, rekonvalescenti ili radnici sa posebnim zahtevima [95].
2. *Vojne primene* – su jedan od glavnih pokretača razvoja BSM. Primene BSM u vojne svrhe klasifikovane spram operacionih scenarija i tipova senzora predstavljen je u [96]. Takođe, razmotreni su i izazovi za buduće BSM primene u vojne svrhe.
3. *Građevinarstvo* - propadanje i održavanje građevinskih objekata je značajan problem širom sveta. Da bi smo obezbedili bezbedno i efikasno održavanje potrebni su nam podaci o dugoročnim performansama (statici) i kratkoročnim performansama (dinamici) građevinskih objekata [97, 98]. Slični problemi, koji mogu da se efikasno prevaziđu upotrebom BSM, javljaju se i kod održavanja složenih i skupih mehaničkih struktura kao što su vazduhoplovi i plovila [99].

¹ Internet protokol verzija 6

4. *Inteligentni transport* - BSM omogućavaju inteligentni transport zahvaljujući mogućnosti lakog i jeftinog postavljanja velikog broja senzorskih čvorova, koji mogu u realnom vremenu da monitorišu transport i obezbede dovoljno kvalitetne podatke za upravljanje transportom. U [100] je dat pregled BSM primena u inteligentnom transportu, uključujući monitorisanje slobodnih mesta na parking prostoru, monitorisanje drumskog saobraćaja i upravljanje drumskim saobraćajem.
5. *Precizna poljoprivreda* - jedna od tehnologija koje će da doprinesu dugoročnom cilju da se proizvodi dovoljno hrane za sve, svakako je BSM tehnologija [117]. Već postoje mnoge BSM primene koje prate čitave procese proizvodnje od sađenja kultura, monitorisanja njihovog rasta, prikupljanja, obrade, skladištenja i transporta. Mogućnosti i izazovi primene BSM u preciznoj poljoprivredi dati su u [101, 102].
6. *Energetika* - u proteklih nekoliko godina BSM su prepoznate kao obećavajuća tehnologija koja može da poboljša razne aspekte današnjih elektroenergetskih sistema, uključujući procese proizvodnje, distribucije i održavanja. BSM treba da omoguće novu generaciju elektroenergetskih sistema, tzv. pametnih mreža, u kojima su nabrojani procesi u velikoj meri distribuirani [105].
7. *Monitorisanje okoline* - je jedna od prvih primena BSM. Ovde spadaju monitorisanje životnog okruženja raznih bioloških vrsta; detektovanje opasnih hemijskih supstanci i bioloških agenasa; detektovanje pomeranje tla i predviđanje pojave, lokacije i karakteristika zemljotresa i pratećih efekata (npr. cunamija); monitorisanje i predviđanje aktivnosti vulkana; predviđanje i detekciju poplava i požara; prikupljanje podataka za vremensku prognozu itd [120].

S obzirom na to da BSM imaju dosta primena, može da se zaključi da dizajn svake konkretne BSM izuzetno zavisi od same primene.

2.1.4 Osnovni problemi u BSM dizajnu

Kako je predviđeno da se BSM čvorovi napajaju iz ograničenih izvora energije, glavni problem kod BSM je svakako obezbeđenje rada mreže u zadovoljavajuće dugom periodu. Da bi se postigao duži životni vek mreže, potrebno je ili da se obezbedi napajanje sa većim kapacitetom ili da se primenjuju energetske efikasne (E2) tehnike po svim aspektima bitnim za BSM ili da se ide na kombinaciju oba. Kako se najčešće pretpostavlja da su BSM čvorovi

baterijski napajani, brojni autori prijavljuju da je glavni problem kod BSM E2 i pokušavaju da doprinesu rešenju nekom od energetski efikasnih tehnika. Opšti pregled E2 tehnika dat je u [33]. Pregled E2 tehnika na sloju pristupa medijumu (eng. *Medium Access Control - MAC*) dat je u [7, 9] dok je pregled tehnika koje za cilj imaju da BSM čvorove postavljaju u stanja sa najmanjom potrošnjom snage dat u [8, 118]. Drugi pristup je da se obezbedi veća količina energije za funkcionisanje BSM čvorova. Pošto je teško povećati kapacitet baterija i ne očekuju se značajan tehnološki napredak na tom polju, sve više se ide na prikupljanje energije iz okoline. Iako su brojne tehnike prikupljanja energije moguće [23], još uvek ne mogu na dovoljno jeftin način da permanentno obezbede dovoljne količine za funkcionisanje BSM čvorova. Zato se često koristi kombinacija akumulatora sa nekom od tehnika prikupljanja energije [121]. Kako je masovnost senzora jedan od ciljeva BSM, niska cena BSM čvorova je, i svakako će da ostane, ultimativni cilj. Kombinacija niske cene i dugog životnog veka će da nameće E2 kao osnovni problem u BSM i slobodno možemo da konstatujemo da će se uvek težiti da BSM čvorovi rade konzumirajući što manje energije. Kao potvrda ovoj konstataciji je i posle skoro 2 decenije nesmanjena atraktivnost E2 problema u WSN istraživačkoj zajednici, što se može videti po broju publikovanih radova na ovu temu.

Kada sistemi rade u regionu blizu ograničenja koja nameću resursi, postavlja se pitanje kvaliteta servisa (eng. *Quality of Service - QoS*). Kod BSM taj resurs je energija. QoS problem je primećen još od samog početka razvoja BSM oblasti. Nekoliko radova je posvećeno definiciji kvaliteta servisa specifično za bežične senzorske mreže [10-13]. U [11] BSM QoS je generalno podeljen na QoS koji zavisi od same primene i QoS koji je u vezi sa komunikacijom u BSM dok je u [10] izložena detaljnija analiza QoS zahteva u BSM, razvrstanih po slojevima ISO referentnog komunikacionog modela. Medjutim, ovde je od interesa QoS na PHY i MAC slojevima, koji odgovaraju prvom i delu drugog sloja ISO modela, respektivno. Nadalje, pod QoS se podrazumeva kvalitet komunikacija na PHY i MAC slojevima. Kako se kod BSM radi o bežičnoj komunikaciji, glavni problemi za obezbeđenje kvaliteta servisa se javljaju zbog promenljivog slabljenje bežičnog kanala pa problem QoS u BSM može da se definiše kao problem QoS kod bežičnih komunikacija malom snagom ili kratkog dometa i malim brzinama. Generalno razmatranje obezbeđenja kvaliteta servisa kod bežičnih komunikacija dato je u [14, 15].

E2 i QoS su suprotni ciljevi tako da je kod BSM veliki problem kako dizajnirati mrežnu

opremu i samu mrežu pri čemu svi ciljevi treba da budu zadovoljeni. Generalni problem odnosa energetske efikasnosti i kvaliteta servisa u bežičnim komunikacijama izložen je u [55, 56]. U [55] su na opšti način definisani kompromisi koje je neophodno napraviti da bi se postigla bolja energetska efikasnost dok [56] više razmatra kompromise između samih QoS parametara. U [115] je izložen okvir za analizu QoS kompromisa u BSM zasnovan na višeciljnoj optimizaciji.

2.2. Energetska efikasnost u BSM i tehnike za poboljšanje

Energetska efikasnost nekog sistema se meri kao energija koju taj sistem potroši da bi izvršio jedinicu nekog posla, recimo, energija koju potroši sistem sastavljan od predajnika (TX), prijemnika (RX) i komunikacionog kanala da bi preneo bit informacije od predajnika do prijemnika preko komunikacionog kanala. Energetska efikasnost u BSM je bitna iz nekoliko razloga. U literaturi može da se nađe pristup bitnosti energetske efikasnosti u BSM sa različitih aspekata. U ovom delu je izložen jedan sveobuhvatan pristup energetske efikasnosti i razmotrene su dosadašnje tehnike na PHY i MAC slojevima za njeno poboljšanje.

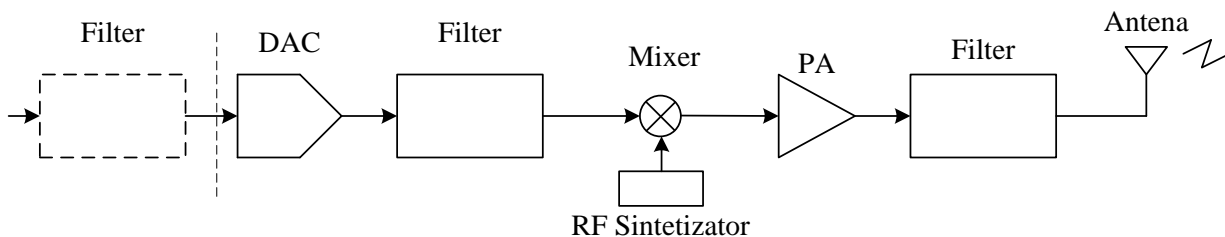
Prvi razlog zbog kojeg je E2 jako bitna jeste zaštita životne sredine. Sa današnjeg stanovišta poimanja zaštite životne sredine bitno je da kroz sve faze životnog veka nekog uređaja, energija koja se troši bude obnovljiva ili, ako to nije moguće, onda da se koristi u što manjoj meri, kako bi postojanje tog uređaja nanelo što manje promene u okolini. Vođeni takvim pristupom, autori rada [22] pokušavaju da definišu fundamentalne limite za energiju utrošenu po bitu informacije, uzimajući u obzir ukupan „energetski otisak“ sistema, koji operiše informacijama. „Energetski otisak“ predstavlja ukupnu energiju, koja se potroši da bi se sistem napravio, instalirao, operisao informacijama i energije koja je potrebna za razgradnju sistema.

Drugi razlog je produženje životnog veka uređaja napajanog iz neobnovljivog izvora, najčešće baterijski napajanog uređaja [122] i BSM sastavljane od takvih uređaja [106-108]. Kako životni vek mreže nema jedinstvenu definiciju, u [106] su analizirani različiti aspekti koji utiču na definiciju životnog veka BSM. U [107] je data generalna formula za životni vek mreže, koja može da bude primenjena na bilo koju BSM nezavisno od definicije životnog veka. U [33, 108] su prikazane različite tehnike za postizanje što dužeg životnog veka BSM sa različitih aspekata. U [122] je data teorijska analiza potrošnje energije kod tipičnih BSM čvorova.

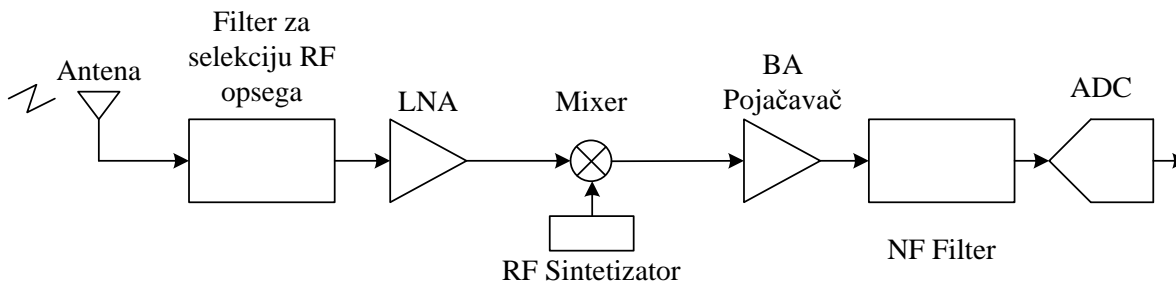
Treći razlog je mogućnost napajanja BSM uređaja iz obnovljivih izvora energije. Problem se sastoji u tome što postojeće tehnike prikupljanja energije iz okoline mogu da proizvedu jako

malo energije, a proizvodnja najčešće nije permanentna. Kako napajanje BSM uređaja prikupljenom energijom može da reši problem životnog veka i u velikoj meri problem zagađenja životne sredine, ova ideja privlači dosta pažnje. U [23] su prikazane postojeće tehnike za prikupljanje energije iz okoline. U [24] su definisani teorijski uslovi koje treba da zadovolje procesi generisanja i potrošnje energije da bi BSM uređaj mogao da bude napajan na ovaj način. U [123] je urađena analiza komercijalno raspoloživih sistema za prikupljanje energije iz okoline sa aspekta kapaciteta.

Kako radio-primopredajnik kod BSM čvorova troši najviše energije za svoje funkcionisanje, čak za dva reda veličine više od ostalih komponenta uređaja, a ovde se razmatra E2 sa aspekta PHY i MAC slojeva, za bolje razumevanje problema, potrebno je detaljnije razmotriti od čega se jedan univerzalni RPP sastoji. Na slici 3 je prikazana dekompozicija predajnika i prijemnika. Aktivne komponente predajnika su: konvertor digitalnog u analogni signal (DAC), mikser signala i nosioca, sintetizator nosioca, izlazni pojačavač snage (eng. *Power Amplifier* - PA). Aktivne komponente prijemnika su: niskošumni pojačavač (eng. *Low Noise Amplifier* - LNA), mikser prijemnog signala i nosioca, sintetizator nosioca, pojačavač u osnovnom opsegu signala (eng. *Baseband Amplifier* - BA), NF filter, konvertor analognog u digitalni signal (ADC).



(a) Blok dijagram predajnika



(b) Blok dijagram prijemnika

Slika 3. Blok dijagrami predajnika (a) i prijemnika (b)

Ukupna snaga koju za svoj rad troše predajnik i prijemnik data je kao suma snaga svih komponenta od kojih se sastoje, (1), (2), respektivno. Sa p je označena veličina snage, a oznake u indeksu odgovaraju komponentama.

$$p_{TX} = p_{DAC} + p_{mixer} + p_{RFS} + p_{PA} \quad (1)$$

$$p_{RX} = p_{LNA} + p_{mixer} + p_{RFS} + p_{BA} + p_{NF} + p_{ADC} \quad (2)$$

Detaljnija analiza snage pojedinačnih komponenta može da se nađe u [25, 26], dok je generalni model potrošnje predajnika detaljno izložen u delu 3.3.2 RFP-model ove disertacije. Kako se snaga prijemnika sasvim zadovoljavajuće aproksimira konstantom, sve tehnike za E2 poboljšanje na PHY sloju se baziraju na smanjenju snage koju troši predajnik.

Glavne promenjive veličine na PHY i MAC slojevima koje je moguće birati ili kontrolisati su:

1. Bitska brzina, r
2. Modulacija, mod
3. Dužina paketa, l
4. Dužina kontrolnih podataka u paketu, l_c
5. Broj pokušaja slanja paketa, m
6. Predajna snaga (snaga predata predajnoj anteni), p_{tx}
7. Dužina predajnog bafera, q
8. Verovatnoća sudaranja paketa (eng. *collision probability*), p_c
9. Kod za detekciju i/ili korekciju greške u prenosu paketa (eng. Forward Error Correction), FEC
10. Odnos aktivnog i neaktivnog RPP stanja

U slučaju mobilnih komunikacija u ove veličine mogu da se uvrste i

11. Slabljenje kanala, L
12. TX-RX rastojanje, d
13. Nivo interferencije, N_i

U opštem slučaju

1. slabljenje kanala,
2. TX-RX rastojanje,
3. nivo interferencije
4. process pristizanja podataka za prenos

su zadate veličine.

2.2.1 Tehnike za E2 poboljšanje

U ovom delu je razmotreno nekoliko tehnika koje kontrolom određenih veličina na PHY i MAC slojevima mogu da poboljšaju energetske efikasnost. Tehnike su:

1. prilagođenje bitske brzine (eng. *Data-rate adaptation*)
2. kontrola predajne snage (eng. *Transmission Power Control - TPC*)
3. kontrola odnosa trajanja aktivnog i neaktivnog stanja RPP (eng. *Duty-cycling*)
4. kontrola transmisije u više skokova (eng. *Multi-hopping*)
5. izbor optimalne modulacije
6. izbor optimalnog kodovanja
7. kontrola dužine paketa
8. agregacija paketa
9. korišćenje dobrog stanja kanala (eng. *Opportunistic Communications*)

Prilagođenje bitske brzine

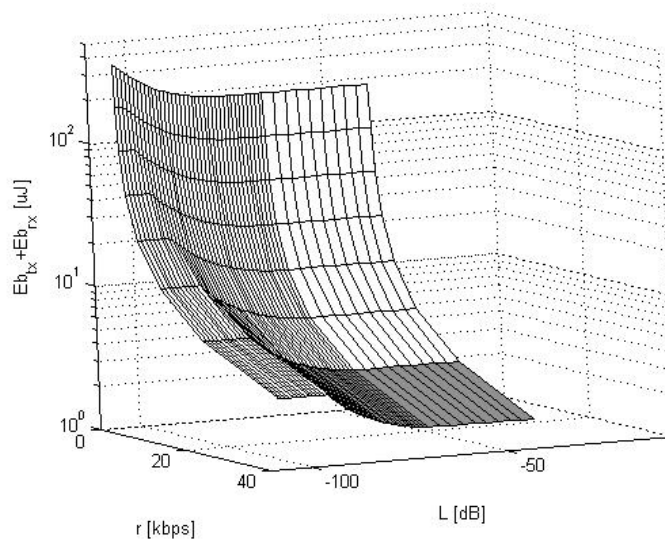
Polazeći od jednostavnog modela, koji uračunava ukupnu snagu koju troši predajnik, u [41] je pokazano, na primeru QAM (eng. *Quadrature Amplitude Modulation*) modulacije, da sa porastom bitske brzine opada energija utrošena po bitu i da je sa stanovišta energetske efikasnosti uvek najbolje transmisiju vršiti najvećom mogućom bitskom brzinom. Najveća moguća brzina zavisi od maksimalne snage predajnika. Zavisnost ukupne energije utrošene po poslatom bitu (računajući i energiju koju troši prijemnik) od bitske brzine, pri čemu se odnos snage signala i šuma (eng. *Signal-to-noise-ratio - SNR*) na prijemniku održava konstantnim, za različita slabljenja kanala, kod CC1000² RPP-a, prikazana je na slici 4, [70]. Zaravnjeni deo na levoj strani dijagrama predstavlja zonu velikog slabljenja kanala i tada TX radi u zasićenju, koristeći maksimalnu snagu.

Kontrola predajne snage

Kontrola predajne snage može da se uradi na nekoliko različitih nivo. Ako se predajna snaga podešava tako da svi čvorovi koriste istu snagu, radi se o TPC na mrežnom nivou [124]. Ovakav

² Uputstvo za CC1000 se nalazi na www.ti.com

pristup se koristi kada se nivo predajne snage određuje u fazi dizajna mreže, a koriste se predajnici sa fiksnom predajnom snagom. Kod ovih predajnika pojačavači snage se podešavaju da rade sa maksimalnom efikasnošću [76]. Kod novijih RPP-a, koji se koriste u BSM primenama, moguće je podešavanje predajne snage na nekoliko nivo u toku rada. Ako se snaga podešava za svaki čvor posebno ali tako da čvor koristi istu snagu bez obzira sa kojim susedom komunicira, radi se o TPC na nivou čvora [125]. Ako se snaga podešava za svaki par čvorova, radi se o TPC na nivou linka [126]. U [28] je prikazan ATPC mehanizam koji ide dalje i snagu podešava za svaki link, prilagođavajući je trenutnom slabljenju kanala.



Slika 4. Zavisnost ukupne energije po bitu od bitske brzine i slabljenja kanala za CC1000 RPP

Cilj TPC je da obezbedi željeni nivo signala na prijemu i potrebno je da snagu predaje prilagodi promenama slabljenja kanala i nivoa interferencije, bez obzira na uzroke njihove promene. Podrazumeva se da je informacija o trenutnom stanju kanala raspoloživa na predajniku. U [27] su prikazane dve TPC tehnike, koje prilagođavanje predajne snage vrše u mobilnim mrežama gde se stanje kanala, u najvećoj meri, menja zbog kretanja čvorova.

Kontrola odnosa trajanja aktivnog i neaktivnog stanja RPP

Pošto je BSM saobraćaj često mnogo manji od kapaciteta mreže, ideja je da kada nema zahteva da preko BSM čvora ide prenos podataka, on može da se prebaci u neaktivno stanje, u kojem troši znatno manje energije za funkcionisanje. Gornja granica za trajanje neaktivnog

stanja je kada čvor ne prenosi nikakve podatke i jedino mora povremeno da pređe u aktivno stanje da bi razmenio poruke bitne za održavanje mreže sa ostalim čvorovima. *Duty-cycle* se definiše kao količnik trajanja aktivnog stanja čvora i zbira trajanja aktivnog i neaktivnog stanja. U BSM je ovaj odnos često ispod 1%.

Duty-cycling ideja se dosta eksploatiše u BSM i postoji mnogo radova na tu temu. Zato su ovde navedeni samo početni radovi i jedan rad koji daje dobar pregled onoga što je do sada urađeno. Moguće je vršiti *Duty-cycling* na nekoliko načina. Početna ideja je prikazana u S-MAC protokolu, [29]. S-MAC koristi slobodan pristup kanalu, a komunikacija se odvija u ciklusima fiksne dužine, dok se *Duty-cycle* podešava u fazi dizajna mreže. Autori prijavljuju 2-6 puta veću energetska efikasnost od MAC protokola baziranih na IEEE 802.11 standardu. T-MAC, prikazan u [30], predstavlja unapređenje ideje korišćenjem MAC protokola sa vremenskom raspodelom i *Duty-cyclea*, koji se podešava u toku rada, promenom trajanja aktivnog stanja. Autori prijavljuju poboljšanje u odnosu S-MAC za faktor 5, kada se radi o promenljivom saobraćaju. Potpuni *Duty-cycling*, kod kojeg se koristi mogućnost prilagođenja svih parametara trenutnom saobraćaju, prikazan je u [31].

Ukoliko se *Duty-cycle* smanji toliko da sistem ne može da odgovori zahtevanom saobraćaju, kod MAC protokola sa slobodnim pristupom, doći će do povećanja verovatnoće sudaranja paketa pa će više energije da se troši na razlučivanje pristupa kanalu, odnosno, doći će do smanjenja E2. Kod MAC protokola sa organizovanim pristupom, sa smanjenjem *duty-cyclea*, za istu količinu podataka, moraće da se upotrebi više ciklusa prenosa. S obzirom na to da svaki ciklus koristi fiksnu količinu podataka za kontrolu, biće upotrebljivo više kontrolnih podataka te će na taj način da se smanji E2.

Kontrola transmisije u više skokova

S obzirom na to snaga signala opada eksponencijalno sa rastojanjem, u otvorenom prostoru sa eksponentom 2, a u realnim okruženjima eksponent ide čak do 6, ideja je da se u senzorskom polju umesto komunikacije između senzorskih čvorova i kolektora, umesto komunikacije u jednom skoku na velikom rastojanju, koristi više skokova na malim rastojanjima. Pretpostavka je da BSM čvorovi opremljeni predajnicima, koji emituju malom snagom, u zbiru troše manje energije, nego jedan predajnik koji emituje velikom snagom. Polazeći od prethodne pretpostavke kao tačne, BSM su po pravilu organizovane kao mreže u kojima se prenos podataka vrši u više

skokova.

Isplativost komunikacije u više skokova u odnosu na jedan skok, pri čemu se koriste RPP uređaji istog tipa, je dosta istražena tema. U [34] su razmatrani različiti aspekti koji idu kako u prilog tako i protiv isplativosti komunikacije u više skokova u odnosu na jedan skok. Generalno stanovište, uzimajući u obzir ukupne energetske troškove predajnika i prijemnika na svakom skoku, je da se uvek najviše isplati jedan skok ukoliko je moguće, a ako ne, onda što manji broj skokova [67-69, 71]. Pod kojim odnosom dizajn parametara predajnika i prijemnika je moguće da komunikacija u dva skoka bude isplativija od komunikacije u jednom skoku analizirano je u [72].

Jedna verzija problema isplativosti komunikacije u više skokova je da se pronađe energetski optimalan broj skokova za zadato TX-RX rastojanje i tip RPP-a [35, 36, 62].

Svakako, kako pronaći putanju u senzorskom polju između senzorskog čvora i kolektora, koja će da bude energetski najisplativija je značajno pitanje. Generalni problem pronalaženja energetski najefikasnije putanje, kada se koriste realni primopredajnici, postavljen je u [71]. Da bi poređenje različitih putanja bilo fer, postavljen je uslov da krajnja verovatnoća greške u prenosu mora da bude ista. Rešenje sličnog problema, kako podesiti snagu predaje na svakom čvoru na već zadatoj putanji, tako da bude zadovoljen odgovarajući nivo greške u prenosu na određitu, prikazano je u [57].

Izbor optimalne modulacije

Ideja je da se u zavisnosti od zadatih veličina odredi optimalna modulacija, koja će da proizvede minimalnu utrošenu energiju po jedinici prenetih podataka [127]. Ukoliko se modulacija bira samo promenom veličine konstalacije kod M-arnih modulacija, radi se o skaliranju modulacija (eng. *Modulation Scalling*) [41]. Kako realni komunikacioni sistemi podržavaju samo određeni broj modulacija, problem se svodi na izbor optimalne modulacije iz predefinisano skupa modulacija.

U [41] je pokazano da u zavisnosti od slabljenja kanala može da se odredi optimalan broj bita po simbolu kod MQAM (eng. *M-ary Quadrature Amplitude Modulation*) tako da energija po bitu bude minimalna. U [42] je razmatran isti problem ali pod ograničenjima za srednju verovatnoću greške po bitu. Ustanovljeno je da optimalan broj bita po simbolu raste sa smanjenjem slabljenja kanala i obrnuto, sa povećanjem slabljenja kanala, optimalan broj bita po simbolu opada. U [26]

je pokazano da je optimalna MQAM bolje rešenje od optimalne MFSK (eng. *M-ary Frequency Shift Keying*) modulacije, kod komunikacije na malim rastojanjima dok je optimalna MFSK bolje rešenje ukoliko postoji ograničenje maksimalne predajne snage, što je u WSN čest slučaj. U [43] je poređena energetska-efikasnost MFSK i MPPM (eng. *M-ary Pulse Position Modulation*) modulacija, uzimajući u obzir količinu energije uzete iz baterije. U zavisnosti od ukupnog udela emitovane snage u ukupnoj snazi predajnika obadve, MFSK i MPPM modulacije imaju svoje oblasti u kojima su bolje.

U [54] je razmatran problem određivanja optimalne modulacije iz predefinisanoj skupa podržanih modulacija kod predajnika baziranih na HIPERLAN/2, IEEE 802.11a i 3GPP standardima.

Izbor optimalnog kodovanja

Dodavanjem FEC na nekodovane podatke povećava se verovatnoća uspešnog prenosa. Gledano sa stanovišta energetske efikasnosti za dodatne bite je potrebno utrošiti i dodatnu energiju. Međutim, ako postoji uslov da podaci treba da budu detektovani sa nekom predefinisanoj verovatnoćom, onda na račun smanjenja verovatnoće uspešnog prenosa nekodovanih podataka, smanjenjem energije koja se troši za njihov prenos, zbog primene FEC-a, ukupna verovatnoća ispravnog prenosa može da ostane ista. U odnosu dodatnih bita i doprinosa FEC-a ukupnoj verovatnoći ispravnog prenosa može da se pronađe optimalan FEC, koji će da minimizuje energiju utrošenu po jedinici podataka [131, 132].

Dakle, sam FEC utiče na smanjenje energetske efikasnosti ali, ako postoji uslov pouzdanog prenosa, može da se pronađe optimalan FEC. Izbor optimalnog FEC-a i modulacije se najčešće tretiraju objedinjeno, a tehnika se sreće pod nazivom AMC (eng. *Adaptive Modulation and Coding*) [54].

Kontrola dužine paketa

Svaki komunikacioni sloj unosi svoje zaglavlje, koje sadrži podatke potrebne za njegovo pravilno funkcionisanje. Neka se na PHY sloju prenose okviri podataka koje formira link sloj, a na sloju linka neka se prenose paketi, koje formira sloj iznad njega, npr. mrežni sloj. Onda sloj linka svakom paketu dodaje neke kontrolne podatke (adrese primaoca i pošiljaoca, kontrolna suma, tip okvira...) i tako formira okvir, a PHY sloj svakom okviru dodaje određene podatke

(sinhronizaciona sekvenca, dužina okvira...). Gledano sa stanovišta nekog sloja, bitna je energija potrošena po jedinici podataka kojom on operiše. Recimo, sa stanovišta mrežnog sloja, bitno je koliko će energije da se potroši za prenos jednog bita paketa. U tom slučaju, podaci dodati na nižim slojevima se teriraju kao dodatan trošak i bitno je koliko iznosi taj trošak po bitu korisnih podataka.

U zavisnosti od slabljenja kanala i smetnji na prijemu, postoji optimalan odnos dužine paketa i količine dodatih informacija na nižim slojevima, koji minimizuje utrošenu energiju po bitu korisnih podataka. U [43, 44] su prikazani adaptivni mehanizmi koji određuju optimalnu dužinu okvira spram trenutnih uslova na komunikacionom linku.

Agregacija paketa

Dok kontrolom dužine paketa pokušavamo da smanjimo uticaj dodatnog energetskog troška nastalog zbog zaglavlja na nižim komunikacionim slojevima, agregacijom pokušavamo da smanjimo količinu podataka u zaglavljima sažimanjem više paketa sa istim zaglavljima u jedan paket. Agregacija može da ima pozitivne efekte i na protok [47]. Međutim, posmatra se pitanje retransmisije paketa koji su primljeni sa greškom. Kako se agregacijom formiraju duži paketi, postojaće i veća verovatnoća prenosa sa greškom. U [46, 48] je prikazana tehnika agregacije paketa sa retransmisijom fragmenata koja otklanja ovaj problem uz neznatno povećanje količine podataka u zaglavlju.

Korišćenje dobrog stanja kanala

Ideja *opportunistic communications* forsira upotrebu TX-RX kanala u dobrom stanju, kada je željeni SNR na prijemu moguće postići relativno malom predajnom snagom. Kanal je u dobrom stanju kada je slabljenje kanala malo i/ili kada je nivo smetnji na prijemu mali. Prenos po boljem kanalu podrazumeva i manju energiju po jedinici podataka. Slabljenje kanala se menja vremenski i prostorno [128]. Da bi kanal prešao iz lošeg u bolje stanje potrebno je da se sačeka pogodan vremenski trenutak ili da se geometrija kanala promeni, recimo, u mobilnim komunikacijama zbog pomeranja čvorova da se smanji TX-RX rastojanje. Svakako, ušteda energije je moguća na račun povećanja kašnjenja.

Kada i koliko podataka će predajnik da pošalje, u zavisnosti od dinamike pristizanja podataka za slanje, slabljenja kanala i postavljenih ciljeva, gde su ciljevi energetska efikasnost i kvalitet

servisa, određuje raspoređivač poslova. Dakle, ceo problem korišćenja dobrog stanja kanala se svodi na projektovanje odgovarajućeg raspoređivača. Osnovni problem kod ovog pristupa je što se forsiraju TX-RX parovi sa kanalom u dobrom stanju tako da može da se desi da TX-RX parovi sa kanalom u lošem stanju nikada ne dobiju priliku da izvrše prenos.

U slučaju da je kanal dugo u lošem stanju i raspoređivač ne dozvoljava slanje po njemu, može da se desi da količina pristiglih podataka premaši veličinu bafera pa da dođe do odbacivanja paketa. Od veličine bafera zavisi koliko dugo raspoređivač može da čeka na povoljne uslove na kanalu. Dakle, što je više vremena na raspolaganju, veće su šanse da se prenos izvrši po boljem kanalu, sa manje energije. Može da se zaključi da povećanje bafera doprinosi boljoj energetskej efikasnosti. Na sličan način može da se dođe do zaključka da što je manja količina pristiglih podataka za slanje, veća je energetska efikasnost.

U [37] je razmotren problem odnosa energetske efikasnosti i kašnjenja, kada više korisnika može istovremeno da komunicira preko istog kanala sa fejdíngom dok je u [39] analiziran E2 problem u direktnoj TX-RX komunikaciji, kada postoje striktna vremenska ograničenja za prenos paketa podataka. U [38] je predstavljen raspoređivač koji uzima dva kriterijuma prilikom donošenja odluke, kvalitet kanala i energiju kojom TX raspoláže, dok je maksimizacija životnog veka BSM cilj. U [40] je razmotren problem konstrukcije raspoređivača koji uzima u obzir kvalitet kanala da bi na fer način zadovoljio zadat nivo kvaliteta servisa.

2.3 Pouzdanost u BSM i tehnike za njenu kontrolu

Potreba da BSM pored energetske efikasnosti mora da ispune i zahteve kvaliteta servisa je prisutna još od početka razvoja BSM oblasti. Međutim, studija WiSeNts FP6 projekta [49] iz 2005. godine, koja se bavi pregledom stanja u BSM oblasti i analizom budućih tokova istraživanja, predviđa da će QoS problematika da dođe u fokus istraživanja tek oko 2012. godine, a da će do tada fokus da bude na energetskej efikasnosti.

Analizom glavnih inhibitora za širu primenu BSM tehnologije, koja obuhvata 58 vodećih proizvođača komunikacione opreme, objavljenoj u izveštaju „*Wireless Sensor Networks – Growing Markets, Accelerating Demands*”, jula 2005. godine, pouzdanost zauzima vodeće mesto.

Pouzdanost je u [10] dekomponovana po slojevima ISO referentnog modela na:

1. pouzdanost sa aspekta specifične BSM primene, koja podrazumeva verovatnoću da

isporučeni podaci pripadaju fenomenu od interesa,

2. pouzdanost sa aspekta transpornog sloja, koja podrazumeva procenat isporučenih paketa, koji izveštavaju o istom događaju,

3. pouzdanost sa aspekta MAC sloja, koja podrazumeva procenat uspešno prenetih paketa,

dok je u [129] data objedinjena definicija pouzdanosti u BSM, kao verovatnoća da će informacija zadovoljavajućeg kvaliteta, o fenomenu koji se posmatra, da stigne do kolektora podataka.

Svakako, pouzdanost na MAC sloju je osnovni konstituent ukupne pouzdanosti i za bilo kakvu detaljniju analizu pouzdanosti u BSM, neophodno je da se detaljno razmotri pouzdanost na MAC sloju. Generalno, postoje dva pristupa pouzdanosti na MAC sloju. Prvi pristup je sa aspekta viših slojeva. Kod ovog pristupa je bitno kvantifikovati kvalitet linka, a taj podatak će da koriste viši komunikacioni slojevi u procesu odlučivanja. Jednostavan način je da se na prijemniku izračuna procenat uspešno prenetih paketa. U nekoliko radova su predstavljeni rezultati merenja uticaja prostorne i vremenske promenljivosti slabljenja bežičnog kanala na procenat uspešno prenetih paketa [58, 60]. Drugi pristup je sa aspekta PHY i MAC slojeva i bazira se na projektovanju verovatnoće greške u prenosu jedinice podataka, simbola/bita/paketa pomoću promenljivih sa ova dva sloja [50-54].

Zahtevi za pouzdanost u BSM mogu da budu izraženi kvalitativno i/ili kvantitativno. Kvalitativno određenje pouzdanosti je uglavnom prisutno kada se definiše pouzdanost na sloju primene. Autori u [52] navode da vojne primene BSM i primene u kontroli industrijskih procesa zahtevaju skoro apsolutnu pouzdanost dok primene u monitorisanju okoline mogu da tolerišu značajne gubitke paketa, omogućavajući na taj način prostor za uštedu energije. Kod prenosa fajlova, npr. reprogramiranje senzorskih čvorova, ne toleriše se bilo kakav gubitak podataka. Kod multimedijalnih primena BSM, u zavisnosti od primenjene tehnike rekonstrukcije, audio signal može da se rekonstruiše ako gubici ne prelaze 2-5% dok video signal može da se rekonstruiše ako gubici ne prelaze 5-10%. Kod BSM primene u umreženim kontrolnim sistemima, pokazano je da sistem može da ostane stabilan čak i pri gubicima paketa od 70% [130]. IEEE 802.15.4 standard definiše da test paketi dužine 20 okteta treba da imaju verovatnoću greške u prenosu manju od 1%.

2.3.1 Kontrola pouzdanosti na PHY i MAC slojevima

Ovde su razmotrene samo tehnike na PHY i MAC slojevima za poboljšanje pouzdanosti u

prenosu paketa podataka. Imajući u vidu promenjive veličine na PHY i MAC slojevima, koje je moguće birati ili kontrolisati, kao i zadate veličine, definisane u poglavlju 2.2.1, u nastavku je analiziran njihov uticaj na pouzdanost.

Uticaj bitske brzine na pouzdanost

BER je proporcionalan $e^{-\gamma}$ kod FSK i DPSK sa nekoherentnom demodulacijom [131], pri čemu je γ srednja vrednost za SNR. Kod M-ASK, M-PAM, MSK, M-PSK modulacija, BER ima formu $aQ(\sqrt{c\gamma})$ [131], gde je $Q(\cdot)$ Gausova Q funkcija. Dobro je poznato da je ova funkcija ograničena odozgo, $Q(x) < 0.5\exp(-x^2/2)$. Kako je $\gamma \sim r^{-1}$ može da se zaključi da verovatnoća greške po bitu raste sa porastom bitske brzine za širok opseg modulacija.

Uticaj dužine paketa na pouzdanost

Ukoliko je jedinica prenosa paket podataka, pouzdanost može da se izrazi kao verovatnoća greške paketa. PER može da se izračuna kao verovatnoća da će jedan ili više bita u paketu da ima grešku i u opštem slučaju, kada BER ima identičnu i nezavisnu raspodelu, važi

$$PER = 1 - (1 - BER)^l. \quad (3)$$

U [132] je pokazano da je PER kod bežičnih kanala uvek manji od PER-a datog u (3) jer se biti sa greškom javljaju u grupama. Na osnovu (3) može da se zaključi da verovatnoća greške paketa raste sa dužinom paketa.

Uticaj dužine kontrolnih podataka u paketu na pouzdanost

Dužina kontrolnih podataka je sastavni deo ukupne dužine paketa pa dužina kontrolnih podataka utiče na pouzdanost na isti način kao i dužina paketa.

Uticaj broja retransmisija na pouzdanost

Ukoliko prijemnik detektuje paket sa greškom, može da traži od predajnika da ponovi slanje istog paketa. ARQ (eng. *Autoamtic Repeat Request*) mehanizam se dosta primenjuje da poboljša pouzdanost u prenosu paketa. Najjednostavniji je ARQ sa fiksnim maksimalno dozvoljenim brojem retransmisija. IEEE 802.15.4 standard predviđa do 3 retransmisije, ukoliko nije drugačije zadato. Ukoliko se m prilagođava stanju kanala, ili se menja da bi se postigao neki optimizacioni cilj, onda se radi o adaptivnom ARQ [53]. U kombinaciji sa FEC mehanizmom mogu da se

postignu bolji rezultati i tada se radi o hibridnom ARQ ili HARQ [83].

Uticao predajne snage na pouzdanost

Povećanje predajne snage uticaće na povećanje snage na prijemu. Ukoliko ostali parametri komunikacije ostanu isti, SNR na prijemu će da se poveća pa samim tim će da se smanji verovatnoća greške u detekciji simbola. Na ovaj način se povećava i pouzdanost. Tehnike za kontrolu predajne snage u BSM primenama se obično koriste da se angažovanjem minimalne snage postigne prenos podataka sa zahtevanom pouzdanošću [28, 124-126].

Uticao dužine predajnog bafera na pouzdanost

Ukoliko pretpostavimo da na predajniku ne postoji ograničenje za dužinu predajnog bafera, onda će svi podaci koji pristignu za slanje da budu prihvaćeni i dočekaće svoj red za slanje. Međutim, u realnosti je predajni bafer uvek konačne dužine, a u BSM primenama ovo ograničenje je striktno. Podatak koji pristigne za slanje u trenutku kada je predajni bafer pun, biće odbačen. Kako odbačeni podaci, takođe utiču na pouzdanost, može da se zaključi da pouzdanost raste sa dužinom predajnog bafera. Smanjenje pouzdanosti ograničavanjem predajnog bafera je iskorišćen u [82] da bi se postigo bolji odnos energetske efikasnosti i kašnjenja, na račun pouzdanosti.

Uticao verovatnoće sudaranja paketa na pouzdanost

Sudaranje paketa je karakteristično za MAC protokole sa slobodnim pristupom. Na verovatnoću sudaranja paketa utiču kako sam MAC protokol tako i podešenost parametara MAC protokola. Pošto se u BSM koriste različiti MAC protokoli sa slobodnim pristupom, ovde je apstrakcija uticaja MAC protokola sa slobodnim pristupom na pouzdanost urađena kroz verovatnoću sudaranja paketa. Analiza uticaja konkretnih parametara IEEE 802.15.4 MAC protokola u režimu rada sa slobodnim pristupom na pouzdanost izložena je u [52]. U opštem slučaju, smatra se da je paket koji je doživeo sudar sa drugim paketom primljen sa greškom. Drugim rečima, sudaranje povećava verovatnoću prijema sa greškom, odnosno, smanjuje se pouzdanost.

Pored MAC protokola sa slobodnim pristupom u BSM se koriste i MAC protokoli sa kontrolisanim pristupom gde sudaranje paketa nije moguće, odnosno, verovatnoća sudaranja paketa je 0.

Uticaj odnosa aktivnog i neaktivnog RPP stanja na pouzdanost

Uticaj *Duty-cycling* tehnike na pouzdanost se ogleda kroz verovatnoću sudaranja paketa, kada se koriste MAC protokoli sa slobodnim pristupom dok u slučaju MAC protokola sa kontrolisanim pristupom, *Duty-cycling* nema uticaj na pouzdanost.

Promenom odnosa aktivnog i neaktivnog stanja RPP-a može da se kontroliše kapacitet linka od 0, u slučaju da je RPP uvek u neaktivnom stanju do 100% ukupnog kapaciteta, u slučaju da je RPP uvek u aktivnom stanju. Opšte je poznato da za svaki MAC protokol sa slobodnim pristupom postoji neki optimalan odnos zahtevanog i ostvarenog saobraćaja za koji je protok maksimalan. Pri tom se protok računa relativno u odnosu na kapacitet linka. Dakle, promenom kapaciteta linka menja se i optimalan odnos zahtevanog i ostvarenog saobraćaja. Na sličan način optimizacija može da se izvrši sa ciljem minimizacije verovatnoće sudaranja paketa.

FEC uticaj na pouzdanost

Osnovna namena FEC tehnike je da se dodavanjem redundantnih informacija poveća verovatnoća ispravnog prenosa. FEC se često koristi u kombinaciji sa ARQ tehnikama kao hibridna ARQ tehnika. U [131] je data uporedna analiza primene ARQ, FEC i hibridnih ARQ tehnika u BSM. U [54, 81] su prikazane adaptivne tehnike koje uključuju FEC.

Uticaj slabljenja kanala na pouzdanost

Kada su ostali parametri emitovanja konstantni, sa povećanjem slabljenja kanala opada nivo signala na prijemu te i ukupan SNR, odnosno, pouzdanost.

Uticaj TX-RX rastojanja na pouzdanost

Generalno, sa porastom TX-RX rastojanja, raste i slabljenje kanala pa nadalje može da se primeni isto rezonovanje uticaja na pouzdanost kao kod uticaja slabljenja kanala. Ukoliko se uzmu u obzir realističniji modeli zavisnosti slabljenja kanala od TX-RX rastojanja kod bežičnih komunikacija (fejding, *shadowing*), može da dođe do manjih varijacija krive zavisnosti ali trend monotonosti krive zavisnosti je očigledan.

Uticaj nivoa interferencije na pouzdanost

Pošto interferencija može da bude rezultat nekoliko različitih procesa, ovde su analizirane 3 vrste interferencije koje obuhvataju glavne uzroke.

Intersimbolska interferencija je uglavnom posledica interferencije više signala koji potiču iz istog izvora ali su propagirali različitim putanjama. Ova interferencija obuhvata procese fejdinga i *shadowinga*. U slučaju postojanja intersimbolske interferencije, za računanje bilo koje metrike pouzdanosti, umesto slabljenja kanala koristi se srednje slabljenje, koje je uvek veće od slabljenja kada interferencija na postoji. Što su fejding i *shadowing* izraženiji, srednje slabljenje je veće, a pouzdanost manja.

Interferencija signala sa dva predajnika iz iste mreže, na prijemniku rezultuje sudaranjem paketa i modeluje se verovatnoćom sudaranja paketa. Ovaj fenomen je prethodno razmotren.

Postoje dva slučaja intereferenicije signala sa dva predajnika iz različitih mreža. U prvom slučaju signal smetnja traje kratko u odnosu na signal od interesa i izaziva grešku u prenosu na nekoliko uzastopnih simbola. Na primer, u toku emitovanja IEEE 802.15.4 paketa dodje do preklapanja sa IEEE 802.11 paketom, koji je znatno kraći od prethodnog. Uticaj ove vrste interferencije na pouzdanost može da se modeluje verovatnoćom sudaranja paketa iz različitih mreža i nadalje da se tretira isto kao i sudaranje paketa iz iste mreže. U drugom slučaju, signal smetnja je prisutan u toku emitovanja celog paketa od interesa. Ova vrsta interferecnije može da se posmatra kao dodatni šum, a SNR da se posmatra kao odnos nivoa signala i ukupnih smetnji SINR (eng. *Signal-to-Interference and Noise Ratio*).

Interferencija, bilo kojoj vrsti da pripada, negativno utiče na pouzdanost i kao takva nije poželjna u sistemima bežičnih komunikacija.

Uticaj procesa pristizanja podataka za prenos na pouzdanost

Komunikacioni sistem može da odbaci podatke bez pokušaja da ih prenese iz bar dva razloga. Prvi razlog je već naveden i odnosi se na podatke koji su pristigli za prenos u trenutku kada je predajni bafer pun pa ne može da ih prihvati. Drugi slučaj je kada podaci imaju vremensko ograničenje, odnosno, definisan je trenutak do kojeg ima smisla da stignu na odredište, u suprotnom, mogu da budu izbačeni iz sistema, npr. prenos videa ili zvuka.

Uticaj procesa pristizanja podataka na pouzdanost se ogleda kroz ova dva razloga odbacivanja podataka. Proces pristizanja podataka je obično opisan statistički sa definisanom očekivanom vrednošću i varijansom količine pristiglih podataka. Komunikacioni sistem treba da bude tako dizajniran da kapacitet linka, odnosno, ostvareni protok, može da zadovolji očekivanu vrednost procesa pristizanja podataka, a dužina predajnog bafera tolika da može da zadovolji varijansu

procesa. U sistemima gde se primenom *Duty-Cycling* tehnike prilagođava kapacitet linka i/ili gde se rutiranje kontroliše dinamički, lako može da dođe do odbacivanja paketa.

Generalno, sa porastom količine podataka pristiglih za prenos, raste i verovatnoća da će da dođe do odbacivanja podatak, odnosno, pouzdanost opada.

2.4 Pregled uticaja PHY i MAC parametara na energetska efikasnost i pouzdanost; definicija problema

Kako su energetska efikasnost i pouzdanost suprotni ciljevi, odnosno, poboljšanje jednog dovodi do pogoršanja drugog, ovde je napravljen uporedni pregled uticaja parametara na PHY i MAC slojevima na ciljeve da bi se lakše detektovale promjenjive koje ciljeve pomeraju suprotno, odnosno, promjenjive koje ih pomeraju na istu stranu. Uporedni pregled je prikazan u tabeli 4. Simbol „↗“ označava da se cilj poboljšava sa porastom promjenjive; simbol „↘“ označava da se cilj pogoršava sa porastom promjenjive; „opt“ označava da cilj ima optimalnu vrednost za neku vrednost promjenjive.

Bitska brzina, dužina paketa, broj retransmisija, predajna snaga i FEC pomeraju ciljeve na suprotnu stranu i potrebna je detaljna analiza uticaja ovih promjenjivih na ciljeve da bi se odnos ciljeva podesio na željeni način. Dužina kontrolnih podataka u paketu, dužina predajnog bafera, verovatnoća sudaranja paketa, slabljenje kanala, TX-RX rastojanje, nivo interferencije i količina pristiglih podataka pomeraju ciljeve na istu stranu i poželjno je da budu podešeni tako da minimalno narušavaju ciljeve. Broj skokova može optimalno da se podesi tako da da maksimalnu energetska efikasnost dok sa brojem skokova pouzdanost opada. *Duty-cycle* može optimalno da se podesi tako da da maksimalnu energetska efikasnost dok pouzdanost raste sa *duty-cycleom*. Modulacija može kod oba cilja da se izabere tako da ih maksimizira pri čemu ciljevi ne mora da imaju maksimume za istu modulaciju.

Tabela 4. Uticaj PHY i MAC parametara na energetska efikasnost i pouzdanost

	Energetska efikasnost	pouzdanost
Bitska brzina	↗	↘
Dužina paketa	↗	↘
Dužina kontrolnih podataka u paketu	↘	↘
Broj retransmisija	↘	↗
Predajana snaga	↘	↗
Dužina predajnog bafera	↗	↗

Verovatnoća sudaranja paketa	↘	↘
Broj skokova	opt	↘
<i>Duty-cycle</i>	opt	↗
<i>FEC</i>	↘	↗
Modulacija	opt	opt
Slabljenje kanala	↘	↘
TX-RX rastojanje	↘	↘
Nivo interferencije	↘	↘
Količina pristiglih podataka	↘	↘

Pristup problemu odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti u ovoj disertaciji je višeciljna optimizacija za razliku od pristupa, koji se najčešće primenjuje, optimizacija jednog cilja pod ograničenjem drugog. Kako je analiza ukupnog uticaja svih varijabli odlučivanja na odnos ciljeva kompleksan problem, ovde se razmatra redukovani problem. Redukcija podrazumeva razmatranje uticaja samo onih promenljivih koje na ciljeve utiču konkurentno (pomeraju ciljeve na suprotne strane) i njihova promena je podržana na savremenim radio-primopredjnicima, dok se za promenjive koje pomeraju ciljeve na istu stranu podrazumeva da su podešene tako da maksimalno doprinose ciljevima. Npr. podrazumeva se da je verovatnoća sudaranja paketa 0. Ova pretpostavka obuhvata i slučajeve kada se koriste MAC protokoli sa uređenim pristupom. Izbor optimalne modulacije i kodovanja nije toliko od interesa jer su brojevi mogućih opcija, podržanih na savremenim radio-primopredjnicima skromni te se ovde *mod* i *FEC* uzimaju kao fiksni parametri. Kako izborom optimalnog broj skokova i optimalne vrednosti za *duty-cycle* može da se podesi optimalna vrednost samo za energetska efikasnost, ovde je učinjena pretpostavka da je *duty-cycle* podešen tako da daje optimalnu E2, a broj skokova se ne razmatra jer je problem sveden na optimizaciju direktne komunikacije između predajnika i prijmnika, odnosno, broj skokova je 1.

Neka je $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}))$ vektor ciljeva, pri čemu su: $F_1(\mathbf{x})$ - energetska efikasnost i $F_2(\mathbf{x})$ - pouzdanost. Neka je $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_4)$ vektor varijabli odlučivanja, pri čemu su: x_1 - bitska brzina, x_2 – dužina paketa, x_3 – broj pokušaja slanja paketa i x_4 - predajna snaga. Neka su \mathbf{F} i \mathbf{X} prostor ciljeva i prostor odlučivanja, respektivno. Problem koji se ovde razmatra, dat u opštem obliku, je

$$\max \mathbf{F}(\mathbf{x}) \mid \mathbf{F} \in \mathbf{Z}, \mathbf{x} \in \mathbf{X} . \quad (4)$$

3. MODEL SISTEMA

Izbor adekvatnih metrika i modela je ključan kod inženjerskih optimizacionih problema. U ovom delu je razmotren izbor odgovarajućih metrika za energetska efikasnost i pouzdanost imajući u vidu da se razmatra komunikacija na PHY i MAC slojevima. Takođe, razmotreni su modeli za potrošnju energije i gubitak informacija u sistemu komunikacije, različiti modeli prenosa paketa podataka, i modeli bežičnog kanala od interesa za BSM primene. Prikazani su i novi modeli, razvijeni za potrebe ove optimizacije.

3.1 Metrike za energetska efikasnost

U [133] su razmotreni osnovni principi za definisanje metrika za energetska efikasnost u bežičnim komunikacijama. Prvi način da se definiše E2 je na osnovu odnosa efektivne izlazne energije i ukupne energije koja ulazi u sistem. Drugi način je da se E2 definiše kao ukupna postignuta performansa od interesa po jedinici uložene energije. Kako je E2 koncept u tesnoj vezi sa poređenjem, prethodne dve definicije daju i dva pristupa poređenja sistema za bežičnu komunikaciju po energetska efikasnosti. Sistem koji se posmatra može da bude na nižem ili višem nivou. U [133] su definisani sistemi na 3 različita nivoa: sistemi na nivou komponenti, na nivou opreme i na nivou mreže. Na slici 3 je prikazana oprema za predajnik i prijemnik sa glavnim komponentama. BSM se sastoji od uređaja koji imaju ovu opremu.

E2 metrike se dele na dve kategorije. U prvu kategorije spadaju apsolutne metrike koje pokazuju koliko se energije stvarno koristi za postizanje neke performanse. Najzastupljenija apsolutna metrika je broj bita po Džulu energije, b/J. U drugu kategoriju spadaju relativne metrike koje pokazuju procenat iskorišćenosti energije. Primer je efikasnost pojačavača snage definisana kao odnos izlazne i ulazne snage³.

S obzirom na to da su ovde bitne E2 metrike koje karakterišu efikasnost PHY i MAC slojeva, te metrike će i da budu detaljnije prikazane.

Nivo komponenti

Pojačavač snage je komponenta sa najvećim doprinosom u ukupnoj potrošnji predajnika. Za

³ Strogo gledajući, PA efikasnost je efikasnost snage. Kako je energija jednaka proizvodu snage i vremena, ovako definisana efikasnost snage je jednaka energetska efikasnosti

poređenje energetske efikasnosti različitih PA koriste se dve metrike. Prva je *drain* efikasnost [76], i definiše se kao odnos izlazne snage p_{tx} , snage koju PA predaje anteni, i ukupne snage koju PA troši, p_{PA} , da bi proizveo p_{tx} , (5).

$$\eta_{PA} = \frac{p_{tx}}{p_{PA}} \quad (5)$$

Druga metrika je *power added efficiency* – PAE [134], i predstavlja odnos snage koju PA dodaje signalu i ukupne snage koju PA troši da bi napravio to pojačanje. Neka je p_{in} snaga signala na ulazu u PA, a $G = p_{tx}/p_{in}$ PA pojačanje, tada je

$$PAE = \frac{p_{tx} - p_{in}}{p_{PA}} = \eta_{PA} \left(1 - \frac{1}{G}\right) \quad (6)$$

PAE je sadržajnija metrika i sa stanovišta dizajna PA je bolja. Međutim, za ukupnu potrošnju komponente pogodnija je η_{PA} metrika.

Po analogiji sa η_{PA} , definiše se i *drain* efikasnost za ceo predajnik, η_{TX} , a proizvođači najčešće daju podatke o efikasnosti predajnika kroz ovu metriku. *Drain* efikasnost za ceo predajnik data je formulom (7) pri čemu je p_{TX} dato formulom (1).

$$\eta_{TX} = \frac{p_{tx}}{p_{TX}} \quad (7)$$

U [133] su date dve definicije za efikasnost antene pri čemu se efikasnost posmatra kao pojačanje antene. Prva definicija je data količnikom emitovane snage i snage predate anteni. Druga definicija uzima u obzir i geometriju antene, a efikasnost je data kao količnik intenziteta signala po uglu najvećeg intenziteta zračenja antene i intenziteta zračenja antene, kada se antena posmatra kao izotropan izvor, formula (8).

$$\eta_{ANT} = Gain_{ANT} = 4\pi \frac{I_{\theta,max}}{p_{tx}} \quad (8)$$

$I_{\theta,max}$ je intenzitet emitovanog signala po pravcu i smeru najvećeg intenziteta. Kako su u BSM mogućnosti za upravljanje pojačanjem antene skromni, može da se smatra da su antenski sistemi na TX i RX stramana fiksne geometrije i fiksnog pojačanja. Međutim, u BSM su na raspolaganju informacije o snazi predatoj TX anteni i snazi signala detektovanog na izlazu RX antene. Ukoliko je bežični kanal definisan kao komponenta sistema za prenos informacija između tačaka ulaza TX antene i izlaza RX antene, može da se definiše efikasnost kanala kao

$$\eta_{channel} = L = \frac{p_{rx}}{p_{tx}}, \quad (9)$$

gde je p_{rx} snaga detektovana na izlazu RX antene, a L je slabljenje kanala. Ovako definisana efikasnost kanala uzima u obzir geometriju antenskog sistema i sve varijacije na kanalu koje se dešavaju usled pomeranja predajnika, prijemnika ili sredine.

Nivo mreže

Apsolutne metrike su od interesa na nivou mreže, a najviše se koristi količina prenetih podataka po jedinici energije (npr. b/J) ili inverzna metrika, količina energije utrošena po jedinici podataka (npr. J/b). Količina prenetih podataka po jedinici energije je zastupljenija metrika kod razmatranja u teoriji informacija dok se energija utrošena po jedinici podataka više koristi u praktičnim primenama. U zavisnosti od toga kako se definiše jedinica podataka od interesa, postoje različite metrike za energetska efikasnost.

Kako je simbol osnovna jedinica za prenos informacija na PHY sloju od interesa je srednja snaga, koju potroši komunikacioni sistem, za prenos jednog simbola, E_s - energija po simbolu, formula (10).

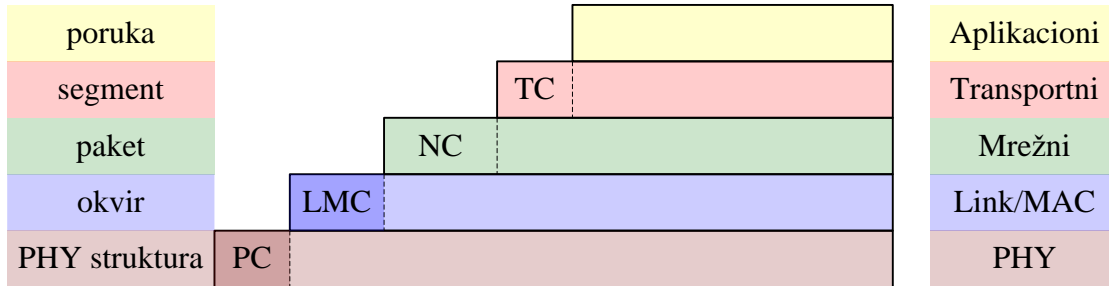
$$E_s = \int_0^{T_s} (p_{TX} + p_{RX}) dt \quad (10)$$

p_{TX} i p_{RX} su dati formulama (1) i (2), respektivno, a T_s je trajanje jednog simbola. Ukoliko su p_{TX} i p_{RX} konstantni tokom emisije simbola, onda je $E_s = (p_{TX} + p_{RX}) \cdot T_s$.

Ukoliko se radi o binarnim modulacijama jedan simbol odgovara jednom bitu pa je energija po bitu ekvivalentna energiji po simbolu, $E_b = E_s$. Ukoliko modulacija nije binarna, E_s se deli brojem bita po simbolu da bi se izračunala energija koju sistem troši po emitovanom bitu. E_s i E_b metrike su od značaja na PHY sloju.

Svaki komunikacioni sloj u procesu enkapsulacije dodaje kontrolne podatke bitne za svoje funkcionisanje. Proces enkapsulacije, na strani predajnika, po slojevima OSI referentnog modela, prikazan je na slici 5. Na sloju aplikacije formira se poruka koja se prosleđuje transportnom sloju. Transportni sloj deli poruku na segmente i svaki segment oprema kontrolnim podacima TC. Zatim segmente prosleđuje mrežnom sloju. Mrežni sloj dodajući segmentima kontrolne podatke mrežnog sloja formira pakete i predaje ih sloju linka. Sloj linka se u opštem slučaju sastoji od dva podsloja: MAC i podsloj logičkog linka (eng. Logical Link Control – LLC). LLC nema svrhu kada uređaj koristi samo jedan tip linka, što je slučaj u BSM pa zbog toga ovde nije

razmatran. MAC sloj dodaje na pakete MAC kontrolne podatke i formira okvire, koje prosleđuje PHY sloju. PHY sloj svakom okviru dodaje PHY kontrolne podatke i formira PHY strukturu, koju emituje. Na strani prijemnika, proces dekapsulacije prati obrnutu šemu od procesa enkapsulacije.



Slika 5. Enkapsulacija po slojevima OSI referentnog modela

E_b metriku je moguće definisati sa aspekta bilo kojeg sloja. Recimo, sa aspekta mrežnog sloja bitno je koliko energije se potroši za prenos jednog bita koji pripada paketu, a kontrolni podaci na PHY i MAC slojevima se vide kao dodatan tošak. Pošto je u BSM prenos podataka zasnovan na paketskom prenosu, ovde se koristi E2 metrika - energija po bitu korisnih podataka, $E_{b,data}$, pri čemu se pod korisnim podacima podrazumevaju podaci koje viši sloj predaje MAC sloju. Ako je ukupna dužina PHY strukture l bita, a dužina PHY i MAC kontrolnih podataka l_c bita, tada su E_b i $E_{b,data}$ metrike povezane sledećom formulom

$$E_{b,data} = \frac{l}{l-l_c} E_b \quad (11)$$

Ako se koristi ARQ tehnika, potrebno je da se uračuna energija za svaki pokušaj slanja paketa. Kako se odluka o retransmisiji donosi na nivou paketa, svaki bit u paketu, bez obzira na ispravnost, imaće isti broj pokušaja kao i ceo paket. Prosečan broj pokušaja slanja po paketu, \bar{n} , je statistička veličina. E2 metrika koja uračunava retransmisije je ukupna energija po bitu korisnih podataka [63], data formulom (12).

$$E_{b,data,tot} = \bar{n} \cdot E_{b,data} = \bar{n} \frac{l}{l-l_c} E_b \quad (12)$$

Ukoliko su od interesa samo paketi koji su posle svih dozvoljenih pokušaja uspešno preneti, E2 metrika koja izražava ukupnu energiju potrošenu po bitu uspešno prenetih korisnih podataka je

$$E_{b,data,tot}^{suc} = \frac{1}{1-e} E_{b,data,tot} = \frac{1}{1-e} \cdot \bar{n} \cdot \frac{l}{l-l_c} E_b, \quad (13)$$

gde e predstavlja verovatnoću gubitka paketa.

Ukoliko je od interesa optimalna pokrivenost nekog područja sa minimalnim utroškom energije za komunikaciju definiše se metrika koja pokazuje koliko je energije potrebno uložiti po bitu podataka od interesa po jedinici TX-RX rastojanja, E_b^{DR} (eng. *Energy Distance Ratio per bit*), [62], formula (14).

$$E_b^{DR} = \frac{E_b^*}{d} \quad (14)$$

E_b^* je energija po bitu podataka od interesa, a d je TX-RX rastojanje.

3.2 Metrike za pouzdanost

Više različitih metrika može da se koristi za pouzdanost u zavisnosti od komunikacionog sloja na kojem se pouzdanost razmatra. Prvo su izložene metrike za pouzdanost na PHY sloju, a zatim i na MAC sloju. U zavisnosti da li posmatrani proces ispunjava uslove ergodičnosti ili ne, metrike za pouzdanost se dele na one izražene očekivanom vrednošću slučajne promenljive i one koje su izražene verovatnoćom da će slučajna promenljiva da uzme vrednost van definisanih granica, verovatnoća *outage*-a. Kombinacijom *outage*-a i očekivane greške može da se izrazi pouzdanost kod kanala sa kombinovanim sporim i brzim fejdning procesima [136, 64].

Srednji SNR

SNR je najbolje obrađena, ujedno i osnovna metrika, koja se koristi za izračunavanje složenijih metrika u digitalnim komunikacijama. SNR se lako meri na RX strani i direktno je povezan sa verovatnoćom ispravnog prijema signala pa se često koristi kao dobar indikator pouzdanosti prenosa. U slučaju postojanja fejdning smetnji na kanalu, SNR je varijabilna veličina, γ , sa statističkom raspodelom $p_\gamma(\gamma)$, a srednji SNR, $\bar{\gamma}$, može da se modeluje očekivanim SNR-om, (15).

$$E\{\gamma\} = \int_0^\infty \gamma p_\gamma(\gamma) d\gamma \quad (15)$$

Verovatnoća outage-a

Ukoliko je proces promene slabljenja spor i nije ispunjen uslov ergodičnosti, definiše se verovatnoća *outage*-a. Neka je prag osetljivosti prijemnika definisan kao minimalan srednji SNR u toku simbola na ulazu RX da bi signal bio zadovoljavajuće dekodovan - $\gamma_{s,min}$. *Outage* nastupa kada je iz nekog razloga γ_s na ulazu manji od $\gamma_{s,min}$. Verovatnoća da je došlo do *outage*-a, data je formulom (16).

$$p_{out,\gamma_s}^{\gamma_{s,min}} = \Pr\{\gamma_s < \gamma_{s,min}\} = \int_0^{\gamma_{s,min}} p_{\gamma_s}(\gamma) d\gamma \quad (16)$$

Srednji BER

Zavisnost verovatnoće greške u prijemu bita (BER ili p_b) od SNR-a je nelinearna i računa se individualno za svaku modulaciju. U poglavlju 2.3.1 je naznačeno da, u zavisnosti od modulacije, p_b je proporcionalno $e^{-\gamma}$, kod FSK i DPSK sa nekoherentnom demodulacijom, ili ima oblik $aQ(\sqrt{c\gamma})$ kod M-ASK, M-PAM, MSK, M-PSK modulacija. Ukoliko je fajding proces prisutan na bežičnom kanalu, srednji BER je odgovarajuća metrika i može da se modeluje očekivanom vrednošću za BER, (17).

$$E\{p_b(\gamma)\} = \int_0^{\infty} p_b(\gamma) p_{\gamma_s}(\gamma) d\gamma \quad (17)$$

Ovde se uvodi pretpostavka da je fajding proces takav da je γ konstantno u toku emisije jednog bita, a da se menja od bita do bita.

Outage bita

Ukoliko su prisutni i brzi i spori fajding procesi na kanalu, zbog sporih fajding procesa posmatrane sekvence bita mogu da ne zadovoljavaju uslov ergodičnosti pa metrika srednjeg BER-a ne modeluje pouzdanost zadovoljavajuće. Zato se uvodi metrika BER outage-a – verovatnoća da će BER da bude veći od predefinisane vrednosti [136],

$$p_{out,p_b}^{p_b^*} = \Pr\{p_b(\gamma_s) \geq p_b^*\} \quad (18)$$

Ovde se uvodi pretpostavka da se γ_s menja zbog sporog fajding procesa.

Srednji PER

Sa aspekta mrežnog sloja, kojem MAC sloj pruža uslugu prenosa paketa, korisnija informacija

od garantovanog BER-a je garantovani PER.

Za osnovnu analizu bežičnog kanala može da se koristi AWGN (eng. *Additive White Gaussian Noise*) model kanala. Kod AWGN kanala slabljenje je konstantno, a BER ima identičnu i nezavisnu raspodelu, (eng. Independent and Identical Distributed – i.i.d.). Verovatnoća da će paket dužine l bita da bude primljen sa greškom, p_p , jednaka je verovatnoći da će bar jedan bit iz paketa da bude primljen sa greškom, (19).

$$p_p(\gamma) = 1 - (1 - p_b(\gamma))^l \quad (19)$$

Bežični kanal kod BSM ima kvazi-statičku prirodu [78] i može da se modeluje kao blok-fejding kanal bez selekcije po frekvenciji. Drugim rečima, slabljenje kanala je promenljivo ali u toku trajanja bloka može da se aproksimira konstantom, a blok je dovoljno dugačak da obuhvati emisiju celog paketa. Ovakva pretpostavka je zadovoljavajuća kod statičkih BSM i BSM kod kojih se emisija vrši malim bitskim brzinama. Kako je trenutni PER promenljiva veličina, odgovarajuća metrika je srednja vrednost za PER i može da se modeluje očekivanom vrednošću verovatnoće pogrešnog prijema paketa, (20).

$$E\{p_p(\gamma)\} = \int_0^\infty p_p(\gamma)p_{\gamma_s}(\gamma)d\gamma \quad (20)$$

Ukoliko se pretpostavi Rayleigh blok fejding model kanala, očekivani PER može da se aproksimira sa (21), gde su k_1 i k_2 specifični parametri zavisni od primenjene modulacije, $\bar{\gamma}$ je operator srednje vrednosti [78, 79].

$$E\{p_p(\gamma)\} \approx 1 - \exp\left(\frac{k_2 - k_1 \ln(l)}{\bar{\gamma}}\right) \quad (21)$$

Aproksimacija je zadovoljavajuća kada su paketi dugački ili kada je SNR veliki. Za BFSK modulaciju sa nekoherentnom detekcijom $k_1 = 2$ i $k_2 \approx 2 \cdot (0,577 + \ln(0,5))$.

Outage paketa

Kod sporo promenljivih kanala sa prisutnim procesom *shadowing*-a, proces slanja konačnog broja paketa ne prolazi kroz sva fajding stanja kanala što dovodi do toga da proces nije ergodički. Ergodičnost je pretpostavka kod modelovanja srednjeg PER-a očekivanom vrednošću. Nepostojanje ergodičnosti za posledicu ima da komunikacioni sistem sa prisutnim *shadowing*-om ne može da bude evaluiran srednjim PER-om zadovoljavajuće. Zato se uvodi metrika *Outage* paketa (eng. *Packet Error Outage* - PEO) [64] i definiše se kao verovatnoća da će PER da pređe

neki zadati nivo, (22).

$$p_{out,p_p}^{p_p^*} = \Pr\{p_p(\gamma) \geq p_p^*\} \quad (22)$$

Verovatnoća gubitka paketa

Da bi se poboljšala pouzdanost prenosa, ukoliko dođe do greške u prijemu paketa, može da se pokuša sa ponovnim slanjem paketa. Ukoliko paket i posle maksimalno dozvoljenog broja pokušaja i dalje nije ispravno prenet, proglašava se izgubljenim. Kako na MAC sloju mogu da se koriste ARQ tehnike, sa stanovišta viših slojeva, interesantnija je metrika gubitka paketa od srednjeg PER-a ili PEO-a [54, 79]. Svakako, da bi se izrazio gubitak paketa potrebno je da PER bude poznat.

Na osnovu (19), za AWGN kanal sa k pokušaja slanja paketa, verovatnoća gubitaka paketa, e , je

$$e(\gamma, k) = \Pr\{\text{loss}_k\} = \left(p_p(\gamma)\right)^k. \quad (23)$$

Ukoliko na bežičnom kanalu postoji spori fejdning proces bez selekcije po frekvencijama, i kanal može da se modeluje blok fejdning modelom, uz pretpostavku da je blok dovoljno dugačak da sve kopije jednog paketa mogu da se pošalju u okviru jednog bloka, definiše se srednji gubitak paketa, koji je dat formulom (24)

$$E\{e(\gamma, k)\} = \Pr\{\text{loss}_k\} = \left(E\{p_p(\gamma)\}\right)^k \quad (24)$$

$E\{p_p(\gamma)\}$ je dato formulom (20). Ukoliko se pretpostavi Rayleigh blok fejdning model kanala, na osnovu (21), srednji gubitak paketa može da se aproksimira formulom (25).

$$E\{e(\gamma, k)\} \approx \left(1 - \exp\left(\frac{k_2 - k_1 \ln(l)}{\bar{\gamma}}\right)\right)^k \quad (25)$$

3.3 Modeli za potrošnju energije

Kako snaga koju troši RX može da se aproksimira konstantom u najvećem broju slučajeva, glavni problem je kako modelovati TX potrošnju. Do sada je predloženo nekoliko modela za TX potrošnju, a problem je posmatran sa aspekta snage koju angažuje TX da bi na RX strani bio ostvaren potreban SNR pri čemu se TX i RX nalaze na nekom rastojanju. Dakle, modeli

uključuju kako transformaciju snage koju TX uzima iz baterije u izlaznu snagu signala tako i prostornu komponentu slabljenja kanala.

Pošto je energija proizvod snage i vremena, uz pretpostavku da je trajanje transmisije isto na TX i RX strani, od formule date u veličini snage, množenjem vremenom se lako dolazi do formule date u veličini energije. U nastavku su neki modeli dati u energetskej formi dok su drugi dati u formi snage.

U [65] je predložen FORM (eng. *First Order Radio Model*) model, dat formulom (26), koji snagu TX elektronike modeluje konstantom, a snagu PA i slabljenje kanala objedinjuje proizvodom konstante i kvadrata TX-RX rastojanja.

$$E_{TX} = l(E_{elec} + \epsilon_{amp}d^2) \quad (26)$$

Kvadrat se javlja na osnovu pretpostavke da je prostorno slabljenje kanala dato modelom u slobodnom prostoru. E_{TX} je energija koju TX troši za emisiju l bita, E_{elec} je energija koju troši TX elektronika, a ϵ_{amp} je konstanta koja zavisi od PA. Kao primer, u [65] su uzete vrednosti $E_{elec} = 50$ nJ/b i $\epsilon_{amp} = 100$ pJ/b/m².

Isti autori su unapredjenu verziju FORM modela predstavili u [66]. Ovaj model pravi razliku u potrošnji u zavisnosti da li je TX-RX rastojanje manje od nekog praga, d_0 , pa je model prost FORM ili je rastojanje veće od praga pa se za modelovanje slabljenja kanala računava i efekat višestruke propagacije signala što uzrokuje da slabljenje zavisi od 2. do 6. stepena rastojanja, u ovom slučaju je uzet 4. stepen. Unapredjeni FORM je dat formulom (27).

$$E_{TX} = \begin{cases} l(E_{elec} + \epsilon_{fs}d^2), & d < d_0 \\ l(E_{elec} + c_{mp}d^4), & d \geq d_0 \end{cases} \quad (27)$$

Kao primer, u [66] su uzete sledeće vrednosti parametara modela: $E_{elec} = 50$ nJ/b, $\epsilon_{fs} = 10$ pJ/b/m², $c_{mp} = 0,0013$ pJ/b/m⁴.

U [68] je predstavljen realističan model, koji uzima u obzir PA efikasnost, η , dobijenu ekstrakcijom podataka iz korisničkih uputstava stvarnih RPP-a, konkretno za CC1000 i CC24000. Model je dat u formi snage, formula (28).

$$p_{TX} = P_0 + \frac{d^\alpha}{\eta} \quad (28)$$

P_0 je fiksna snaga koju TX troši bez obzira na nivo snage signala na izlazu, a eksponent $\alpha \geq 2$

zavisi od primenjenog modela slabljenja kanal.

U [69] je predložen ED (eng. *Efficiency Degradation*) model. ED model za razliku od prethodnih modela, koji se karakterišu kao modeli sa fiksnom efikasnošću, uzima u obzir promenjivu PA efikasnost u zavisnosti od nivoa izlaznog signala. ED model je dat formulom (29).

$$p_{TX} = \alpha_{TX} + \rho_{TX} \cdot d^{n/m} \quad (29)$$

α_{TX} , ρ_{TX} su konstante, $n \geq 2$ je faktor slabljenja kanala, a m je faktor degradacije. Teorijska analiza u [69] pokazuje da je $m \geq 2$ dok simulacija realnih TX pokazuje da je $m = 2,6$ za PA klase A, i $m = 2,8$ za PA klase C.

3.3.1 L-model

Za potrebe analize odnosa energetske efikasnosti i kvaliteta servisa u ovoj disertaciji razvijen je L-model [70, 71, 137] za potrošnju energije i izložen je detaljno u nastavku. L-model uzima slabljenje kanala u kompaktnoj formi, uračunavajući i prostornu i vremensku komponentu. L-model transformaciju snage, koju TX uzima iz baterije u izlaznu snagu signala, modeluje preko *matching* teoreme kao u [69].

L-model je dat formulom (39)

$$p_{TX}(L) = P_0 + \frac{\rho_{PA}}{\sqrt{L}} \quad (30)$$

P_0 je fiksni član i definiše se za zadatu osetljivost prijemnika S . Osetljivost prijemnika se definiše kao minimalan SNR na prijemniku da bi signal bio zadovoljavajuće dekodovan. ρ_{PA} je koeficijent koji zavisi od S . Za radio-primopredajnike koji se koriste u BSM proizvođači uvek definišu maksimalnu i minimalnu potrošnju u TX režimu, $p_{TX,max}$ i $p_{TX,min}$, respektivno, kao i maksimalnu i minimalnu izlaznu snagu, $p_{tx,max}$ i $p_{tx,min}$, respektivno. Maksimalno i minimalno slabljenje kanala preko kojeg je moguće zadovoljiti osetljivost S , je $L_{max} = S/p_{tx,max}$, odnosno, $L_{min} = S/p_{tx,min}$, respektivno. Na osnovu sistema jednačina

$$p_{TX,max} = P_0 + \frac{\rho_{PA}}{\sqrt{L_{max}}}, \quad p_{TX,min} = P_0 + \frac{\rho_{PA}}{\sqrt{L_{min}}}$$

Dolazi se do formula za izračunavanje P_0 i ρ_{PA} :

$$P_0 = \frac{p_{TX,min}\sqrt{L_{min}} - p_{TX,max}\sqrt{L_{max}}}{\sqrt{L_{min}} - \sqrt{L_{max}}},$$

$$\rho_{PA} = \frac{\sqrt{L_{max} \cdot L_{min}}}{\sqrt{L_{min}} - \sqrt{L_{max}}} (p_{TX,max} - p_{TX,min}).$$

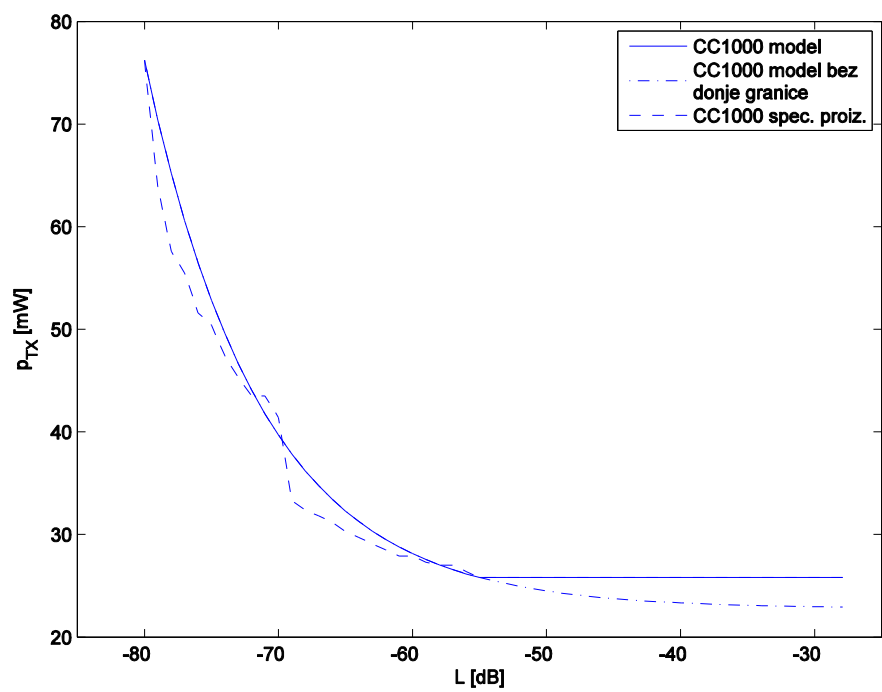
Parametri za CC1000, CC1101, CC2420 i AT86RF212 BSM radio-primopredajnike bitni za izračunavanje parametara L-modela kao i parametri L-modela, prikazani su u tabeli 5. Osetljivost je izabrana tako da bude nešto veća od one koju specificira proizvođač, da bi bila obezbeđena margina za šum i smetnje.

Tabela 5. L-model parametri za različite radio-primopredajnike

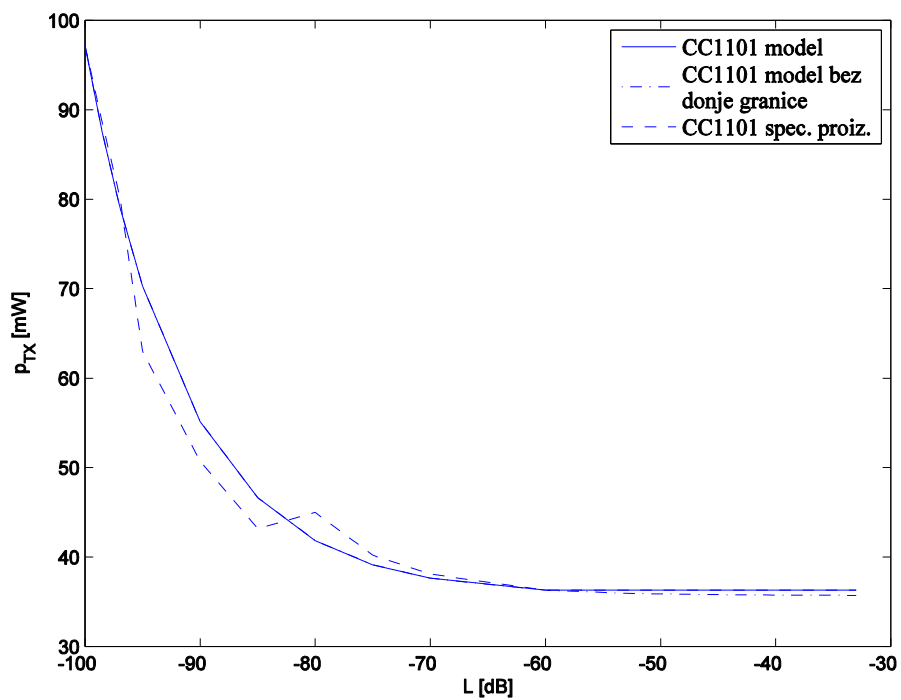
	CC1000	CC1101	CC2420	AT86RF212
$p_{TX,max}$ [mW]	76.2	97.2	52.2	73.8
$p_{TX,min}$ [mW]	25.8	36.3	25.5	31.5
$p_{tx,max}$ [dBm]	5	10	0	10
$p_{tx,min}$ [dBm]	-20	-30	-25	-11
S [dBm]	-85	-90	-90	-90
frequency [MHz]	868	868	2400	915
L_{max} [dB]	-90	-100	-90	-100
L_{min} [dB]	-65	-60	-65	-79
P_0 [mW]	22.797	35.685	23.909	27.361
ρ_{PA} [mW*dB ^{1/2}]	0.00169	0.00062	0.000895	0.0004644

Na slikama 6-9 prikazana je zavisnost ukupne TX snage od slabljenja kanala za CC1000, CC1101, CC2420 i AT86RF212 BSM radio-primopredajnike, respektivno. Punom linijom su prikazane krive dobijene po L-modelu; crta-tačka-crta linijom su prikazane krive dobijene po L-modelu, uz pretpostavku da izlazna snaga može da se podesi do 0 dBm; isprekidanom linijom je prikazana kriva koja spaja tačke iz korisničkog uputstva. Na slikama 10 i 11 date su apsolutna i relativna greška, respektivno. Greške su izračunate u tačkama koje proizvođač definiše.

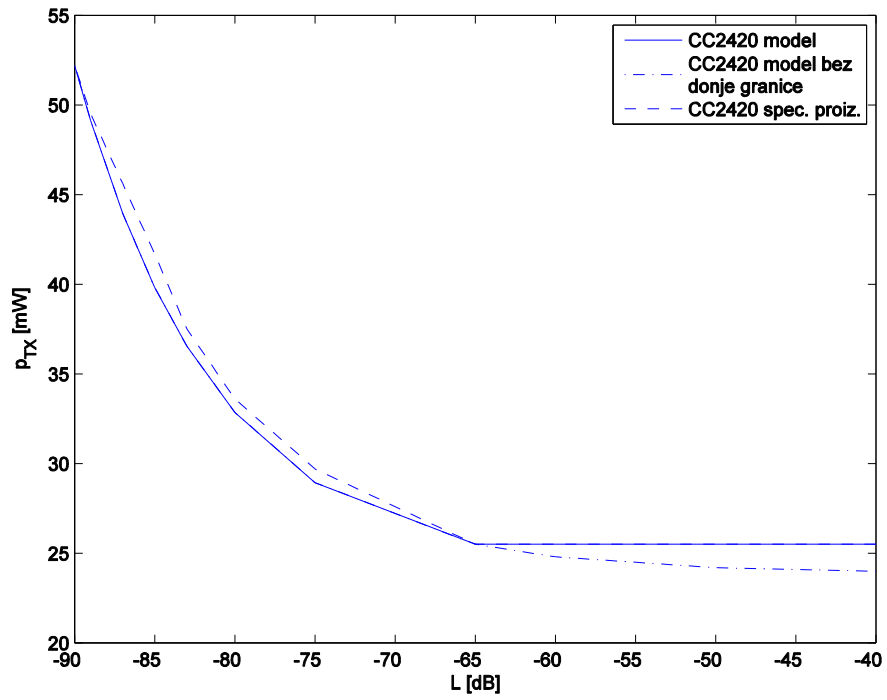
Poređenjem L-modela i hipotetičkog L-modela, kada izlazna snaga može da se podešava do 0 mW, vidi se da za slabljenje kanala manje od L_{min} postoji izvesno rasipanje energije. Zato su definisana 3 L regiona, prikazana na slici 12. Prvi region je Region rasipanja energije. Karakteriše ga da je $L < L_{min}$ pa izlazna snaga ne može dovoljno precizno da se prilagodi slabljenju kanala, odnosno, signal na prijemu je uvek veći od RX osetljivosti. Drugi region je Region prilagođenja snage. Karakteriše ga da je $L_{min} < L < L_{max}$ pa izlazna snaga može da se prilagodi slabljenju kanala. Treći region je Region nemoguće komunikacije. Karakteriše ga da je $L > L_{max}$ pa izlazna snaga ne može da se podesi tako da zahtevana RX osetljivost bude zadovoljena, odnosno, signal na prijemu je uvek nižeg nivoa od osetljivosti.



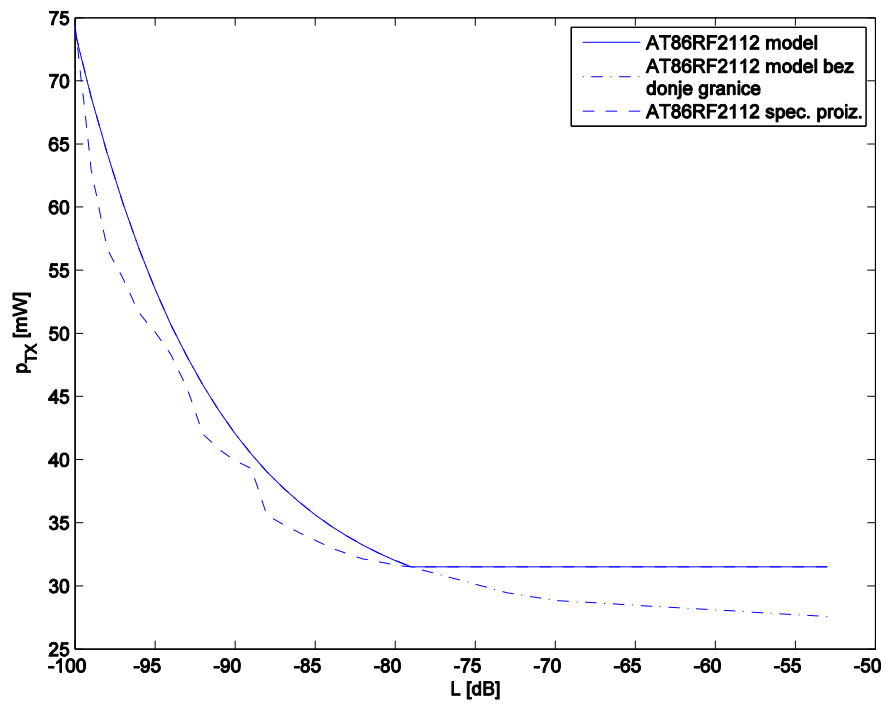
Slika 6. $p_{TX}(L)$ za CC1000 i osetljivost prijemnika od -85 dB



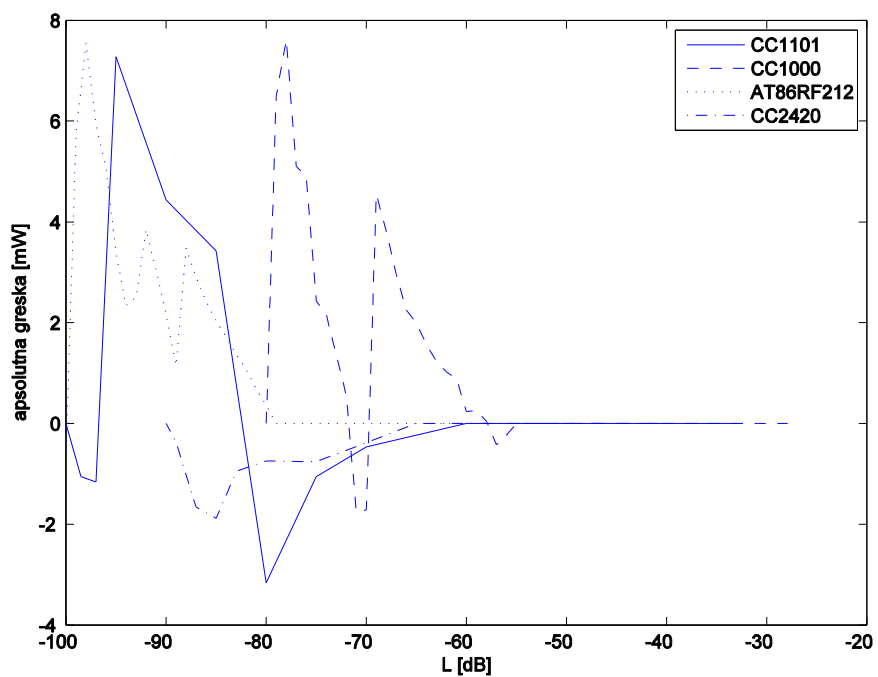
Slika 7. $p_{TX}(L)$ za CC1101 i osetljivost prijemnika od -90 dB



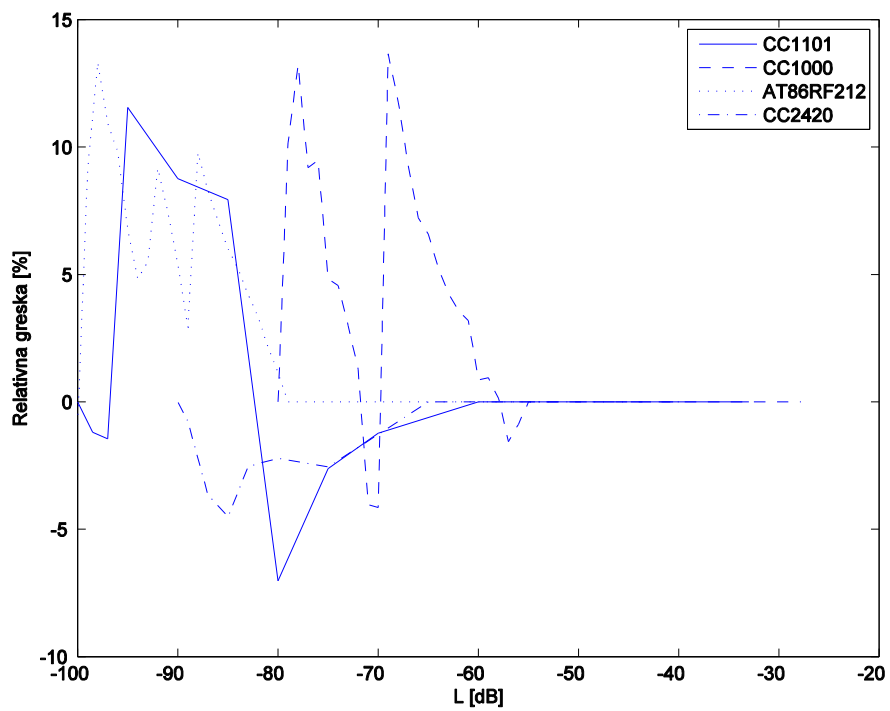
Slika 8. $p_{TX}(L)$ za CC2420 i osetljivost prijemnika od -90 dB



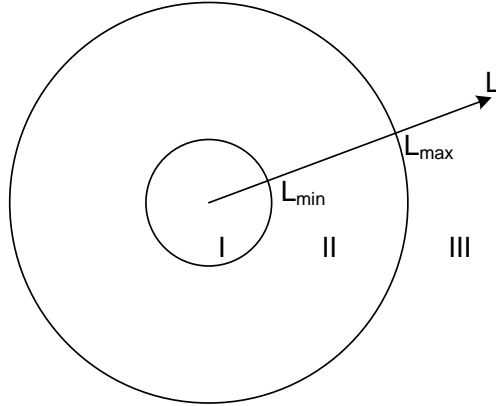
Slika 9. $p_{TX}(L)$ za AT86RF2112 i osetljivost prijemnika od -90 dB



Slika 10. Apsolutno odstupanje L-modela od specifikacije proizvođača



Slika 11. Relativno odstupanje L-modela od specifikacije proizvođača



Slika 12. L regioni komunikacije

Dobra strana L -modela je što slabljenje kanala uzima u celosti, sadrži i prostornu i vremensku komponentu što mu daje prednost u odnosu na prethodne modele, koji posmatraju samo prostornu komponentu slabljenja. Međutim, i kod njega su procesi u predajniku objedinjeni sa procesima koji uzrokuju promenljivo slabljenje bežičnog kanala. Ovakav pristup ne omogućava zasebnu analizu predajnika i kanala. U nastavku su prikazana dva modela potrošnje predajnika, koji ne zavise od kanala.

Prvi model je predstavljen u [67]. Model pretpostavlja da je PA najznačajniji potrošač u predajniku i ne uzima u obzir ostale TX komponente. Model se zasniva na aproksimaciji krive zavisnosti ukupne snage predajnika od izlazne snage deo po deo linearnom funkcijom. Model je dat formulom (31).

$$p_{TX} = \beta \cdot p_{tx} + P^*, \quad 0 \leq p_{tx} \leq p_{tx,max} \quad (31)$$

P^* je ukupna statička snaga, a $0 \leq \beta \leq 2$. Ako je efikasnost $\eta = p_{tx}/p_{TX}$, onda je $\eta_{max} = (\beta + P^*/p_{tx,max})^{-1}$, a $0,2 \leq P^*/p_{tx,max} \leq 1$.

Drugi model, RFP-model (eng. *Rised Fractional Power*) [72], je razvijen za potrebe analize odnosa energetske efikasnosti i kvaliteta servisa u ovoj disertaciji i izložen je detaljno u nastavku. RFP je uspešno primenjen i u analizi isplativosti kooptivnih komunikacija [73, 74].

3.3.2 RFP-model

Kod ovog modela se polazi od pretpostavke da je TX dat blok šemom prikazanoj na slici 3a. Kako je PA dominantan potrošač prvo je razmotren model potrošnje pojačavača snage a zatim i celokupnog predajnika.

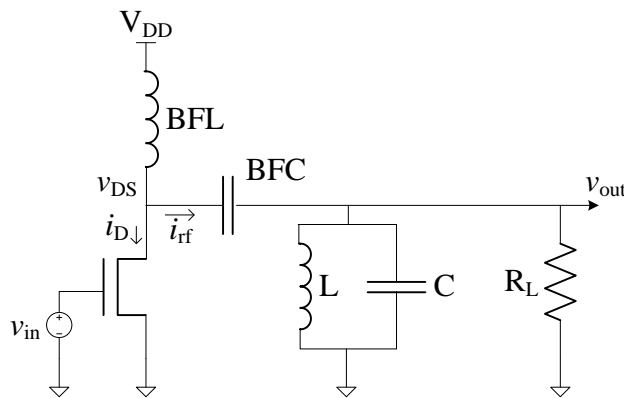
Model potrošnje pojačavača snage

Pojačavač snage se dizajnira tako da zadovolji dva suprotna cilja. Prvi cilj je da PA efikasnost, data formulom (5), bude što veća, a drugi cilj je da PA radi u linearnom režimu. Kompromis između ova dva cilja je rezultovao razvojem nekoliko klasa PA, kao što su A, AB, B, C, D, E i F, videti npr. [75]. U klasama A, AB i B tranzistor izlaznog stepena PA radi u linearnom režimu i ne narušava envelopu ulaznog signala. RFP razmatra linearne pojačavače snage u klasama A, AB i B, sa promenljivom izlaznom snagom, koju je moguće podesiti u opsegu, $p_{tx} \in [p_{tx,min}, p_{tx,max}]$.

Opšta šema pojačavača snage je prikazana na slici 13. Kod RFP-modela su učinjene dve pretpostavke koje se tiču pojačavača snage:

1. Tranzistor u izlaznom stepenu PA provodi struju od 0 V do V_{DD} izlaznog napona
2. *Drain* (kolektor kod BJT) napon i struja tranzistora u izlaznom stepenu PA su $v_{DS} = V_{DS} + I_{rf} \cdot R_L \sin(\omega_0 t)$ i $i_D = I_D + I_{rf} \sin(\omega_0 t)$, respektivno, gde je $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 je frekvencija nosioca signala, a trajanje simbola $T_s \ll f_0^{-1}$. V_{DS} i I_D su napon i struja u radnoj tački PA, R_L je izlazna otpornost, a I_{rf} je amplituda struje kroz antenu.

Izlazni tranzistor provodi ako je $v_{DS}(t) > 0$ i $i_D > 0$. Deo periode nosioca u kojem izlazni tranzistor vodi zove se ugao provođenja, 2ϕ . U nastavku je pokazano kako izbor V_{DS} , I_D i V_{DD} utiču na zavisnost snage koju PA troši i PA efikasnosti od izlazne snage, $p_{PA}(p_{tx})$ i $\eta_{PA}(p_{tx})$, respektivno.



Slika 13. Opšta šema pojačavača snage

Kod PA klase A ($2\phi = 2\pi$) izlazni napon je $v_{out} = -I_{rf} \cdot R_L \sin(\omega_0 t)$ i usrednjavanjem po T_s dolazi se do $p_{tx} = 0,5I_{rf}^2 R_L$. Prema tome

$$p_{PA} = V_{DD}I_D, I_{rf} = \sqrt{\frac{2p_{tx}}{R_L}}. \quad (32)$$

Za PA klase A sa promenljivom izlaznom snagom, $I_{rf,\min} \leq I_{rf} \leq I_{rf,\max} \Rightarrow \eta_{PA} \in (0,0,5)$. Izlazna snaga može da se podešava na 3 različita načina [75-77]:

1. Fiksna radna tačka i fiksni napon napajanja, $(V_{DS}, I_D) = (I_{rf,\max}R_L, I_{rf,\max})$, $V_{DD} = I_{rf,\max}R_L$. Na osnovu (32) sledi $p_{PA} = const$, a na osnovu (5) sledi $\eta_{PA} \sim p_{tx}$.
2. Podešavanjem radne tačke uz fiksni napon napajanja, $(V_{DS}, I_D) = (I_{rf}R_L, I_{rf,\max})$, $V_{DD} = I_{rf,\max}R_L$. (32) $\Rightarrow p_{PA} \sim \sqrt{p_{tx}}$, (5) $\Rightarrow \eta_{PA} \sim \sqrt{p_{tx}}$.
3. Podešavanjem radne tačke i napona napajanja, $(V_{DS}, I_D) = (I_{rf}R_L, I_{rf})$, $V_{DD} = I_{rf}R_L$. (32) $\Rightarrow p_{PA} \sim p_{tx}$, (5) $\Rightarrow \eta_{PA} = const$.

Kod PA klase B ($2\phi = \pi$) izlazni stepen se sastoji od dva transformatora (sa stepenom transformacije a) i dva push-pull tranzistora [75, 76]. Usrednjavanjem po T_s

$$p_{PA} = \frac{2}{\pi} V_{DD}I_{rf}, p_{tx} = \frac{a^2}{2} I_{rf}^2 R_L, \quad (33)$$

[75,76]. Kod PA klase B $\eta_{PA} \in (0, \pi/4)$, za $I_{rf} \in (0, \frac{V_{DD}}{a^2 R_L})$. Moguća su dva načina podešavanja izlaznog stepena:

1. Fiksni napon napajanja, $V_{DD} = I_{rf,\max} a^2 R_L$, (33) $\Rightarrow p_{PA} \sim \sqrt{p_{tx}}$, (5) $\Rightarrow \eta_{PA} \sim \sqrt{p_{tx}}$.
2. Podešavanje napona napajanja, $V_{DD} = I_{rf} a^2 R_L$, (33) $\Rightarrow p_{PA} \sim p_{tx}$, (5) $\Rightarrow \eta_{PA} = const$.

PA klase AB ($\pi \leq 2\phi \leq 2\pi$) je hibrid PA klase A i PA klase B i moguća su dva načina da se podesi izlazni stepen [75-77]:

1. Podešavanjem radne tačke pri fiksnom uglu provođenja i fiksnom naponu napajanja, $(V_{DS}, I_D) = (-I_{rf}R_L \cos \phi, -I_{rf} \cos \phi)$, $V_{DD} = \frac{1}{2\pi} R_L I_{rf,\max} (2\phi - \sin 2\phi)$. Tada je $p_{PA} = V_{DD}I_D \Rightarrow p_{PA} \sim \sqrt{p_{tx}}$, tako da iz (5) $\Rightarrow \eta_{PA} \sim \sqrt{p_{tx}}$.
2. Podešavanjem radne tačke i napona napajanja uz fiksni ugao provođenja, $(V_{DS}, I_D) = (-I_{rf}R_L \cos \phi, -I_{rf} \cos \phi)$, $V_{DD} = \frac{1}{2\pi} R_L I_{rf} (2\phi - \sin 2\phi)$. Tada je $p_{PA} = V_{DD}I_D \Rightarrow p_{PA} \sim p_{tx}$, tako da iz (5) $\Rightarrow \eta_{PA} = const$.

Uzimajući u obzir snagu koji troši PA i načine za prilagođenje izlazne snage pojačavača snage, predložen je model dat formulom (34).

$$p_{PA} = P_{PA}^* + \Delta p_{PA} \left(\frac{p_{tx}}{p_{tx,max}} \right)^v ; \quad v \in \{0, 0,5, 1\}, \quad p_{tx} \in [p_{tx,min}, p_{tx,max}] \quad (34)$$

P_{PA}^* i Δp_{PA} su konstante sa jedinicom mere [W]. P_{PA}^* predstavlja minimalnu PA potrošnju, a Δp_{PA} predstavlja promenu ukupne PA potrošnje od minimalne do maksimalne. EkspONENT v zavisi od primenjenog načina prilagođenja izlaznog stepena PA. Količnik $\frac{p_{tx}}{p_{tx,max}}$ normalizuje argument operacije $(.)^v$ na opseg $\left[\frac{p_{tx,min}}{p_{tx,max}}, 1 \right]$, dok je normalizovani argument broj bez jedinice mere. Iako je u praksi p_{tx} diskretna veličina, ovde je uvedena pretpostavka da p_{tx} može kontinualno da se podešava u opsegu $p_{tx} \in [p_{tx,min}, p_{tx,max}]$ što omogućava analizu ukupne potrošnje predajnika u nastavku.

Model potrošnje predajnika

Na osnovu (1) i (34), konstruisan je model ukupne TX potrošnje:

1. Ukupna konstantna TX snaga je uračunata u minimalnoj ukupnoj TX snazi, $p_{TX,min}$, analognoj P_{PA}^* iz (34) i odgovara TX potrošnji za minimalu izlaznu snagu, $p_{tx,min}$.
2. Ukupna promena TX snage je modelovana razlikom između maksimuma TX snage, $p_{TX,max}$, i minimuma TX snage, $p_{TX,min}$. Ukupna promena je jednaka Δp_{PA} iz (34) i uračunava promene p_{TX} uzrokovane promenom izlazne snage u opsegu $p_{tx} \in [p_{tx,min}, p_{tx,max}]$.
3. EkspONENT v uzima vrednosti iz intervala $v \in [0,1]$, a ne iz diskretnog skupa $\{0, 0,5, 1\}$ kao u (34), što omogućava modelovanje uticaja različitih PA osobina, koje nisu uračunate u (34).

Definicija 1: RFP-model (eng. *Rised Fractional Power*) je najbolji rezultat fitovanja, u smislu najmanje kvadratne greške odstupanja, krive zavisnosti ukupne snage koju troši predajnik, p_{TX} , između tačaka minimuma i maksimuma ukupne snage predajnika, $p_{TX,min}$, $p_{TX,max}$, respektivno, od izlazne snage, $p_{tx} \in [p_{tx,min}, p_{tx,max}]$:

$$p_{TX}(p_{tx}) = p_{TX,min} + (p_{TX,max} - p_{TX,min}) \left(\frac{p_{tx} - p_{tx,min}}{p_{tx,max} - p_{tx,min}} \right)^v, \quad (35)$$

gde je $v \in [0,1]$ parametar fitovanja. Alternativno,

$$p_{TX}(p_{tx}) = p_0 + \rho x(p_{tx})^v,$$

$$\begin{aligned}
p_0 &= p_{TX,min}, \\
\rho &= p_{TX,max} - p_{TX,min}, \\
x(p_{tx}) &= \frac{p_{tx} - p_{tx,min}}{p_{tx,max} - p_{tx,min}}.
\end{aligned} \tag{36}$$

Definicija $x(p_{tx})$ u (36) omogućuje postojanje fiksne tačke $(p_{tx}, p_{TX}) = (p_{tx,min}, p_{TX,min})$, nezavisno od vrednosti v . Količnik $p_{tx,max}/p_{tx,min}$ tipično je ne manji od 20 dB pa je razlika $\frac{p_{tx}}{p_{tx,max}} - x(p_{tx}) = \frac{p_{tx,min}}{p_{tx,max}} \cdot \frac{p_{tx,max} - p_{tx}}{p_{tx,max} - p_{tx,min}}$ zanemarljiva u odnosu na $\frac{p_{tx}}{p_{tx,max}}$. Konačno, $p_{tx} \in [p_{tx,min}, p_{tx,max}] \Rightarrow x \in [0,1]$.

RFP-model realnih predajnika

U tabeli 6 su dati parametri snage radio-primopredajnika⁴, uključujući i ciljanu osetljivost prijemnika, S . Prvih šest RPP-a su pogodni za komunikaciju malim snagama u personalnom domenu i upotrebu u BSM. Zatim slede dva RPP-a koji odgovaraju IEEE 802.11 standardu (WiFi). U poslednja dva reda su dati parametri za PA koji se koriste u WiMAX predajnicima.

Tabela 6. Parametri radio-primopredajnika

Br.	RPP	Snaga [mW]					S [dBm]
		$p_{tx,min}$	$p_{tx,max}$	$p_{TX,min}$	$p_{TX,max}$	p_{RX}	
1	CC1000	0,01	3,16	25,8	76,2	28,8	-99
2	CC1101	0,001	10	36,3	97,2	46,8	-103
3	SX1211	0,079	10	39,6	84,8	9,9	-107
4	AT86RF212	0,079	10	31,5	74,4	27,6	-101
5	CC2420	0,003	1	25,5	52,2	56,4	-95
6	CC2500	0,001	1,26	29,7	64,5	39,9	-89
7	MAX2830	1,17	165,96	642	1335,6	173,6	-75
8	MAX2831	1	237,14	588	1062,6	173,6	-76

⁴ Korisnička uputstva se nalaze na sledećim Web adresama: za RPP-e 1, 2, 5 i 6 na www.ti.com; za 3 na www.semtech.com; za 4 na www.atmel.com; za 7 i 8 na para.maxim-ic.com; za PA 9 i 10 na www.analog.com

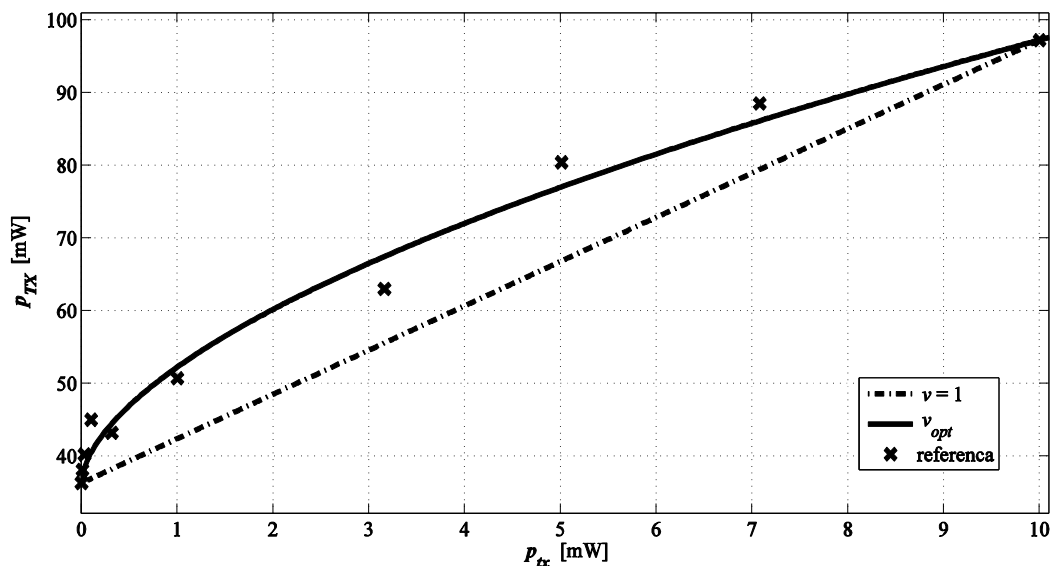
9	ADL5570	5,25	426,3	672	2310	/	/
10	ADL5571	25	741,31	1085	3650	/	/

Model (36) je fitovan korišćenjem metode nelinearnih najmanjih kvadrata, za eksponencijalni zakon, da se evaluira optimalno v , na osnovu podataka iz korisničkih uputstava. Na slici 14 je prikazana fitovana kriva za CC1101 RPP i afina aproksimacija ($v = 1$). Relativna greška fitovanja na uzorku i je

$$e_{p_{TX},rel}(i) = \frac{p_{TX}^*(i) - p_{TX}(i)}{p_{TX}^*(i)} 100\%,$$

gde je p_{TX}^* stvarna vrednost iz korisničkog uputstva, a p_{TX} je vrednost dobijena primenom modela. Srednja vrednost realtivne greške i kvadratni koren srednje kvadratne relativne greške fitovanja, na skupu od N_S uzoraka su $\mu_{p_{TX},e}$ i $\sigma_{p_{TX},e}$, respektivno

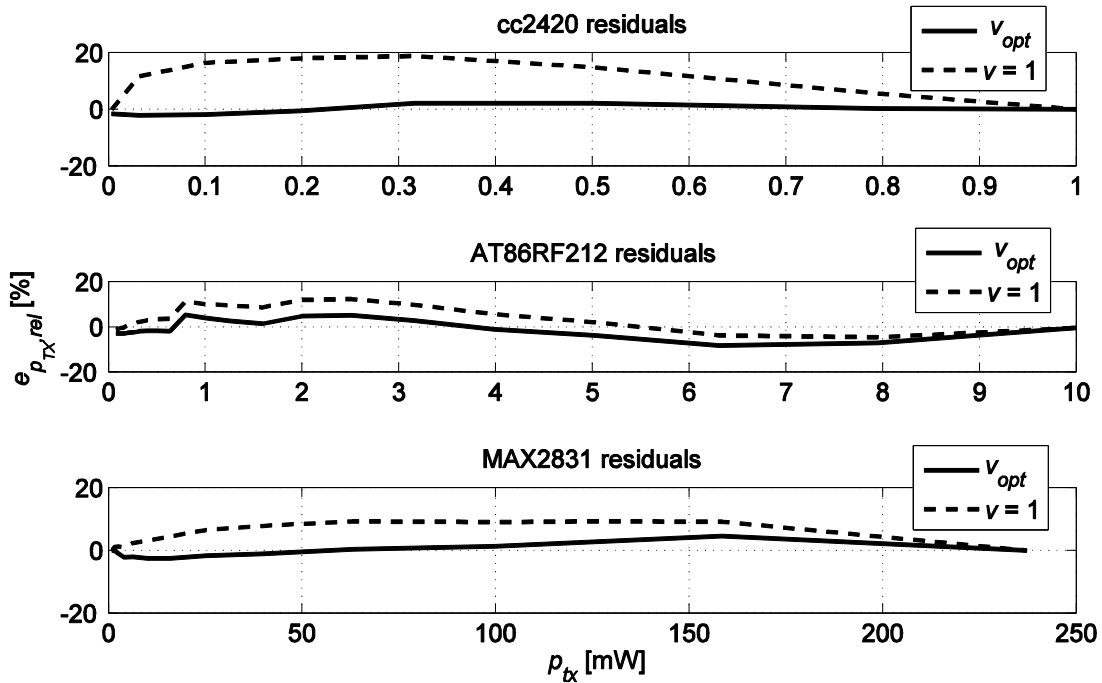
$$\mu_{p_{TX},e} = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} e_{p_{TX},rel}(i), \quad \sigma_{p_{TX},e} = \sqrt{\frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} e_{p_{TX},rel}^2(i)}.$$



Slika 14. CC1101 $p_{TX}(p_{tx})$ kriva, $v_{opt} = 0,58$

Na slici 15 je prikazana zavisnost relativne greške od $p_{TX}(p_{tx})$ krive, za CC2420, AT86RF212 i MAX2831 radio-primopredajnike, za v_{opt} i $v = 1$. U tabeli 7 su prikazani v_{opt} , kao i $\mu_{p_{TX},e}$ [%] i $\sigma_{p_{TX},e}$ [%] za v_{opt} i $v = 1$. Poslednje dve kolone sa desne strane prikazuju količnik

$\frac{p_{tx}}{p_{tx,max}}$ i parametar $q = \frac{p_{TX,min}-p_{RX}}{p_{TX,max}-p_{TX,min}}$, koji daje odnos dizajn parametara RPP-a. Količnik $\frac{p_{tx}}{p_{tx,max}}$ je veći od 20 dB, što potvrđuje uvedenu pretpostavku u formuli (36).



Slika 15. Relativna greška $p_{TX}(p_{tx})$ krive za v_{opt} i $v = 1$

Prikazani rezultati ukazuju da RFP-model bolje fituje realne predajnike od afinog modela ($v = 1$). Predloženi model važi za širok dijapazon predajne snage od personalnih komunikacija, preko WiFi-a do WiMAX-a.

Slika 14 ukazuje da oblik $p_{TX}(p_{tx})$ krive ima nezanemarljiv uticaj na potrošnju i performanse. Za $p_{TX}(v = v_{opt}) = p_{TX}(v = 1)$ fiksirane u nekoj tački, oblik krive uzrokuje $p_{tx}(v = v_{opt}) \leq p_{tx}(v = 1)$ zbog toga što

$$\frac{p_{tx}(v=v_{opt})-p_{tx,min}}{p_{tx}(v=1)-p_{tx,min}} = \left(\frac{p_{tx}(v=1)-p_{tx,min}}{p_{tx,max}-p_{tx,min}} \right)^{\frac{1}{v}-1} \leq 1,$$

pri čemu jednakost važi za slučaj $p_{tx} = p_{tx,min}$ ili $p_{tx} = p_{tx,max}$.

Tabela 7. Fitovani i izvedeni parametri modela RPP-a

RPP	v_{opt}	v_{opt} , greška [%]		$v = 1$, greška [%]		$\frac{p_{tx}}{p_{tx,max}}$ [dB]	q
		$\mu_{p_{TX},e}$	$\sigma_{p_{TX},e}$	$\mu_{p_{TX},e}$	$\sigma_{p_{TX},e}$		

CC1000	0,64	-0,56	4,69	9,84	12,62	25	1,08
CC1101	0,58	1,06	4,68	9,87	11,67	40	1,36
SX1211	0,6	-0,25	1,12	7,96	9,76	21	1,09
AT86RF212	0,77	-0,36	3,36	4,67	6,92	21	1,38
CC2420	0,48	-0,04	1,48	10,65	12,89	25	3,07
CC2500	0,55	-0,55	4,23	7,82	10,54	31	2,00
MAX2830	0,8	-0,14	0,73	3,37	4,10	21,5	1,18
MAX2831	0,67	-0,3	1,95	4,34	5,64	23,8	1,6
ADL5570	0,72	-1,01	3,04	7,96	9,95	19,1	/
ADL5571	0,69	-0,78	3,47	10,46	12,16	14,7	/

3.4 rARQ tehnika i modelovanje gubitka paketa

Iako postoje naprednije tehnike retransmisija: Go-Back-N ARQ; ARQ sa selektivnim retransmisijama [84]; Hibridne ARQ tehnike, koje nude drugačiji pristup retransmisijama uključujući FEC tehnike [83], klasičan ARQ još uvek nalazi primenu, npr. IEEE 802.15.4 standard predviđa upotrebu klasičnog ARQ sa maksimalnim brojem retransmisija inicijalno postavljenim na 3. Adaptivni ARQ kod kojeg je maksimalan broj retransmisija promenjiva često se koristi u sprezi sa drugim tehnikama da poboljša performanse transmisije [80, 81, 54].

Kriterijum obustavljanja retransmisija u ARQ je ispunjenost bar jednog od uslova:

1. paket je primljen korektno,
2. vremensko ograničenje do kojeg je paket trebalo da bude prenet je isteklo,
3. broj retransmisija je dostigao maksimalnu vrednost.

Broj pokušaja, k , i maksimalan broj pokušaja slanja paketa, m , u ARQ su prirodani brojevi, $k, m \in \mathbb{N}$. Ukoliko se maksimalan broj slanja koristi kao varijabla odlučivanja u nekom optimizacionom problemu, postojaće ograničenje $m \in \mathbb{N}$. Ideja rARQ tehnike je da se umesto maksimalnog broja pokušaja slanja paketa, m , koristi očekivana vrednost maksimalnog broja

pokušaja slanja paketa, $E\{m\}$, a da prilagođenjem m može da se postigne željna nenegativna vrednost iz skupa realnih brojeva, $E\{m\} \geq 0$. Upotrebom $E\{m\}$ umesto m kao varijable odlučivanja povećava se broj mogućih rešenja u prostoru ciljeva. Štaviše, rARQ uključuje i odbacivanja paketa usled preopterećenosti bafera [80, 82] (slučaj – broj slanja paketa = 0), pored neuspelih retransmisija, kao razlog gubitka paketa, dok klasičan ARQ predviđa samo neuspele retransmisije kao razlog gubitka paketa.

Za potrebe ove disertacije, konstruisan je rARQ (r potiče od skupa realnih brojeva, aludirajući na to da je kod konkretnih rARQ protokola $E\{m\}$ nenegativan realan broj) okvir sa više stepeni slobode, a podešavanjem stepena slobode dolazi se do konkretnog rARQ protokola. U nastavku je predstavljan rARQ okvir, prikazani su modeli za verovatnoću gubitka paketa i očekivani broj pokušaja slanja paketa $E\{k\}$ i kao primeri, date su dve konkretne rARQ realizacije. rARQ tehnika je upoređena sa klasičnom ARQ tehnikom.

3.4.1 Opis tehnika automatske retransmisije

Kod prikaza tehnika automatske retransmisije: klasični ARQ i rARQ, pretpostavljeno je da transmisija paketa prati Bernulijev model, sa verovatnoćom da primljeni paket ima grešku p_p , i verovatnoćom ispravnog prijema paketa $1 - p_p$. Ova pretpostavka je ispravna kod AWGN kanala, a za realistične modele bežičnog kanala treba koristiti preciznije modele za verovatnoću greške paketa.

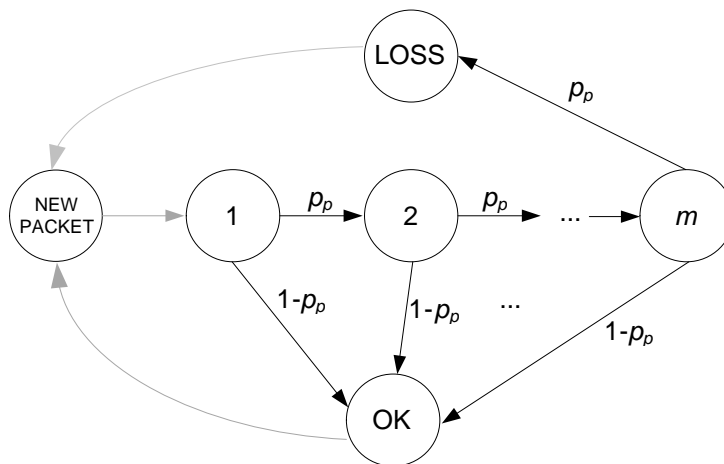
ARQ

Iako su osnovni principi rada klasičnog ARQ i modeli za gubitak paketa već predstavljeni u literaturi, ovde je radi lakšeg razumevanja kasnije izloženog rARQ, prvo izložen klasičan ARQ sa svim potrebnim detaljima.

Dijagram stanja klasične ARQ tehnike prikazan je na slici 16. Kod ove tehnike maksimalan broj pokušaja je $m \in \mathbb{N}$. Paket prolazi kroz stanje LOSS, ako ni jedan od m pokušaja slanja nije bio uspešan. U suprotnom, paket prolazi kroz stanje OK, ako je uspešno prenet iz k -tog pokušaja pri čemu $k \leq m$. Sive linije ukazuju na to da po završetku slanja bilo kojeg paketa (bilo uspešno prenetog – OK ili neuspešno prenetog - LOSS), otpočinje slanje novog paketa sa verovatnoćom 1 tako da je proces prikazan slikom 16 ergodičan.

Raspodela verovatnoće da će biti tačno $i \leq m$ pokušaja slanja paketa je

$$Pr\{i = k\} = \begin{cases} p_p^{k-1}(1 - p_p), & k < m \\ p_p^{k-1}, & k = m \end{cases} \quad (37)$$



Slika 16. Ergodičan dijagram stanja klasične ARQ tehnike

rARQ

rARQ tehnika je predstavljena dijagramom stanja na slici 17 gde se očekivani maksimalan broj slanja paketa ostvaruje na dva nivoa.

Na prvom nivou se pravi izbor da li će paket odmah da bude odbačen ili se ide u proceduru slanja. Paket se odbacuje bez ijednog pokušaja slanja ($m = 0$) verovatnoćom $1 - p_0$. Proces odbacivanja paketa u rARQ je proces sa nezavisnom i ravnomernom raspodelom dok je inteligentnija tehnika odbacivanja, koja doprinosi boljem E2-kašnjenje odnosu, prikazana u [82].

Drugi nivo razmatra pakete koji nisu odbačeni i svakom paketu dodeljuje jedan od mogućih brojeva pokušaja slanja paketa. Neka $m \in M = \{m_1, m_2, \dots, m_c\}, 1 \leq j \leq c$, gde su m_j i c prirodni brojevi. Raspodela verovatnoće da će m da uzme neku vrednost je $Pr\{m = m_j\} = p_j | \sum_{j=1}^c p_j = 1$. Broj maksimalno dozvoljenih pokušaja m_j se dodeljuje paketu verovatnoćom p_j . $E\{m\} = \sum_{j=1}^c m_j p_j$ je očekivani broj maksimalno dozvoljenih slanja paketa na drugom nivou.

Očekivani broj maksimalno dozvoljenih slanja paketa na oba nivoa objedinjeno je

$$E\{m\} = p_0 \sum_{j=1}^c m_j p_j + (1 - p_0) \cdot 0 = p_0 \sum_{j=1}^c m_j p_j \quad (38)$$

rARQ model omogućava 4 stepena slobode:

1. broj različitih maksimalno dozvoljenih pokušaja slanja paketa, c ,

2. skup različitih brojeva maksimano dozvoljenih pokušaja slanja paketa, $M = \{m_1, m_2, \dots, m_c\}$,
3. Raspodela verovatnoće da će m da ima neku vrednost iz skupa M , $\Pr\{m = m_j\} = p_j$,
4. Verovatnoća da će paket uopšte da uđe u proces slanja, p_0 .

Odgovarajućim izborom parametara modela, $E\{m\}$ može da se podesi na bilo koju vrednost iz skupa nenegativnih realnih brojeva. Karakteristika rARQ tehnike bitna za primenu u BSM je da i pored velikog broja parametara, rARQ nije mnogo zahtevnija od klasične ARQ tehnike, sa stanovišta resursa potrebnih za realizaciju.

U skladu sa dijagramom na slici 17, paket prolazi kroz stanje LOSS bilo da nijedan od m_j pokušaja slanja nije uspeo ili je paket jednostavno odbačen. U suprotnom, paket prolazi kroz stanje OK, ako je uspešno prenet iz k -tog pokušaja pri čemu je $k \leq m_j$.

Raspodela verovatnoće broja pokušaja definisana na oba nivoa data je formulama (39) i (40). Verovatnoća da će paket da bude poslat 0 puta jednaka je verovatnoći da će paket da bude odbačen, (39).

$$\Pr\{i = 0\} = 1 - p_0 \quad (39)$$

Ako paket nije odbačen, raspodela verovatnoće da će paket da bude poslat tačno $i \leq m_j$ puta je

$$\Pr\{i = k\} = \begin{cases} p_0 \cdot p_j \cdot p_p^{k-1} (1 - p_p), & k < m_j \\ p_0 \cdot p_j \cdot p_p^{k-1}, & k = m_j \end{cases}, 1 \leq j \leq c. \quad (40)$$

Sledeće definicije se odnose na oba nivo:

Def. 1: Paket koji prođe bilo kroz OK bilo kroz LOSS stanje je ANY paket.

Def. 2: Paket koji prođe kroz SEND stanje je SENT paket.

Def. 3: Paket koji prođe kroz DISCARD stanje je DISCARDED paket.

Raspodela verovatnoće broja pokušaja slanja paketa definisana samo za drugi nivo data je formulom

$$\Pr\{i = k\} = \begin{cases} p_j \cdot p_p^{k-1} (1 - p_p), & k < m_j \\ p_j \cdot p_p^{k-1}, & k = m_j \end{cases}, 1 \leq j \leq c. \quad (41)$$

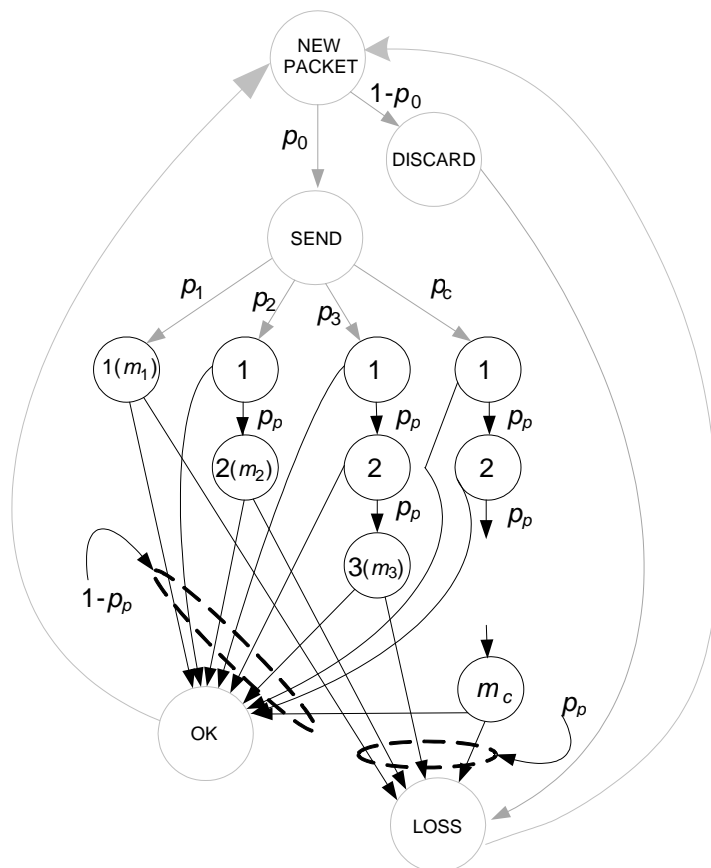
Sledeće definicije se odnose samo na drugi nivo:

Def. 4: Paket koji prođe LOSS stanje je izgubljen paket.

Def. 5: Paket koji prođe kroz SEND i OK stanja je SUCCESSFUL paket.

Def. 6: Paket koji prođe kroz SEND i LOSS stanja je UNSUCCESSFUL paket.

Def. 1, 3 i 5 takođe važe i za ARQ tehniku, a LOST i UNSUCCESSFUL paketi su kod ARQ istovetni.



Slika 17. Ergodičan dijagram stanja rARQ tehnike

3.4.2 Gubitak paketa i očekivani broj pokušaja slanja paketa

ARQ

Kod ARQ tehnike, paket je izgubljen ako su svi dozvoljeni pokušaji neuspešni. Verovatnoća da će paket da bude izgubljen, e , data je formulom (42).

$$e = \Pr\{\text{LOST}\} = p_p^m \quad (42)$$

Verovatnoća da je paket SUCCESSFUL je

$$\Pr\{\text{SUCCESSFUL}\} = \sum_{k=1}^m \Pr\{i = k\} = 1 - p_p^m, \quad (43)$$

a uslovna verovatnoća da će SUCCESSFUL paket da bude poslat tačno k puta, ako je

maksimalan broj dozvoljenih pokušaja m , je

$$\Pr\{i = k\} = \Pr\{\text{SUCCESSFUL}\} \cdot \Pr\{i = k|m\}. \quad (44)$$

Na osnovu Def. 5 i (44), očekivani broj pokušaja za SUCCESSFUL pakete, ako je maksimalan broj dozvoljenih pokušaja m , je

$$E\{k|\text{SUCCESSFUL}\} = \frac{(1-p_p)}{1-p_p^m} \cdot \sum_{k=1}^m k \cdot p_p^{k-1} = \frac{1}{1-p} - \frac{1-mp_p^m}{1-p_p^m}. \quad (45)$$

Na sličan način se dolazi do očekivanog broja pokušaja za UNSUCCESSFUL pakete, ako je maksimalan broj dozvoljenih pokušaja m ,

$$E\{k|\text{UNSUCCESSFUL}\} = m. \quad (46)$$

Očekivani broj pokušaja za ANY pakete je

$$E\{k|\text{ANY}\} = (1 - p_p) \cdot \sum_{k=1}^{m-1} k \cdot p_p^{k-1} + m \cdot p_p^{m-1} = \frac{1-p_p^m}{1-p_p} = \frac{1-e}{1-p_p}. \quad (47)$$

rARQ

Kod rARQ tehnike, paket je izgubljen ako je odbačen ili su svi dozvoljeni pokušaji slanja neuspešni. Verovatnoća gubitka paketa je

$$e = \Pr\{\text{LOST}\} = 1 - p_0 + p_0 \cdot \sum_{j=1}^c p_j \cdot p_p^{m_j}. \quad (48)$$

Verovatnoća da će paket da bude UNSUCCESSFUL je

$$\Pr\{\text{UNSUCCESSFUL}\} = \sum_{j=1}^c \Pr\{m = m_j\} \cdot \Pr\{\text{UNSUCCESSFUL}|m = m_j\} = \sum_{j=1}^c p_j p_p^{m_j}. \quad (49)$$

Iz (49) sledi formula za verovatnoću da će paket da bude poslat tačno m_j puta, pod ulovom da je paket UNSUCCESSFUL, (50).

$$\Pr\{m = m_j|\text{UNSUCCESSFUL}\} = \frac{p_j p_p^{m_j}}{\sum_{j=1}^c p_j p_p^{m_j}} \quad (50)$$

Očekivani broj pokušaja za UNSUCCESSFUL pakete, ako je maksimalan broj dozvoljenih pokušaja $m \in M$, je

$$E\{k|\text{UNSUCCESSFUL}\} = \sum_{j=1}^c m_j \Pr\{m = m_j|\text{UNSUCCESSFUL}\} = \frac{\sum_{j=1}^c m_j p_j p_p^{m_j}}{\sum_{j=1}^c p_j p_p^{m_j}}. \quad (51)$$

Verovatnoća da će paket da bude SUCCESSFUL je

$$\Pr\{\text{SUCCESSFUL}\} = \sum_{j=1}^c p_j (1 - p_p) \sum_{k=1}^{m_j} p_p^{k-1} = 1 - \sum_{j=1}^c p_j p_p^{m_j}, \quad (52)$$

a uslovna verovatnoća da će SUCCESSFUL paket da bude poslat tačno k puta, ako je maksimalan broj dozvoljenih pokušaja $m \in M$, je

$$\Pr\{i = k\} = \Pr\{\text{SUCCESSFUL}_{m_j}\} \cdot \Pr\{i = k | \text{SUCCESSFUL}_{m_j}\}. \quad (53)$$

Uslovna verovatnoća data formulom (54), sledi iz (41), (52) i (53).

$$\Pr\{i = k | \text{SUCCESSFUL}_{m_j}\} = \frac{(1 - p_p) \sum_{j=1}^c p_j p_p^{k-1}}{1 - \sum_{j=1}^c p_j p_p^{m_j}} \quad (54)$$

Očekivani broj pokušaja za SUCCESSFUL pakete, ako je maksimalan broj dozvoljenih pokušaja $m \in M$, je

$$E\{k | \text{SUCCESSFUL}\} = \frac{\sum_{j=1}^c p_j (1 - p_p) \sum_{k=1}^{m_j} k p_p^{k-1}}{1 - \sum_{j=1}^c p_j p_p^{m_j}} = \frac{1}{1 - p_p} - \frac{\sum_{j=1}^c m_j p_j p_p^{m_j}}{1 - \sum_{j=1}^c p_j p_p^{m_j}}. \quad (55)$$

Uslov za SUCCESSFUL i UNSUCCESSFUL pakete da budu poslani ne postoji jer su definisani samo za poslate pakete.

Očekivani broj pokušaja za SENT pakete je

$$\begin{aligned} E\{k | \text{SENT}\} &= \sum_{j=1}^c \Pr\{m = m_j\} \cdot E\{k | m = m_j\} = \\ &= \sum_{j=1}^c p_j \cdot \left(m_j p_p^{m_j-1} + \sum_{k=1}^{m_j-1} k p_p^{k-1} (1 - p_p) \right) = \\ &= \sum_{j=1}^c p_j \frac{1 - p_p^{m_j}}{1 - p_p} = \frac{1 - \sum_{j=1}^c p_j p_p^{m_j}}{1 - p_p}. \end{aligned} \quad (56)$$

Očekivani broj pokušaja za ANY pakete je

$$\begin{aligned} E\{k | \text{ANY}\} &= \Pr\{\text{DISCARDED}\} \cdot E\{k | \text{DISCARDED}\} + \Pr\{\text{SENT}\} \cdot E\{k | \text{SENT}\} = \\ &= (1 - p_0) \cdot 0 + p_0 \cdot \frac{1 - \sum_{j=1}^c p_j p_p^{m_j}}{1 - p_p} = p_0 \frac{1 - \sum_{j=1}^c p_j p_p^{m_j}}{1 - p_p}. \end{aligned} \quad (57)$$

Kada se (48) uvrsti u (57) dobija se konačna formula za očekivani broj pokušaja za ANY pakete,

$$E\{k | \text{ANY}\} = \frac{1 - e}{1 - p_p}. \quad (58)$$

3.4.3 rARQ primeri i poređenje sa klasičnim ARQ

Sledeća dva primera konkretne rARQ realizacije pokazuju kako rARQ povećava rezoluciju (broj mogućih tačaka) prostora odlučivanja, a samim tim i prostora ciljeva, u odnosu na klasičan ARQ. Prikazani su gubitak paketa i očekivani broj pokušaja slanja ANY paketa u zavisnosti od očekivanog maksimalnog broja dozvoljenih pokušaja, definisanog na oba nivoa rARQ modela. Zavisnost je data parametarski za verovatnoću greške u prijemu paketa, $p_p \in \{10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}\}$.

U prvom primeru, rARQ parametri su definisani formulom (59). Za $E\{m\} \geq 1$, izabrane su dve moguće vrednosti za maksimalan broj pokušaja, m_1 i $m_2 = m_1 + 1$, dok su odgovarajuće verovatnoće date formulom (59). Slučaj $0 \leq E\{m\} < 1$ je prikazan u poslednjoj liniji formule (59). Ideja ove rARQ realizacije je da maksimalan broj pokušaja bude što bliži očekivanoj vrednosti maksimalnog broja pokušaja.

$$\left\{ \begin{array}{l} m \in \{\lfloor E\{m} \rfloor, \lceil E\{m} \rceil\} = \{m_1, m_2\}, \\ p_1 = \Pr\{m = \lfloor E\{m} \rfloor\} = \lceil E\{m} \rceil - E\{m\}, \\ p_2 = \Pr\{m = \lceil E\{m} \rceil\} = E\{m\} - \lfloor E\{m} \rfloor, \\ p_0 = 1 \end{array} \right. \quad E\{m\} \geq 1 \quad (59)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m = 1, \Pr\{m = 1\} = 1, p_0 = E\{m\}; \quad 0 \leq E\{m\} < 1 \end{array} \right.$$

U drugom primeru, rARQ parametri su dati formulom (60). Ideja ove rARQ realizacije je da se odbaci što je moguće više paketa, u skladu sa dozvoljenim gubitkom paketa, dok sa druge strane, maksimalan broj pokušaja treba da bude što bliži očekivanoj vrednosti maksimalnog broja pokušaja.

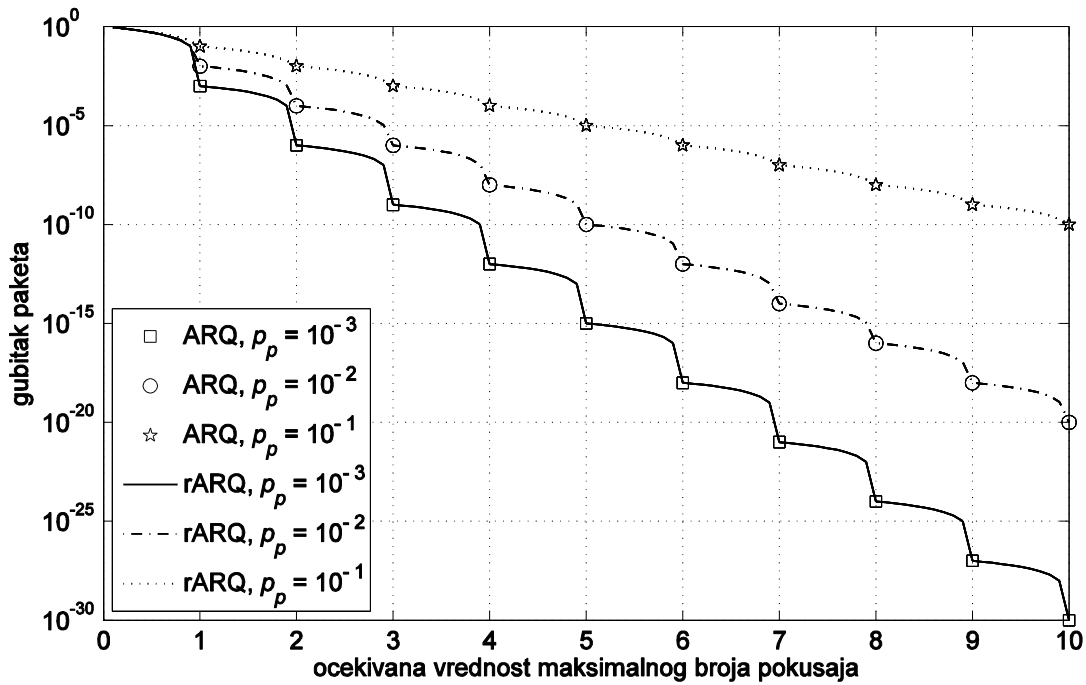
$$\left\{ \begin{array}{l} m \in \{1, \lceil E\{m} \rceil\}, \\ \Pr\{m = 1\} = \frac{\lceil E\{m} \rceil - E\{m\}}{\lceil E\{m} \rceil - 1}, \\ \Pr\{m = \lceil E\{m} \rceil\} = \frac{E\{m\} - 1}{\lceil E\{m} \rceil - 1}, \\ p_0 = 1 \end{array} \right. \quad E\{m\} > 1 \quad (60)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} m = 1, \\ \Pr\{m = 1\} = 1, \\ p_0 = E\{m\} \end{array} \right. \quad 0 \leq E\{m\} \leq 1$$

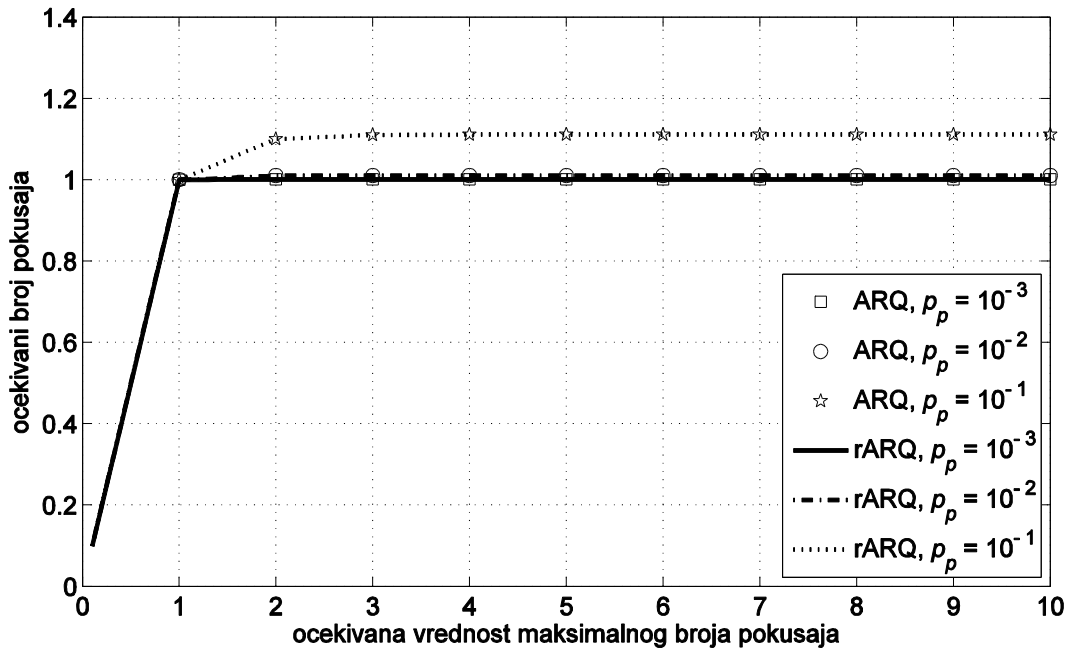
U oba primera, rARQ je definisan za bilo koje $E\{m\} \geq 0$.

Poređenje gubitka paketa prvog primera rARQ i ARQ tehnika prikazano je na slici 18 dok je

poređenje očekivanog broja pokušaja slanja ANY paketa, za iste tehnike, prikazano na slici 19. Kod obe tehnike gubitak paketa je monotono opadajuća funkcija dok je očekivani broj pokušaja ANY paketa monotono rastuća funkcija očekivane vrednosti maksimalnog broja pokušaja. Gubitak paketa i očekivani broj pokušaja ANY paketa za rARQ iz primera 1 i klasičnog ARQ se preklapaju u svim tačkama gde je klasičan ARQ definisan, odnosno, klasičan ARQ je podskup rARQ iz primera 1.

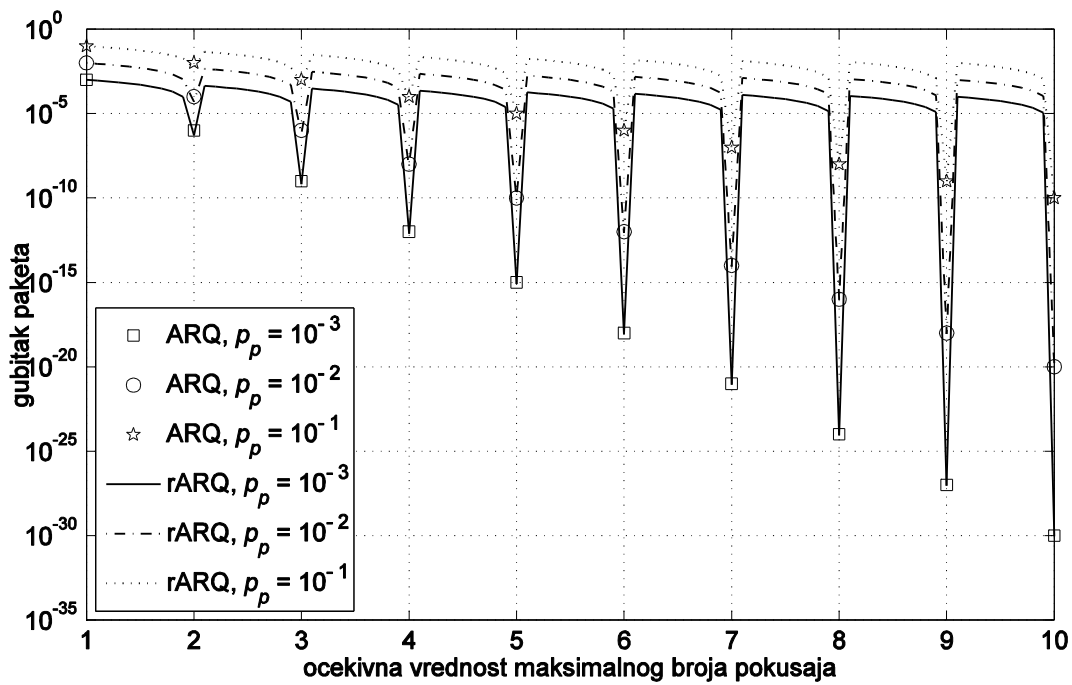


Slika 18. Poređenje gubitka paketa, primer 1 rARQ i ARQ

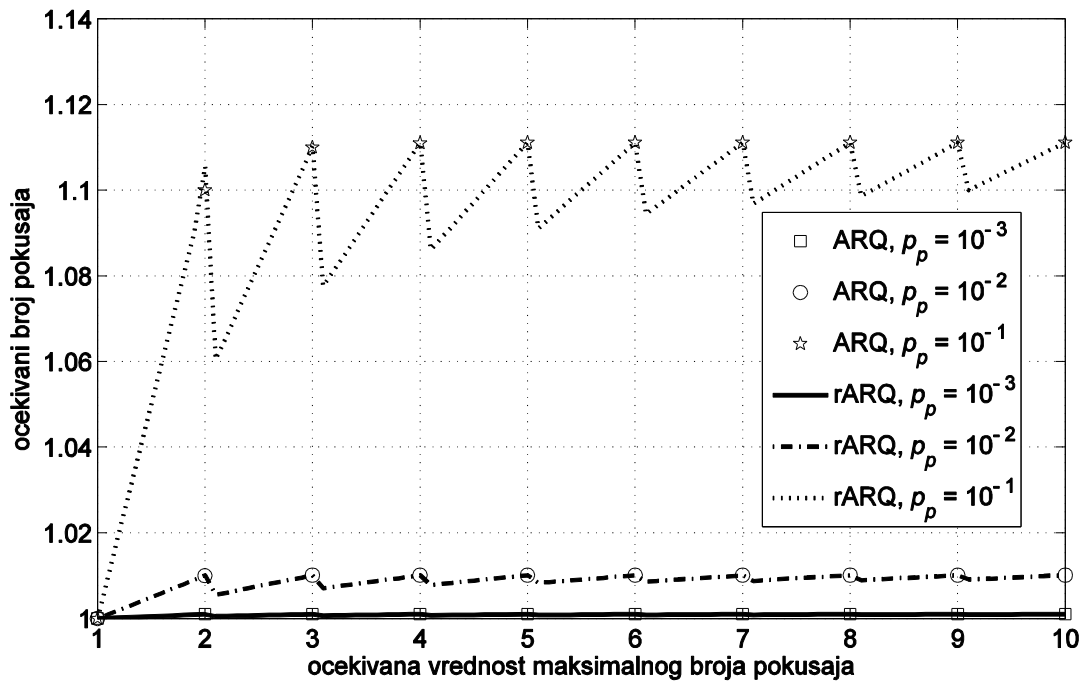


Slika 19. Poređenje očekivanog broja pokušaja slanja ANY paketa, primer 1 rARQ i ARQ

Poređenje gubitka paketa drugog primera rARQ i ARQ tehnika prikazano je na slici 20 dok je poređenje očekivanog broja pokušaja slanja ANY paketa, za iste tehnike, prikazano na slici 21. Pošto su (59) i (60) iste za $0 \leq E\{m\} < 1$, zbog jasnoće, na slici 20 i slici 21 prikazan je samo slučaj $E\{m\} \geq 1$. Gubitak paketa i očekivani broj pokušaja ANY paketa za rARQ iz primera 2 i klasičnog ARQ se preklapaju u svim tačkama gde je klasičan ARQ definisan, odnosno, klasičan ARQ je podskup rARQ iz primera 2. Međutim, gubitak paketa u drugom primeru rARQ nije monotono opadajuća funkcija i očekivani broj pokušaja ANY paketa nije monotono rastuća funkcija očekivane vrednosti maksimalnog broja pokušaja. Gubitak paketa naglo raste sa porastom $E\{m\}$ u + okolini prirodnih vrednosti $E\{m\} > 1$ i dostiže visoke vrednosti bez obzira na verovatnoću greške paketa, p_p , dok u – okolini naglo opada. Imajući u vidu promenu gubitka paketa na račun očekivanog broja pokušaja, može se očekivati da je optimalna vrednost maksimalnog broja pokušaja pre nenegativan realan broj nego prirodan.



Slika 20. Poređenje gubitka paketa, primer 2 rARQ i ARQ



Slika 21. Poređenje ocekivanog broja pokušaja slanja ANY paketa, primer 2 rARQ i ARQ

3.5 Tehnike slanja paketa

Da bi se ispitaio uticaj varijabli sa PHY i MAC slojeva, koje na E2 i pouzdanost utiču konkurentno, kreirano je nekoliko tehnika slanja paketa. Zbog velikog broja kombinacija različitih tehnika, ako bi se svaka varijabla ispitivala zasebno i u kombinaciji sa ostalim varijablama, ovde se polazi od referentne tehnike pa se varijable uvode jedna po jedna.

Prva tehnika odslikava praksu emitovanja u WSN. Druga i treća tehnike uvode kontrolu snage emisije, p_t . Četvrta tehnika uvodi kontrolu dužine paketa, l . Peta tehnika uvodi agregaciju paketa kojom se utiče na odnos dužine paketa i dužine kontrolnih podataka paketa. Adaptacija bitske brzine nije uvedena kao posebna tehnika.

3.5.1 MaxTP tehnika slanja paketa

Prva tehnika podrazumeva praksu u WSN. Praksa kaže da se kratki paketi emituju maksimalnom raspoloživom snagom tako da se ostvaruje maksimalna pouzdanost u prenosu. Tehnika je ovde obeležena kao MaxTP (eng. *Maximal Transmission Power*). Kod ovakvog slanja paketa, energetska efikasnost se ne razmatra na PHY sloju već na višim slojevima, pri čemu se uzima da je energija potrebna za slanje jednog bita (bilo kojeg) konstantna.

Za kvantifikaciju MaxTP tehnike, parametri su izabrani tako da odslikaju IEEE 802.15.4 standard i najveći broj nestandardnih tehnika koje se koriste na PHY i MAC slojevima u BSM [137]. Dužina PHY i MAC kontrolnih podataka je 15 B. U okviru kontrolnih podataka se nalaze polja dužine paketa i rednog broja paketa dužine po 1 B. U IEEE 802.15.4 standardu definisan je test paket dužine 20 B bez uračunavanja PHY kontrolnih podataka. Ako se pretpostavi dužina PHY kontrolnih podataka od 6 B, što u dobroj meri odslikava IEEE 802.15.4 standard i najveći broj nestandardnih tehnika, koje se koriste u BSM, ukupna dužina test paketa je 26 B, sa 15 B PHY i MAC kontrolnih podataka i 11 B podataka koje je viši sloj prosledio MAC sloju za prenos.

3.5.2 1%TP tehnika slanja paketa

Druga tehnika uvodi kontrolu snage transmisije da bi se za test pakete ostvarila određena pouzdanost u prenosu, uz minimizaciju upotrebljene snage. IEEE 802.15.4 standard definiše pouzdanost u prenosu test paketa od 1%. Na ovaj način je proizvođačima obezbeđen

standardizovani test, a korisnicima mogućnost da na lak način uporede energetska efikasnost različitih radio-primopredajnika. Kod 1%TP tehnike, za zadato slabljenje kanala, E2-pouzdanost odnos je fiksiran.

Kako svaki predajnik ima donju i gornju granicu snage emisije, uz fiksiranje osetljivosti prijemnika, potpuno se definiše opseg slabljanja kanala, preko kojeg je moguća komunikacija. Neka je $S_{1\%}$ RX osetljivost takva da je greška u dekodovanju test paketa 1%, onda su maksimalno i minimalno slabljenje kanala, granice regiona komunikacije u smislu slike 12, $L_{max,1\%} = S_{1\%}/p_{tx,max}$, $L_{min,1\%} = S_{1\%}/p_{tx,min}$, respektivno.

3.5.3 OptTP tehnika slanja paketa

Prva tehnika koja omogućava podešavanje E2-pouzdanost odnosa bez preferenci je optimalno podešavanje snage predaje, OptTP (eng. *Optimal Transmission Power*). Kod OptTP tehnike, u opštem slučaju, snaga predaje se podešava tako da minimizuje oba cilja. U specijalnim slučajevima, ukoliko su preference zadate, npr. kod 1%TP tehnike pouzdanost je zadata u vidu jednakosti kao $p_p = 1\%$, jedan cilj je zadat, a drugi se minimizuje.

Granice regiona komunikacije u smislu slike 12, kod OptTP su određene minimalnim slabljenjem kanala za koje je moguće podesiti predajnu snagu tako da se postigne optimalna RX osetljivost, donja granica –

$$L_{min,opt} = \operatorname{argmin}_L \left(E2(L, p_{tx,min}), \operatorname{Pouzdanost}(L, p_{tx,min}) \right), \quad (61)$$

odnosno, maksimalno slabljenje kanala za koje je moguće podesiti predajnu snagu tako da se postigne optimalna RX osetljivost, gornja granica -

$$L_{max,opt} = \operatorname{argmax}_L \left(E2(L, p_{tx,max}), \operatorname{Pouzdanost}(L, p_{tx,max}) \right). \quad (62)$$

3.5.4 OptTPPL tehnika slanja paketa

U odnosu na prethodnu tehniku, OptTPPL (eng. *Optimal Transmission Power and Packet Length*) uvodi kontrolu dužine paketa. Takođe, u opštem slučaju, kod OptTPPL se vrši minimizacija E2-pouzdanost odnosa bez preferenci, odnosno snaga predaje i dužina paketa se podešavaju tako da oba cilja budu minimizovana. Mogući su i specijalni slučajevi kada se vrši optimizacija ciljeva sa zadatim preferencama.

Što se tiče dužine paketa, minimalna dužina je definisana dužinom obaveznih kontrolnih podataka, koji se šalju čak i kada je paket prazan, $l_{min} = l_c$, a maksimalna dužina u većini nestandardnih protokola nije ograničena, $l_{max} = \infty$, a ako je ograničena, ograničenje je definisano primenjenim protokolom, npr. IEEE 802.15.4 definiše $l_{max} = 127$ B.

Granice regiona komunikacije u smislu slike 12, kod OptTPPL su određene minimalnim slabljenjem kanala za koje je moguće podesiti predajnu snagu i dužinu paketa tako da se postigne optimalna RX osetljivost, donja granica –

$$L_{min,opt} = \operatorname{argmin}_L \left(E2(L, p_{tx,min}, l), \text{Pouzdanost}(L, p_{tx,min}, l) \right) | l \in [l_{min}, l_{max}], \quad (63)$$

odnosno, maksimalno slabljenje kanala za koje je moguće podesiti predajnu snagu i dužinu paketa tako da se postigne optimalna RX osetljivost, gornja granica -

$$L_{max,opt} = \operatorname{argmax}_L \left(E2(L, p_{tx,max}, l), \text{Pouzdanost}(L, p_{tx,max}, l) \right) | l \in [l_{min}, l_{max}]. \quad (64)$$

3.5.5 120AFR tehnika slanja paketa

120AFR tehnika podrazumeva slanje 120 agregiranih paketa tehnikom agregacije sa retransmisijom fragmenata – AFR (eng. *Aggregation with Fragment Retransmission*), pri čemu su E2 i pouzdanost minimizirani tako što su snaga predaje i dužina paketa optimizovani na nivou ekvivalentnih paketa. Kao i kod prethodne dve tehnike slanja paketa, optimizacija je u opštem slučaju bez preferenci, a mogući su i specijalni slučajevi kada su preference zadate. U nastavku je prikazana AFR tehnika.

AFR

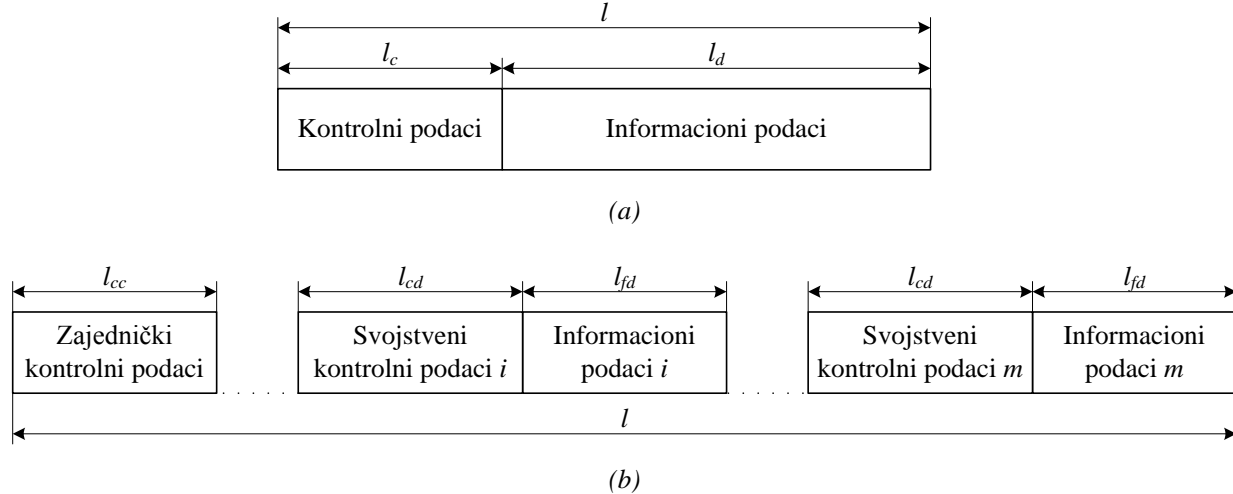
Za definiciju AFR tehnike uvode se sledeće pretpostavke:

1. Svi agregirani paketi su iste ekvivalentne dužine, l_e ,
2. Svi agregirani paketi su u potpunosti popunjeni informacionim bitima.

Da bi se napravila razlika između regularnih paketa u emisiji zasebnih paketa i paketa u emisiji agregiranih paketa, ovde se umesto agregiranog paketa koristi termin fragment, slika 22. AFR ne isključuje mogućnost agregacije fragmenata različite dužine ali je u tom slučaju potrebno odrediti preslikavanje paketa u fragmente.

Neka su l_{cc} i l_{cd} dužine zajedničkih kontrolnih podataka za sve pakete i svojstvenih kontrolnih

podataka za svaki paket, respektivno. Ako je m paketa agregirano, ekvivalentna dužina kontrolnih podataka po fragmentu je $l_{ce} = l_{cd} + l_{cc}/m$. Asimptotski, ako je m dovoljno veliko, ekvivalentna dužina kontrolnih podataka teži l_{cd} .



Slika 22. (a) Struktura jediničnog paketa, (b) struktura okvira koji sadrži m fragmenata

Za broj fragmenata je dodeljen 1 B, a za veličinu fragmenta 2 B u zajedničkim kontrolnim podacima. Na taj način je omogućena agregacija do 255 fragmenata pri čemu svaki može da ima maksimalnu dužinu od 65535 b. Neka se za svaki fragment primenjuje kontrolna sekvenca, fCS (eng. *Fragment Check Sequence*), fiksne dužine $l_{cd1} = 2$ B za detekciju grešaka u prenosu. Sa CRC (eng. *Cyclic Redundancy Check*) blok kodovima dužine 2 B obezbeđena je zadovoljavajuća detekcija greške za veliki raspon dužina paketa [139]. CRC kodovi se često koriste u bežičnim komunikacijama za detekciju greške. Generalno, svaki fragment bi trebalo da bude određen dužinom, rednim brojem i pozicijom početka što zahteva l_{cd2} dužinu polja svojstvenih kontrolnih podataka. Međutim, pošto su svi fragmenti iste dužine i strukture, svi zajedno mogu da budu definisani dužinom fragmenta i brojem fragmenata, poljima u zajedničkim kontrolnim podacima. Stoga, uvodi se pretpostavka da su svojstveni kontrolni podaci sastavljeni samo od fCS polja, $l_{cd} = l_{cd1} = 2$ B.

Fragment će da bude primljen sa greškom, ako se greška pojavi u zajedničkim kontrolnim podacima i/ili svojstvenim kontrolnim podacima i/ili polju informacionih podataka. Verovatnoća greške u prenosu fragmenta je

$$p_f = 1 - (1 - p_b)^{l_{fd} + l_{cc} + l_{cd}} . \quad (65)$$

Neka je l_e suma ekvivalentne dužine kontrolnih podataka po fragmentu i dužine polja

informativnih podataka, $l_e = l_{ce} + l_{fd}$. Uvođenjem AFR tehnike sve prethodne formule koje važe za prenos paketa, važe i za prenos fragmenata, s tim što umesto verovatnoće greške u prenosu paketa p_p , dužine paketa l i dužine kontrolnih podataka l_c treba koristiti p_f , l_e i l_{ce} , respektivno.

3.6 Pareto pristup višeciljnoj optimizaciji

Problem višeciljne optimizacije, MOO (eng. *MultiObjective Optimization*), u opštem obliku dat je formulom

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{x}} \mathbf{F}(\mathbf{x}) &= [F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}), \dots, F_k(\mathbf{x})]^T \\ \text{s. t. } g_i(\mathbf{x}) &\leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ h_j(\mathbf{x}) &= 0, \quad j = 1, 2, \dots, s, \end{aligned} \quad (66)$$

pri čemu je k broj funkcija ciljeva; m je broj ograničenja datih nejednakostima; s je broj ograničenja datih jednakostima; $\mathbf{x} \in E^n$ je vektor varijabli odlučivanja; n je broj nezavisnih varijabli x_i ; $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \in E^k$ je vektor ciljeva $F_i(\mathbf{x}): E^n \rightarrow E^1$. Prostor odlučivanja \mathbf{X} definisan je skupom $\{\mathbf{x} | g_i(\mathbf{x}) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m; h_j(\mathbf{x}) = 0, j = 1, 2, \dots, s\}$. Prostor ciljeva \mathbf{Z} je definisan skupom $\{\mathbf{F}(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbf{X}\}$.

Važno je napomenuti da su \mathbf{X} i \mathbf{Z} ovde definisani tako da je $\mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Z}$ surjeksija (preslikavanje na).

Za razliku od optimizacije jednog cilja, rešavanje MOO problema je više problem koncepta nego problem definicije problema. Obično, globalno rešenje MOO problema u vidu jedinstvene tačke ne postoji pa je često potrebno odrediti skup tačaka koje zadovoljavaju predefinisani optimum. U [85] je dat pregled različitih koncepta MOO problema. Dominantan koncept koji će i ovde da bude upotrebljen je Pareto optimalnost.

3.6.1 Pareto optimalnost

Koncept Pareto optimalnosti uvodi kriterijum za strogu Pareto optimalnost i slab kriterijum za Pareto optimalnost. Kriterijumi su dati definicijama:

Def. 7: Tačka $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$ je Pareto optimalna (PO) ako i samo ako ne postoji druga tačka, $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, tako da je $\mathbf{F}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$ i $F_i(\mathbf{x}) < F_i(\mathbf{x}^*)$, bar za jednu funkciju cilja;

Def. 8: Tačka $\mathbf{x}^* \in \mathbf{X}$ je slabo Pareto optimalna, WPO (eng. *Weakly Pareto Optimal*), ako i

samo ako ne postoji druga tačka, $\mathbf{x} \in \mathbf{X}$, tako da je $\mathbf{F}(\mathbf{x}) < \mathbf{F}(\mathbf{x}^*)$.

Drugim rečima, tačka je WPO ako ne postoji druga tačka u kojoj su svi ciljevi bolji istovremeno. Sa druge strane, tačka je PO ako ne postoji neka druga tačka u kojoj je barem jedan cilj bolji, pod uslovom da ostali ciljevi nisu pogoršani. PO implicira WPO, dok obrnuto ne važi.

Def. 9: Skup svih PO tačaka je Pareto front (PF), [140, 141].

Osobina 1: PF leži na obodu prostora ciljeva, [142, 143], odnosno PF je podskup skupa obodnih tačaka prostora ciljeva.

3.6.2 Metodi za rešavanje problema Pareto optimalnosti

Kako pristup podešavanju E2-pouzdanost odnosa u ovoj disertaciji nema predefinisane kriterijume, ogrničenja po ciljevima ne postoje, već je uopšten i ispituje mogućnosti podešavanja odnosa, od interesa su samo tehnike za rešavanje problema Pareto optimalnosti bez preferenci [110]. Ideja rešavanja problema Pareto optimalnosti bez preferenci je da se u prvoj fazi odredi PF, a zatim, u drugoj fazi, rezultat sa svim mogućim PO rešenjima se prepušta donosiocima odluke. Na ovaj način se donosiocima odluke omogućava da sagledaju problem u širim razmerama.

Kod metoda Globalnog kriterijuma [110, poglavlje 2.1] PF se određuje na posredan način, minimizacijom distance, u opštem slučaju distanca je definisana nekom metrikom, prostora ciljeva od referentne tačke.

Kod MPB (eng. *Multiobjective Proximal Bundle*) metoda, [110, poglavlje 2.2], kreće se od proizvoljne tačke u prostoru ciljeva i idući u pravcu poboljšanja svih ciljeva istovremeno, dolazi se do PO tačke. Ovom metodom, u opštem slučaju, nije garantovano da je moguće odrediti PF.

Metoda težinskih koeficijenata [110, poglavlje 3.1] svakom cilju dodeljuje težinski koeficijent pa se algebarskim zbirom ciljeva pomnoženih težinskim koeficijentima, formira optimizacioni problem sa jednim ciljem, koji se zatim rešava klasičnim optimizacionim tehnikama. Rešenje problema težinskih koeficijenata je WPO, a ukoliko su koeficijenti pozitivni, rešenje je PO. Promenom težinskih koeficijenta moguće je generisati različita PO rešenja. Međutim, u opštem slučaju, ne postoje garancije da je moguće odrediti PF u celini.

Metod ε -ogrničenja [110, poglavlje 3.2] optimizuje samo jedan cilj pri čemu su ostali ciljevi konvertovani u ograničenja, postavljanjem gornje granice za svaki cilj. Alternativna formulacija metoda ε -ogrničenja predložena je u [111], PEC (eng. *Proper Equality Constraints*) metod, gde

su ograničenja definisana kao jednakosti. Rešavanjem problema formulisanog kao ε -ogrničenja ili PEC dolazi se do PO tačke. Generisanjem skupa problema formulisanih kao ε -ogrničenja ili PEC tako da ograničenja obuhvate sve tačke u podprostoru ciljeva, koji sadrži sve ciljeve osim jednog, onog koji se optimizuje, može da se odredi PF. Ukoliko taj podskup nije ograničen, kreiranjem reprezentativnog podskupa, moguće je evaluirati PF.

PEC metod je izabran za određivanje PF u problemu analize E2-pouzdanost odnosa i u nastavku je rekapituliran. Detaljan opis PEC metoda je prikazan u [111].

3.6.3 PEC metod

PECSO optimalna rešenja

Kod pronalazjenja PO rešenja opšteg MOO problema, datog formulom (66), kreće se od formiranja pridruženog PECSO (eng. *Parametric-Equality-Constrained-Single-Objective*) optimizacionog problema.

Neka je k -ti cilj, $F_k(\mathbf{x})$, izabran da bude optimizovan, a ostali ciljevi neka su pretvoreni u parametrizovana ograničenja data jednakostima: $F_1(\mathbf{x}) = \alpha_1, F_2(\mathbf{x}) = \alpha_2, \dots, F_{k-1}(\mathbf{x}) = \alpha_{k-1}$, gde su $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{k-1}$ konstante koje pripadaju skupu realnih brojeva. Onda je problem dat formulom (67), PECSO optimizacioni problem pridružen opštem MOO problemu (66).

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{x}} F_k(\mathbf{x}) \\ & s. t. F_1(\mathbf{x}) = \alpha_1, F_2(\mathbf{x}) = \alpha_2, \dots, F_{k-1}(\mathbf{x}) = \alpha_{k-1} \\ & \mathbf{x} \in \mathbf{X} \end{aligned} \quad (67)$$

Optimalno rešenje problema (67) je PECSO optimalno rešenje.

Neka je $\mathbf{X}_\alpha \triangleq \{\mathbf{x} \in \mathbf{X} | F_1(\mathbf{x}) = \alpha_1, F_2(\mathbf{x}) = \alpha_2, \dots, F_{k-1}(\mathbf{x}) = \alpha_{k-1}\}$, pri čemu je $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{k-1})$ vektor realnih brojeva dimenzije $k - 1$. Neka je \mathbf{A} skup svih α u R^{k-1} , tako da $\mathbf{X}_\alpha \neq \emptyset$. Neka je ϕ funkcija definisana nad skupom \mathbf{A} kao $\phi(\alpha) \triangleq \sup\{F_k(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbf{X}_\alpha\}$. Onda svakom $\alpha \in \mathbf{A}$ odgovara najmanje jedno $\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{x}}(\alpha)$, dimenzije k , koje ne mora da bude u \mathbf{X}_α ili \mathbf{X} , tako da je $F_k(\hat{\mathbf{x}}(\alpha)) = \phi(\alpha)$. $\hat{\mathbf{x}}(\alpha)$ je supremum rešenje pridruženog PECSO problema.

Neka je $\mathbf{B} \triangleq \{\alpha \in \mathbf{A} | \phi(\alpha) < +\infty \wedge \exists \hat{\mathbf{x}} \in \mathbf{X}_\alpha, F_k(\hat{\mathbf{x}}) = \phi(\alpha)\}$. Onda je $\phi(\alpha) = \max\{F_k(\mathbf{x}) | \mathbf{x} \in \mathbf{X}_\alpha\}, \forall \alpha \in \mathbf{B}$. $\hat{\mathbf{x}}$ je po definiciji optimalno PECSO rešenje akko:

1. $\hat{\mathbf{x}} \in \mathbf{X}_\alpha$,

2. $F_k(\hat{\mathbf{x}}) = \phi(\alpha)$,
3. $\phi(\alpha) < +\infty$.

Prethodni uslovi obezbeđuju da optimalno PECSO rešenje leži na obodu prostora ciljeva. Skup svih PECSO optimalnih rešenja $\hat{\mathbf{x}}(\alpha)$, za $\alpha \in \mathbf{B}$, na osnovu osobine 1, sadrži ceo PF, odnosno, PF je podskup skupa svih PECSO optimalnih rešenja. Napomena, prethodna tvrdnja je u [111] izvedena preko odgovarajuće geometrijske predstave problema.

PO rešenja

Za određivanje PF izdvajanjem svih PO rešenja iz celog skupa PECSO optimalnih rešenja koristi se teorema 1 iz [111], koja je radi sledljivosti ovde ponovljena.

Teorema 1: Za neko $\alpha^0 \in \mathbf{B}$, PECSO optimalno rešenje $\mathbf{x}^0 = \hat{\mathbf{x}}(\alpha^0)$ je PO akko:

1. $\phi(\alpha) \leq \phi(\alpha^0), \forall \alpha \in \mathbf{A} \wedge \alpha \geq \alpha^0$ i
2. $\phi(\alpha) < \phi(\alpha^0), \forall \alpha \in \mathbf{B} \wedge \alpha_i \geq \alpha_i^0 \wedge \exists j, \alpha_j > \alpha_j^0; i, j = 1, \dots, k - 1$.

Dokaz teoreme 1 videti u [111].

4. DEFINICIJA E2-POUZDANOST PROBLEMA, REŠENJE I REZULTATI

U ovom poglavlju su definisani prostori odlučivanja i ciljeva, funkcije preslikavanja iz prostora odlučivanja u prostor ciljeva i parametri za opšti problem E2-pouzdanost odnosa, datog formulom (4). Zatim su definisani podproblemi problema (4), koji odslikavaju tehnike prikazane u poglavlju 3.5.

Prikazana su rešenja i rezultati za dva slučaja problema E2-pouzdanost odnosa. U prvom slučaju se optimizuje samo energetska-efikasnost, što predstavlja najveći problem u WSN, ali pod uslovom potpune (100%) pouzdanosti. U drugom slučaju, optimalan E2-pouzdanost odnos tražen je po svim vrednostima oba cilja, bez preferenci, što je krajnji cilj ove disertacije.

E2-pouzdanost odnos je razmotren u dva slučaja u zavisnosti od mogućnosti podešavanja bitske brzine. Kako je potrebno da svi ucesnici u komunikaciji imaju istu informaciju o bitskoj brzini, potrebni su dodatni naponi da se obezbedi konzistentnost o njoj, stoga je bitska brzina najčešće fiksiran parametar komunikacije. U prvom slučaju bitska brzina je fiksirana, a u drugom slučaju se prilagođava stanju kanala.

4.1 Potpuna definicija problema

Puna definicija problema podrazumeva definisanje prostora odlučivanja, parametara optimizacije i prostora ciljeva za sve tipove razmatranih kanala i sve tehnike prenosa.

4.1.1 Prostor odlučivanja

Prostor odlučivanja je definisan mogućim vrednostima vektora odlučivanja $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_{15})$, pri čemu su dimenzije vektora definisane promenljivim veličinama na PHY i MAC slojevima, datim tabelom 4. Kao što je u poglavlju 2.4 definisano, za odlučivanje su u obzir uzete samo promenjive veličine koje su podržane na savremenim radio-primopredajnicima namenjenim za BSM primene, a koje ciljeve pomeraju na suprotne strane. Opsezi vrednosti koje mogu da uzimaju promenjive dati su u tabeli 8, a bazirani su na CC1000 RPP-u. Ostale promenjive su uzete kao parametri, tabela 9.

Tabela 8. Opsezi vrednosti promenljivih u prostoru odlučivanja

promenjiva, [jedinica mere]	opseg
-----------------------------	-------

x_1 - bitska brzina, r , [kb/s]	$r \geq 0$ $r = 19,2$ – u slučaju fiksirane brzine
x_2 – dužina paketa, l ili ekvivalentna dužina paketa, l_e , [b]	$x_2 = l, l_e \in \mathbf{N}_1 = \mathbf{N} \setminus \{1, \dots, l_c - 1\}$ $x_2 = 26 \cdot 8 = 208$ - test paket
x_3 – broj pokušaja slanja paketa, m , ili srednji broj pokušaja slanja paketa, $E\{m\}$	$m \in \mathbf{N}$ - ARQ, $E\{m\} \geq 0$ - rARQ
x_4 - predajna snaga, p_{tx} , [mW]	$p_{tx} \in \mathbf{P} = [p_{tx,min}, p_{tx,max}]$

CC1000 RPP predviđa da bitska brzina može da se podesi na 8 mogućih vrednosti, npr. {0,3; 0,6; 1,2; 2,4; 4,8; 9,6; 19,2; 38,4} kada se koristi Manchester kodovanje na 868 frekventnom opsegu. Radi boljeg uvida u uticaj bitske brzine na E2-pouzdanost odnos, u slučaju adaptivne bitske brzine, pretpostavljeno je da ona može da ima bilo koju vrednost veću od 0. Ukoliko postoje ograničenja, bitska brzina je ograničena dozvoljenim frekventnim opsegom za signal. U slučaju kada je bitska brzina fiksirana na nivou mreže, $r = 19,2$ kb/s.

Paketi minimalne dužine su kontrolni paketi koji ne sadrže informacione podatke već samo obavezne kontrolne podatke, dužine l_c . U slučaju 120AFR tehnike, pretpostavka je da uvek ima dovoljno informacija tako da može da se formira okvir koji sadrži 120 fragmenata optimalne dužine. \mathbf{N} je skup prirodnih brojeva. U slučaju slanja kratkih test paketa, njihova dužina je 26 B.

Za odlučivanje po broju transmisija može da se koristi maksimalan broj transmisija, što odgovara klasičnim ARQ tehnikam ili srednji maksimalan broj transmisija, što odgovara rARQ tehnici, videti poglavlje 3.4.1.

Iako savremeni TX, namenjeni za BSM upotrebu, podržavaju svega nekoliko nivoa izlazne snage, videti tabelu 2, ovde je uzeto da izlazna snaga može kontinualno da se podesi u intervalu od minimalne do maksimalne izlazne snage.

Tabela 9. Parametrizovane promenjive prostora odlučivanja

promenjliva [jedinica mere]	vrednost promenjlive
dužina kontrolnih podataka, l_c ili ekvivalentna dužina, l_{ce} , [b]	$l_c = 15 \cdot 8 = 120$ – MAXTP, 1%TP, OptTP, OptTPPL; $l_{ce} = 17$ – 120AFR

dužina predajnog bafera, q , [B]	∞
verovatnoća sudaranja paketa, p_c	0
broj skokova,	1
<i>duty-cycle</i>	opt
<i>FEC</i>	PHY - Mančester, MAC - CRC blok kodovanje
modulacija, <i>mod</i>	BFSK sa nekoherentnom demodulacijom
slabljenje kanala, L	$L \in (L_{min}, L_{max})$
TX-RX rastojanje, d	određeno je slabljenjem kanal
nivo interferencije, N_i	0
količina pristiglih podataka	/

Dužina kontrolnih podataka je 15 B za sve tehnike kod kojih se paketi šalju pojedinačno. Pretpostavka je da se za svaki paket koriste polja: 1 B za dužinu paketa, 1 B za redni broj paketa i 2 B za FCS. U slučaju agregiranog slanja paketa tehnikom AFR120, polja za dužinu i redni broj paketa mogu da se zamene poljima koja se nalaze u zajedničkim kontrolnim podacima: veličina fragmenta i broj fragmenata, oba dužine 1 B; a FCS polje dužine 2 B ostaje iste dužine i nalazi se u sopstvenim kontrolnim podacima, odnosno zajedničko polje kontrolnih podataka je dužine 14 B, a polje sopstvenih kontrolnih podatak je 2 B. Ekvivalentna dužina kontronih podataka, zaokružena na prvi veći ceo broj, je 17 b.

Predajni bafer je dovoljne dužine da pod bilo kojim uslovima procesa pristizanja podataka i pri bilo kojoj tehnici slanja podataka može da prihviti sve pristigle podatke bez odbacivanja.

Pretpostavaka je da nema sudaranja paketa, odnosno, da se koristi vremenska raspodela pristupa kanalu.

Broj skokova je 1 jer se analizira slučaj direktne transmisije.

Pretpostavljen je slučaj optimalnog *duty-cyclea* uz uslov da ostali parametri nisu narušeni.

Na PHY sloju se koristi Mančester kodovanje, a na MAC sloju se koristi CRC blok kodovanje.

Modulacija je binarna frekvencijska sa nekoherentnom demodulacijom.

Slabljenje kanala se bira za svaku tehniku posebno, tako da se komunikacija odvija u regionu

II, videti poglavlje 3.3.1, slika 12.

TX-RX rastojanje je određeno tako da se ne naruši pretpostavka o slabljenju kanala.

Pretpostavlja se da nema interferencije sa drugim mrežama, odnosno, posmatra se slučaj izolovane BSM.

Proces pristizanja podataka je takav da je potrebna količina podataka raspoloživa prilikom svakog odlučivanja o optimalnim parametrima transmisije, a u skladu sa pretpostavkom o dužini predajnog bafera.

4.1.2 Prostor ciljeva

Prostor ciljeva je definisan svim vrednostima vektora ciljeva, $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = (F_1(\mathbf{x}), F_2(\mathbf{x}))$, koje je moguće dostići preslikavanjem tačaka prostora odlučivanja, funkcijama zavisnosti ciljeva od varijabli odlučivanja.

E2 cilj je definisan očekivanom količinom energije, koja je potrebna za transmisiju jednog bita korisnih podataka, $E_{b,data,tot}$. Zavisnost $E_{b,data,tot}$ od varijabli odlučivanja data je formulom (12).

Pouzdanost je definisana kao očekivan gubitak paketa, $E\{e\}$, nakon svih dozvoljenih pokušaja slanja paketa. Zavisnost $E\{e\}$ od varijabli odlučivanja data je formulom (23), za slučaj slanja paketa preko AWGN kanala, odnosno, aproksimira se formulom (25), za slučaj komunikacije preko Rayleigh blok fejdning kanala bez frekvencijske selekcije.

4.1.3 Definicija problema za odgovarajuće tehnike transmisije

Definicije problema su date za tehnike prikazane u poglavlju 3.5 i tehniku združene adaptivne ARQ, adaptivne dužine paketa, adaptivne snage predaje i adaptivne bitske brzine.

MaxTP

Kod ove tehnike fiksirani su snaga predaje, na maksimalnu snagu i dužina paketa, na dužinu test paketa. Opšti problem E2-pouzdanost odnosa (4) svodi se na problem dat formulom (68).

$$\max \mathbf{F}(\mathbf{x}) \mid \mathbf{F} \in \mathbf{Z}, \mathbf{x} \in \mathbf{X} \wedge x_2 = 26B, x_4 = p_{tx,max} \quad (68)$$

Ovom tehnikom je moguće kontrolisati ciljeve promenom bitske brzine i brojem pokušaja slanja paketa.

1%TP

Kod ove tehnike fiksirana je dužina paketa na dužinu test paketa. Drugo ograničenje je dato kao fiksni cilj pouzdanosti, pri čemu su za pouzdanost uzete metrike:

1. verovatnoća greške u prenosu paketa data formulom (19), za AWGN kanal,
2. očekivana vrednost verovatnoće pogrešnog prijema paketa koja se aproksimira formulom (21), za slučaj komunikacije preko Rayleigh blok fejdinog kanala bez frekvencijske selekcije.

Verovatnoća pogrešnog prijema je fiksirana na 1% u oba slučaja. Opšti problem (44) svodi se na problem dat formulom (69).

$$\max \mathbf{F}(\mathbf{x}) \mid \mathbf{F} \in \mathbf{Z}, \mathbf{x} \in \mathbf{X} \wedge x_2 = 26B, \begin{cases} p_p(\mathbf{x}) = 0,01 \\ E\{p_p(\mathbf{x})\} = 0,01 \end{cases} \quad (69)$$

Ovom tehnikom je moguće kontrolisati ciljeve promenom bitske brzine, brojem pokušaja slanja paketa i predajnom snagom.

OptTP

Kod ove tehnike fiksirana je samo dužina paketa na dužinu test paketa, a opšti problem (44) svodi se na problem dat formulom (70).

$$\max \mathbf{F}(\mathbf{x}) \mid \mathbf{F} \in \mathbf{Z}, \mathbf{x} \in \mathbf{X} \wedge x_2 = 26B \quad (70)$$

Ovom tehnikom je moguće kontrolisati ciljeve promenom bitske brzine, brojem pokušaja slanja paketa i predajnom snagom.

OptTPPL

Kod ove tehnike opšti problem E2-pouzdanost (4) je dat u punom obliku, bez posebnih ograničenja po varijablama odlučivanja. Varijable odlučivanja mogu da imaju vrednosti definisane prostorom odlučivanja, videti poglavlje 4.1.1.

AFR120

Kod ove tehnike opšti problem E2-pouzdanost odnosa (4) je dat u istom obliku kao i za OptTPPL tehniku, s tim što u odgovarajućim formulama umesto verovatnoće greške u prenosu paketa p_p , dužine paketa l i dužine kontrolnih podataka l_c treba koristiti verovatnoću greške

fragmenta p_f , ekvivalentnu dužinu paketa l_e i ekvivalentnu dužinu kontrolnih podataka, l_{ce} , respektivno.

4.2 Energetska efikasnost pod uslovom potpune pouzdanosti

U ovom delu je ispitano kako tehnike transmisije prikazane u poglavlje 3.5 utiču na energetska efikasnost, pod uslovom da je pouzdanost potpuna, odnosno, da je gubitak paketa jednak nuli [48]. Potpuna pouzdanost se ostvaruje dozvoljavanjem beskonačnog broja retransmisija, $x_3 = \infty$. Drugi uslov u ovim ispitivanjima je da se parametri transmisije podešavaju samo na TX strani, odnosno, samo TX ima potpunu informaciju o slabljenju kanala. Stoga je bitska brzina fiksirana na proizvoljno izabranu vrednost $x_1 = 19,2$ kb/s.

Posmatran je slučaj AWGN kanala. Ekvivalentan propusni opseg filtera na prijemu je 30 kHz. Kako merenja parametara komunikacije malom snagom sprovedena na bežičnom linku, prikazana u [59], pokazuju da je prisutan srednji nivo šuma od -105 dBm, na tom opsegu, ovde je usvojen nivo šuma $N_0 = 1,054 \cdot 10^{-18}$ J.

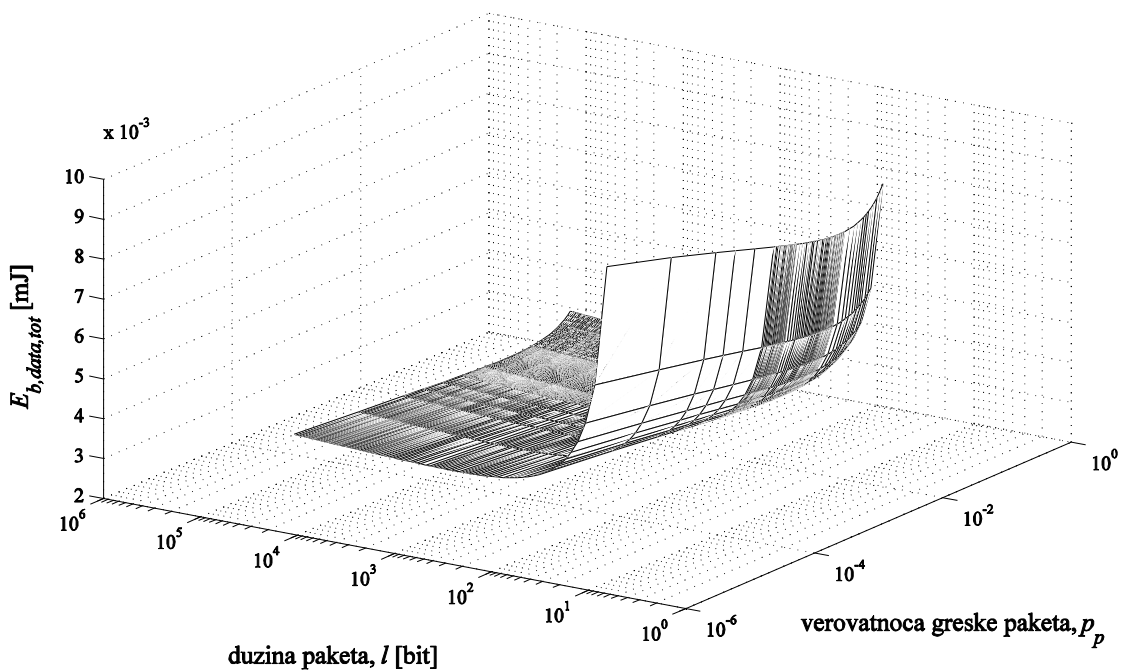
Kod svih izračunavanja u ovom poglavlju, za zavisnost ukupne snage koju troši predajnik od predajne snage koristi se L-model, videti poglavlje 3.3.1.

Da bi pokazali kako predajna snaga i dužina paketa utiču na energetska efikasnost evaluirana je zavisnost energetske efikasnosti od predajne snage i dužine paketa, formula (12). Zavisnost je prikazana grafički, za slabljenje kanala $L = 94$ dB i dužinu kontrolnih podataka $l_c = 20$ b, slika 23. Kako su dužina paketa l , predajna snaga p_{tx} i verovatnoća greške paketa p_p jednoznačno povezani formulom (19), na grafiku je prikazana zavisnost od p_p umesto p_{tx} . Evaluacija je urađena u od 125x84 tačaka, pri čemu je za l uzeto 125 tačaka u opsegu 10 do 50000, a za p_p 84 tačke u opsegu od 10^{-5} do 0,2. Traženjem evaluirane maksimalne energetske efikasnosti dolazi se do rešenja problema (4) za slučaj primene tehnike OptTPPL: $E_{b,data,tot,min} = 2,8784$ μ J za $l = l_{opt} = 700$ b i $p_p = p_{p,opt} = 0,03$.

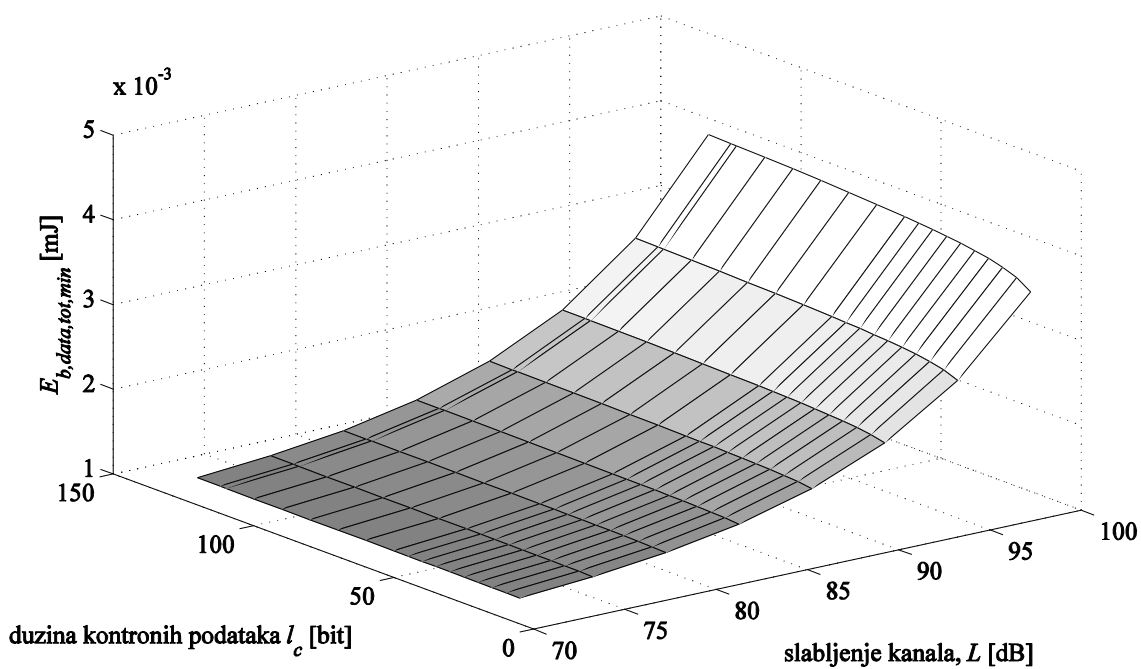
Da bi se videlo kako predajna snaga i dužina paketa treba da budu postavljeni da bi se ostvarila maksimalna energetska efikasnost, za različite vrednosti slabljenja kanala i dužine kontrolnih podataka, prikazani su grafici zavisnosti $E_{b,data,tot,min}$, l_{opt} i $p_{tx,opt}$ za različite L i l_c , slike 24, 25 i 26, respektivno. $E_{b,data,tot,min}$ raste, odnosno, energetska efikasnost opada i sa slabljenjem kanala i sa dužinom kontrolnih podataka. Optimalna dužina paketa raste sa dužinom kontrolnih

podataka, a opada sa slabljanjem kanala. Optimalna snaga predaje raste i sa slabljenjem kanala i sa dužinom kontrolnih podataka. Optimalna dužina paketa je blizu dužine test paketa samo za izuzetno male dužine kontrolnih podataka i velika slabljanja kanala. U svim drugim slučajevima je znatno veća. Analizirajući vrednosti optimalne izlazne snage, dolazi se do zaključka da bi p_{tx} trebalo da može da se podesi sa znatno većom rezolucijom (bar 0,01 mW) da bi OptTPPL tehnika bila moguća, od rezolucije podržane na savremenim TX uređajima namenjenim za BSM upotrebu.

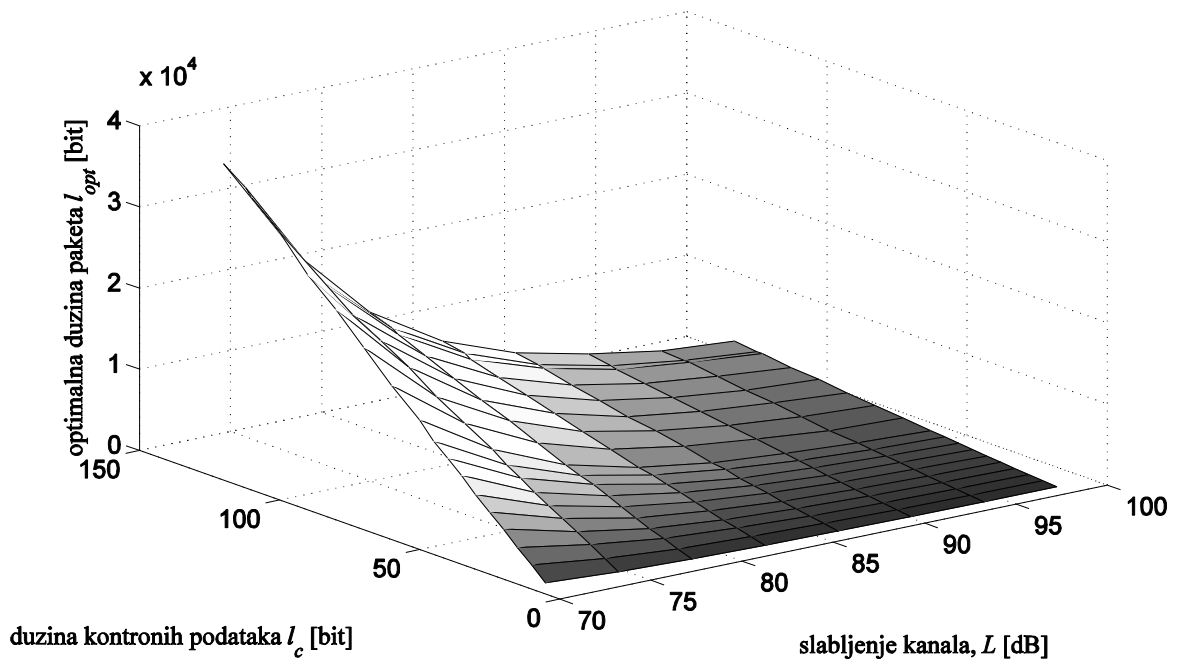
Uz pomoć grafika sa slika 24 i 25 mogu da se pronađu optimalna energija i optimalna dužina fragmenta za različite dužine kontrolnih podataka i za različita slabljenja kanala. Neka je optimalna energija po bitu kada se primeni AFR tehnika, $E_{b,data,tot,min}^{AFR}$ i neka je optimalna energija po bitu kada se vrši transmisija jednim paketom ekvivalentne dužine kao zbir dužina svih fragmenata, $E_{b,data,tot,min}^{single}$. Na slici 27 prikazana je relativna ušteda energije u slanju paketa kada se koristi AFR tehnika, u odnosu na slanje OptTPPL tehnikom ekvivalentne količine podataka, $(E_{b,data,tot,min}^{single} - E_{b,data,tot,min}^{AFR})/E_{b,data,tot,min}^{single}$. Relativna ušteda je prikazana u zavisnosti od broja agregiranih fragmenata. Ušteda brzo raste sa brojem fragmenata i dostiže asimptotsku vrednost već za nešto manje od 50 fragmenata. Ušteda raste sa slabljenjem kanala, takođe.



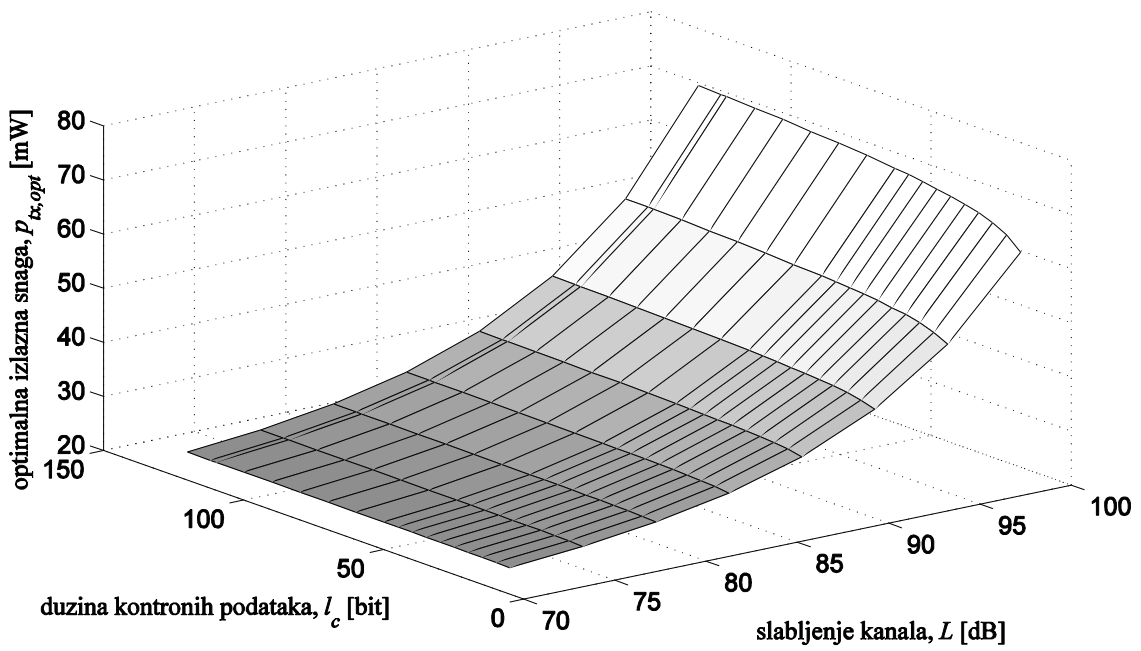
Slika 23. Zavisnost energetske efikasnosti od dužine paketa i verovatnoće greške paketa za slabljenje kanala od 94 dBm I dužinu kontrolnih podataka 20 b



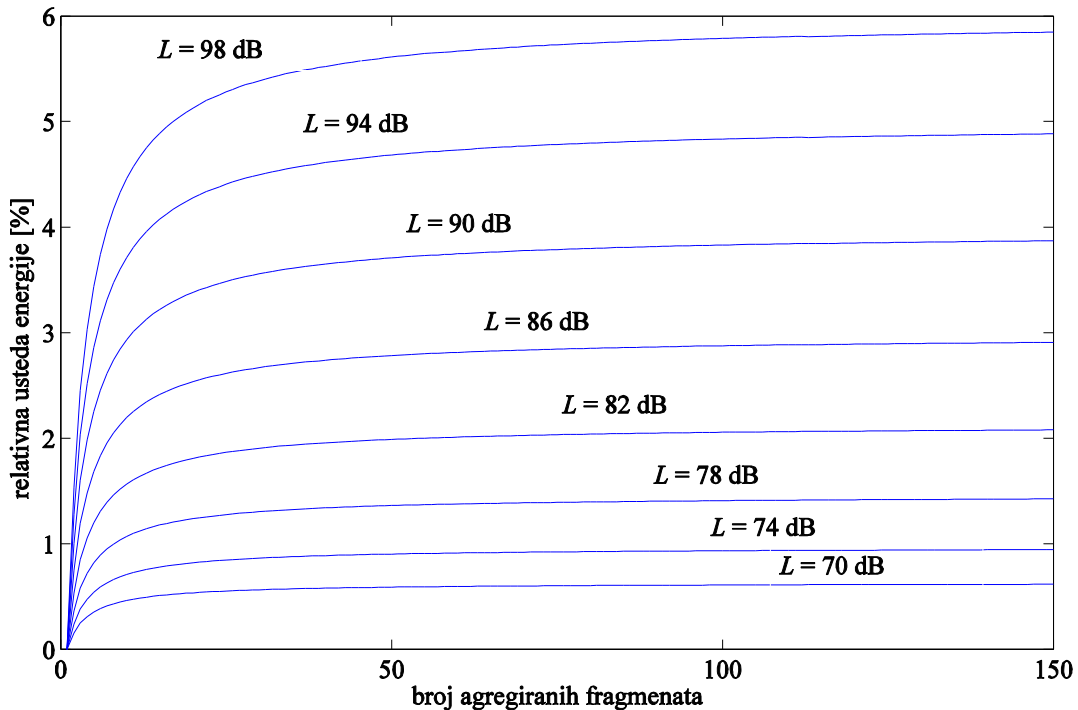
Slika 24. $E_{b,data,tot,min}$ za različite L i l_c



Slika 25. l_{opt} za različite L i l_c



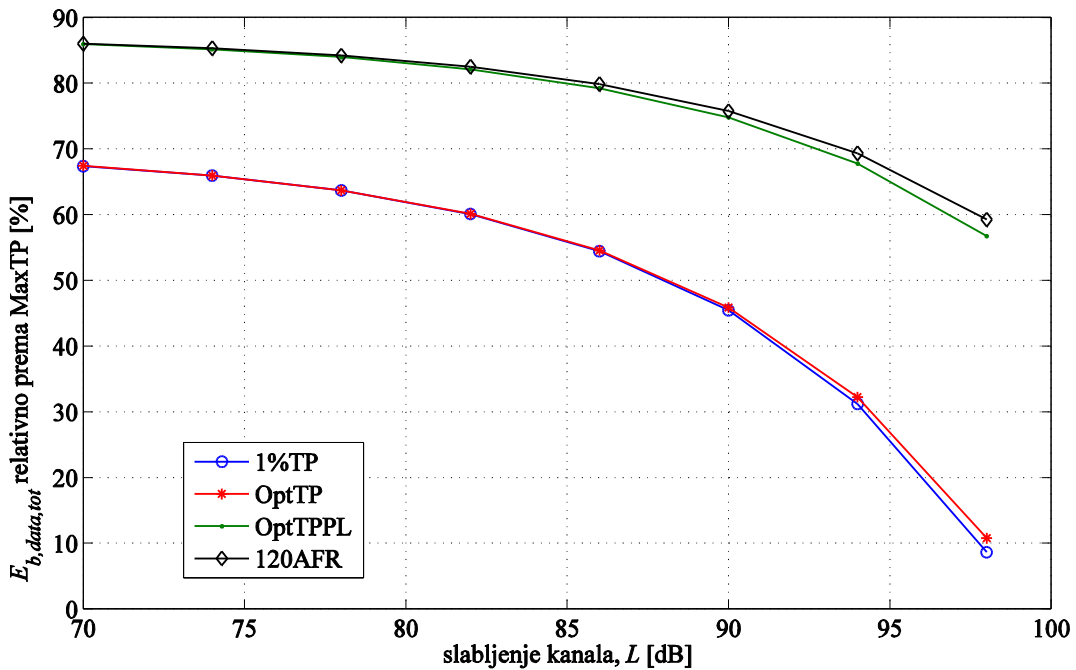
Slika 26. $p_{tx,opt}$ za različite L i l_c



Slika 27. Relativna ušteda energije u slanju paketa AFR tehnikom u odnosu na slanje OptTPPL tehnikom

Rešavanjem problema (68) - (70) i problema (4) za tehnike OptTPPL i 120AFR, pod uslovima iznetim na početku ovog poglavlja moguće je uporediti energetska efikasnost tehnika prikazanih u poglavlju 3.5. Na slici 28 je prikazan relativan odnos energije optimalne transmisije za sve tehnike prema MaxTP tehnici, $(E_{b,data,tot,min}^{MaxTP} - E_{b,data,tot,min}^{teh})/E_{b,data,tot,min}^{MaxTP}$, *teh* označava ostale tehnike, $teh \in \{1\%TP, OptTP, OptTPPL, 120AFR\}$. Relativan odnos je dat za različite vrednosti slabljenja kanala.

Vrednosti za ukupnu potrošenu energiju po bitu kod MaxTP i 1%TP tehnika su dobijene direktnim izračunavanjem formule (12) dok su za OptTP i OptTPPL tehnike vrednosti dobijene evaluacijom minimuma iste formule u 125x84 tačaka, pri čemu je za *l* uzeto 125 tačaka u opsegu od 10 do 50000, a za *p_p* 84 tačke u opsegu od 10^{-5} do 0,2. Vrednosti za 120AFR tehniku su dobijene na isti način kao za OptTPPL, s tim što je korišćena ekvivalentna vrednost za dužinu kontrolnih podataka umesto dužine kontrolnih podataka.



Slika 28. $E_{b,data,tot,min}$ za različite tehnike transmisije relativno prema MaxTP tehnici

Samo tehnikom adaptivne snage transmisije moguće je postići značajne uštede energije, naročito pri malim slabljenjima kanala, krive 1%TP i OptTP. Kako slabljenje kanala raste, rastu i 1% PER i optimalna snaga transmisije i za slabljenje kanala $L_{max,1\%}$, odnosno, $L_{max,opt}$ (videti 3.5.2 i 3.5.3) dostižu vrednost maksimalne snage. Na tim slabljenjima kanala E2 za 1%TP, odnosno, OptTP se izjednačava sa E2 MaxTP tehnike. OptTP pokazuje nešto bolju energetske efikasnost nego 1%TP.

Kada se adaptacija snage transmisije i adaptacija dužine paketa koriste zajedno, OptTPPL, mogu da poboljšaju energetske efikasnost u odnosu na OptTP od 17% do 50%, za slabljenje kanala od 70 dB do 98 dB, respektivno. Kada se primeni i tehnika agregacije paketa u kombinaciji sa prethodne dve, poboljšanja su čak veća, kriva 120AFR. E2 kod OptTPPL i 120AFR opada sa slabljenjem kanala ali znatno sporije nego kod tehnika baziranih samo na adaptaciji snage transmisije. Imajući u vidu da su tehnike zasnovane na adaptaciji snage transmisije, zapravo PHY tehnike, a OptTPPL i 120AFR uključuju i MAC sloj, može se zaključiti da *cross-layer* pristup optimizaciji daje bolje rezultate i u slučajevima kada tehnike bazirane na pojedinačnim slojevima ne mogu da doprinesu boljem rezultatu.

S obzirom na to da su MaxTP i 1%TP PHY tehnike, koje se najviše koriste u savremenoj

praksi, pokazuje se da *cross-layer* pristupom E2 može znatno da se unapredi.

4.3 Odnos energetske efikasnosti i pouzdanosti

U ovom delu je ispitano kako tehnike adaptacije predajne snage, dužine paketa, maksimalnog broja pokušaja i bitske brzine utiču na E2-pouzdanost odnos kada se komunikacija odvija preko AWGN kanala i Rayleigh blok fejdning kanala bez frekvencijske selekcije. Rešavan je problem definisan formulom (4) za dva slučaja OptTPPL tehnike. U prvom slučaju postoji ograničenje po bitskoj brzini, brzina je fiksirana na 19,2 kb/s. U drugom slučaju je rešavan problem (4) za tehniku OptTPPL definisan kao u poglavlju 4.1.3. Za oba slučaja prikazani su i rezultati kada se umesto varijable odlučivanja x_3 – broj pokušaja slanja paketa, m , (klasične ARQ tehnike) koristi srednji broj pokušaja slanja paketa, $E\{m\}$, (rARQ tehnika). U ovom poglavlju se koristi rARQ realizacija data formulom (59).

Kod svih izračunavanja u ovom poglavlju, za zavisnost ukupne snage koju troši predajnik od predajne snage koristi se RFP-model, videti poglavlje 3.3.2, sa optimalnim parametrom fitovanja za CC1000 RPP $v_{opt} = 0,64$.

Problem (4) je u ovom poglavlju rešavan za proizvoljno izabrano srednje slabljenje, $\bar{L} = 94$ dB iz Regiona prilogođenja snage (videti poglavlje 3.3.1).

4.3.1 Odnos energetske efikasnosti i pouzdanosti za fiksnu bitsku brzinu

Radi lakšeg praćenja ponovljen je problem (4) za konkretan slučaj optimizacije E2-pouzdanost odnosa za slučaj OptTPPL tehnike kada je bitska brzina fiksirana, formule: (71) za ARQ tehniku, (72) za rARQ tehniku.

$$\begin{aligned} & \max \mathbf{F}(\mathbf{x}) \mid \mathbf{F} \in \mathbf{Z}, \mathbf{x} \in \mathbf{X}, \\ & \mathbf{Z} = \left\{ \mathbf{z} = \left(E_{b,data,tot}(\mathbf{x}), e(\mathbf{x}) \right) \mid \mathbf{x} \in \mathbf{X} \right\}, \\ & \mathbf{X} = \{ \mathbf{x} = (r, l, m, p_{tx}) \mid r = 19,2 \text{ kb/s}, l \in \mathbf{N}_l, m \in \mathbf{N}, p_{tx} \in \mathbf{P} \} \end{aligned} \quad (71)$$

$$\begin{aligned} & \max \mathbf{F}(\mathbf{x}) \mid \mathbf{F} \in \mathbf{Z}, \mathbf{x} \in \mathbf{X}, \\ & \mathbf{Z} = \left\{ \mathbf{z} = \left(E_{b,data,tot}(\mathbf{x}), e(\mathbf{x}) \right) \mid \mathbf{x} \in \mathbf{X} \right\}, \\ & \mathbf{X} = \{ \mathbf{x} = (r, l, E\{m\}, p_{tx}) \mid r = 19,2 \text{ kb/s}, l \in \mathbf{N}_l, E\{m\} \geq 0, p_{tx} \in \mathbf{P} \} \end{aligned} \quad (72)$$

Detaljniju definiciju prostora odlučivanja i prostora ciljeva, kao i definiciju funkcija preslikavanja, videti u poglavljima 4.1.1, 4.1.2, respektivno.

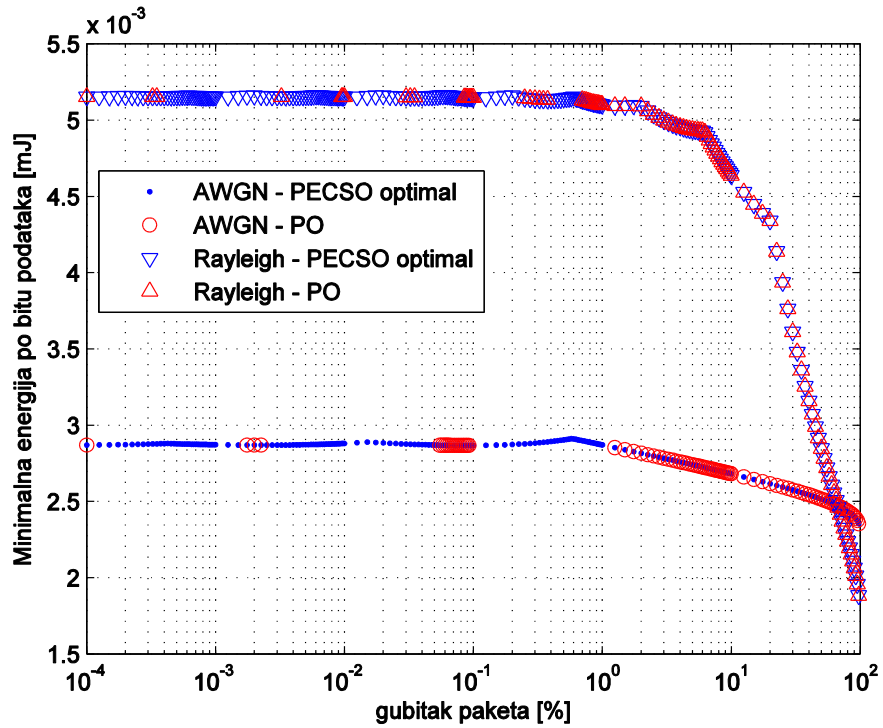
U [112] je prikazano rešenje (71) za slučaj Rayleigh blok fejdning kanala bez frekvencijske selekcije. Pokazano je da rešavanjem ekvivalentnog problema (73) numeričkom evaluacijom, može da se dođe do egzaktnih PO tačaka.

$$\begin{aligned} & \max \mathbf{F}(\mathbf{y}) \mid \mathbf{F} \in \mathbf{Z}, \mathbf{y} \in \mathbf{Y}, \\ & \mathbf{Z} = \left\{ \mathbf{z} = \left(E_{b,data,tot}(\mathbf{y}), e(\mathbf{y}) \right) \mid \mathbf{y} \in \mathbf{Y} \right\}, \\ & \mathbf{Y} = \{ \mathbf{y} = (r, l, m, p_p) \mid p_p = p_p(r, l, m, p_{tx}), (r, l, m, p_{tx}) \in \mathbf{X}, r = 19,2 \text{ kb/s} \} \end{aligned} \quad (73)$$

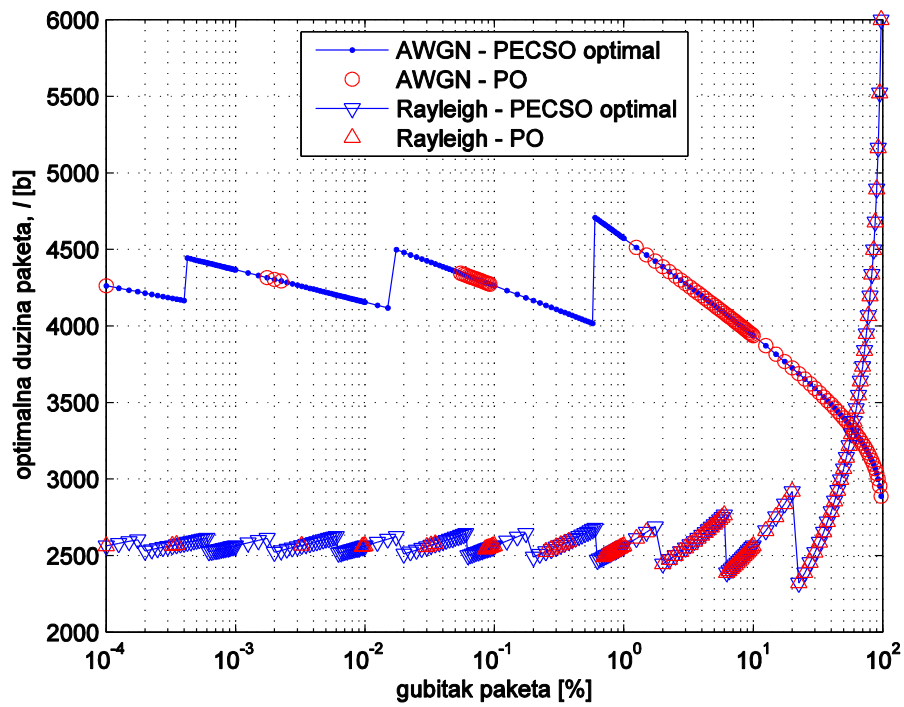
Na sličan način može da se dođe do egzaktnih PO tačaka MOO problema (71), za slučaj AWGN kanala.

Do rešenja problema (72), za slučajeve AWGN i Rayleigh blok fejdning kanala bez frekvencijske selekcije, dolazi se na sličan način kao i do rešenja za ekvivalentne slučajeve problema (71). Razlika je u izračunavanju verovatnoće greške u zavisnosti od verovatnoće gubitka paketa i dozvoljenog broja retransmisija. Kod problema (71), p_p se direktno izračunava na osnovu (42), a kod (72), p_p se izračunava na osnovu (48), direktno za $E\{m\} \leq 2$, a za $E\{m\} > 2$ numerički.

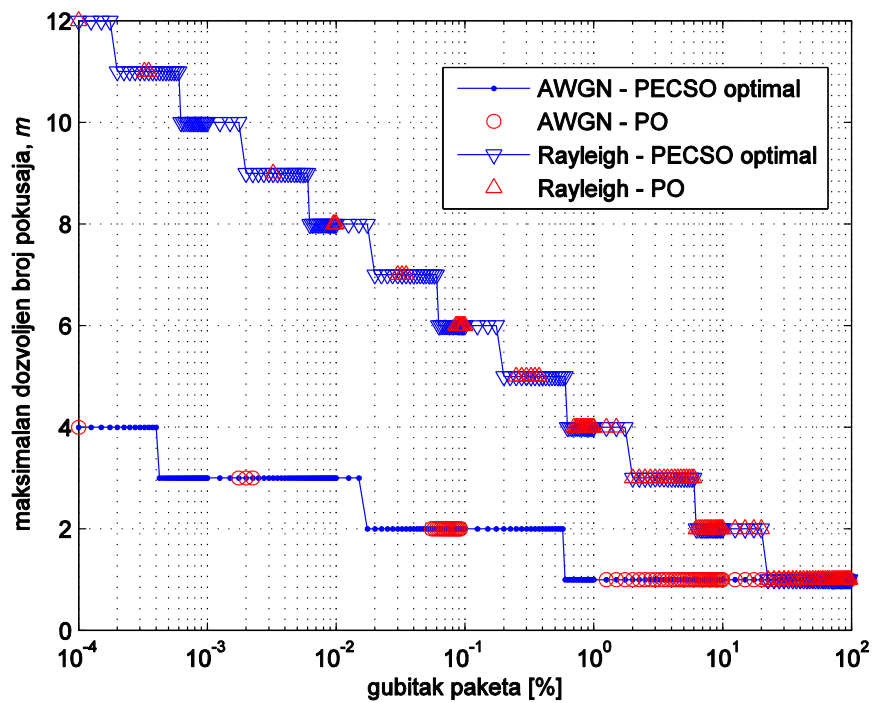
PECSO optimalna i PO rešenja problema (71) za AWGN i Rayleigh blok fejdning kanal bez frekvencijske selekcije, vizuelizovana u prostoru ciljeva, prikazana su na slici 29. Slika 29. Prostor ciljeva (ARQ) – PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, Kako prostor odlučivanja ima 3 promenjive, vizuelizacija rešenja problema (71) u prostoru odlučivanja nije dovoljno jasna pa su promenjive odlučivanja prikazane svaka za sebe u zavisnosti od cilja gubitka paketa: dužina paketa – slika 30, maksimalan broj pokušaja slanja paketa - slika 31 i predajna snaga - slika 32. Takođe, prikazana je i očekivana vrednost broja pokušaja slanja paketa, \bar{n} , za PECSO optimalne tačke - slika 33. Rezultati su dobijeni numeričkom evaluacijom za $e \in \{10^{-6}, \dots, 0,9\}$ sa rezolucijom od 40 tačaka po decimalnom mestu, $1 \leq m \leq 50$ i $1000 \leq m \leq 8000$ b. Kako je optimalna dužina paketa za Rayleigh blok fejdning kanal oko 2500 b ili više, zadovoljen je dovoljan uslov aproksimacije (21), da je paket dugačak.



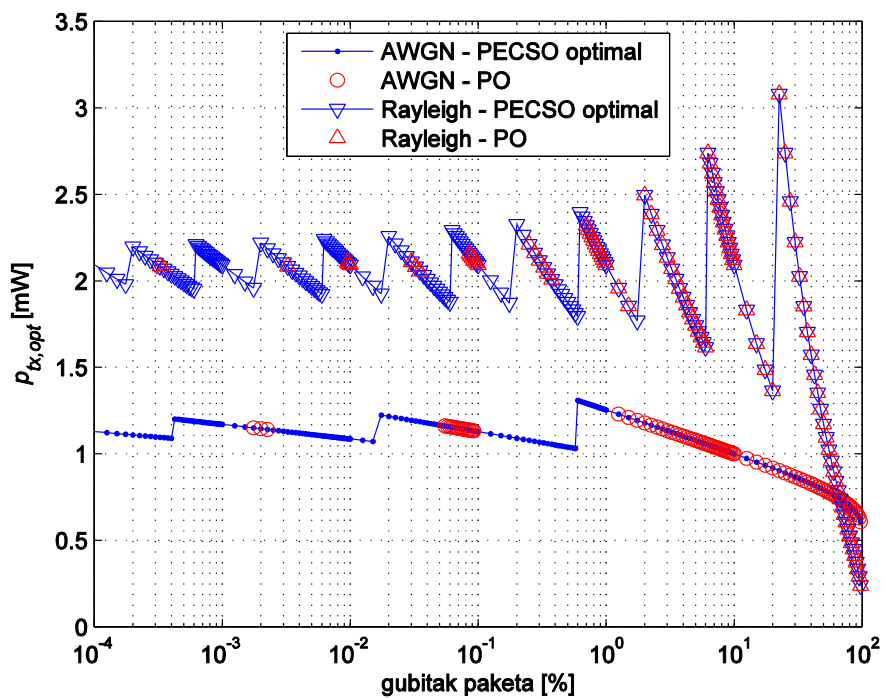
Slika 29. Prostor ciljeva (ARQ) – PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



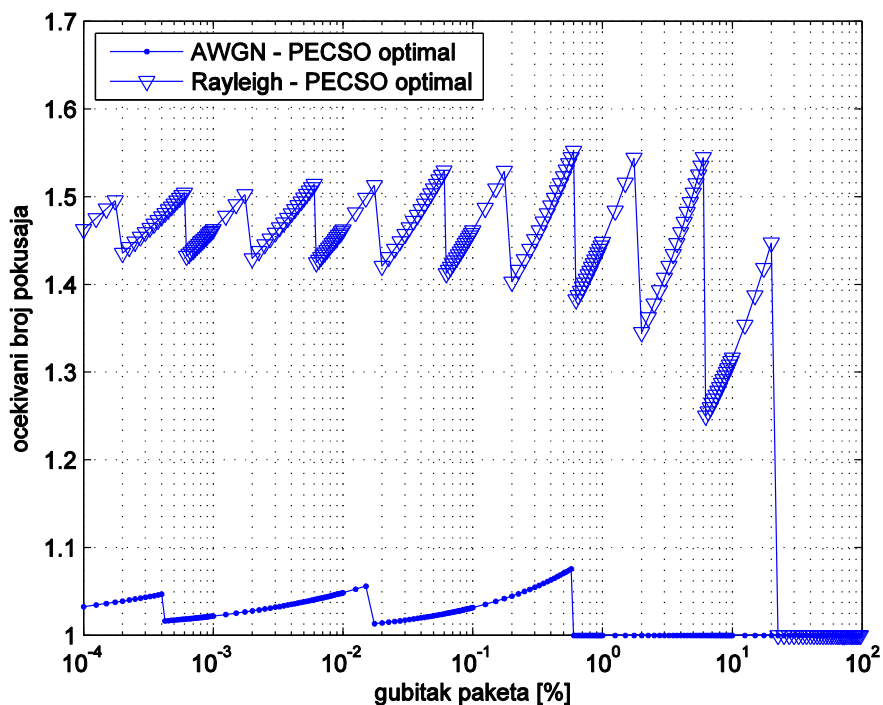
Slika 30. Dužina paketa – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



Slika 31. Maksimalan broj pokušaja slanja paketa – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECISO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



Slika 32. Predajna snaga – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECISO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



Slika 33. Očekivan broj pokušaja slanja paketa, \bar{n} , u zavisnosti od gubitka paketa, za PECSO optimalne tačke, za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB

Sa slike 29 se vidi da bolja energetska efikasnost može da se postigne na račun pouzdanosti i obrnuto. Međutim, kontra od intuicije, PECSO optimalna kriva nije monotona što implicira da PO kriva ne bude kontinualna. To znači da transmisija sa manjom verovatnoćom gubitka paketa može da bude energetski efikasnija od transmisije sa većom verovatnoćom gubitka paketa. Fenomen diskontinualnosti Pareto fronta se javlja iz razloga što prostor ciljeva nije kontinualan pa kada god se porede dovoljno bliske PECSO optimalne tačke tako da je njihova razlika manja od rezolucije prostora ciljeva, postojaće diskontinuitet Pareto fronta. Intuitivno, prostor ciljeva definisan sa dva cilja: minimalna energija po bitu i verovatnoća gubitka paketa, trebalo bi da bude kontinualan \mathbf{R}^2 podprostor. Međutim, u problemu (4), prostor ciljeva \mathbf{Z} je definisan kao skup samo onih tačaka u koje se preslikavaju tačke iz prostora odlučivanja. Kako prostor odlučivanja \mathbf{X} nije kontinualan podprostor \mathbf{R}^3 , to ni \mathbf{Z} ne može da bude kontinualan \mathbf{R}^2 podprostor.

Sa praktične tačke gledišta, diskontinuitet Pareto fronta ima značaj jedino kada se javlja pri rezoluciji koja je sistemom komunikacije dostižna. Drugim rečima, od praktičnog značaja je diskontinuitet koji se javlja pri malim vrednostima verovatnoće gubitka paketa, koji je prikazan

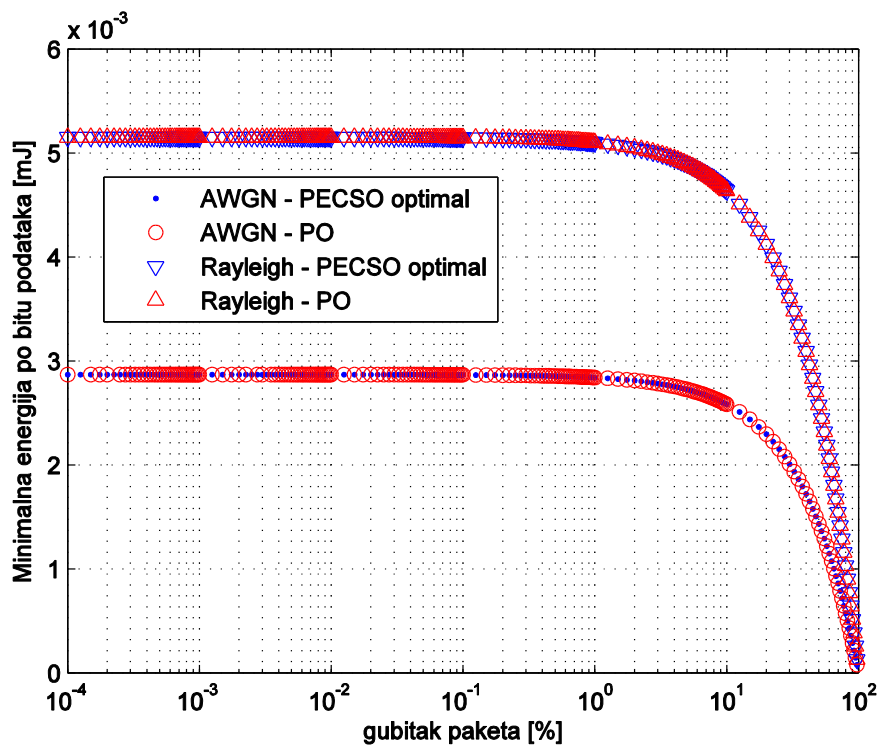
na slici 29, dok diskontinuitet koji je detektovan za $e \in (20,787711279004, 20,787711279005)\%$, gde je provereno 100 tačaka pri rezoluciji za energiju od 10^{-16} , videti [112], nije od praktičnog značaja.

Ideja je da se postigne kontinualnost Pareto fronta na rezolucijama prostora ciljeva od praktičnog značaja. Ovu ideju je moguće ostvariti povećanjem rezolucije prostora odlučivanja. Imajući u vidu da je u (71), slučaj primene adaptivne ARQ tehnike, $\mathbf{X} \subset (\mathbf{N} \times \mathbf{N} \times \mathbf{R})$, ideja povećanja rezolucije prostora odlučivanja može da se ostvari tako što se umesto varijable odlučivanja x_3 – broj pokušaja slanja paketa, m , (klasična ARQ tehnika) koristi srednji broj pokušaja slanja paketa, $E\{m\}$, (rARQ tehnika). Kada se koristi rARQ tehnika, prostor odlučivanja postaje $\mathbf{X} \subset (\mathbf{N} \times \mathbf{R} \times \mathbf{R})$.

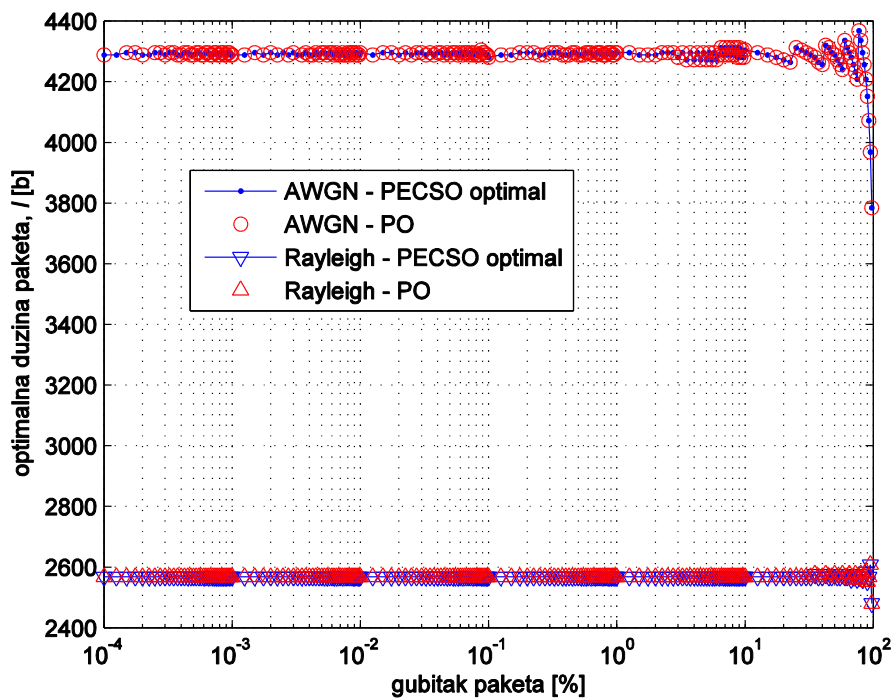
PECSO optimalna i PO rešenja problema (72) za AWGN i Rayleigh blok fejdning kanal bez frekvencijske selekcije, vizuelizovana u prostoru ciljeva, prikazana su na slici 34. Vizuelizacija rešenja u prostoru odlučivanja data je za svaku dimenziju prostora posebno, u zavisnosti od cilja gubitka paketa: dužina paketa - slika 35, očekivan maksimalan broj pokušaja slanja paketa - slika 36 i predajna snaga - slika 37. Takođe, prikazana je i očekivana vrednost broja pokušaja slanja paketa, \bar{n} , za PECSO optimalne tačke - slika 38. Rezultati su dobijeni numeričkom evaluacijom za $e \in \{10^{-6}, \dots, 0,9\}$ sa rezolucijom od 40 tačaka po decimalnom mestu, $0 \leq E\{m\} \leq 13$ sa rezolucijom 0,01 i $2300 \leq l \leq 4500$ b. Kako je optimalna dužina paketa za Rayleigh blok fejdning kanal oko 2500 b ili više, zadovoljen je dovoljan uslov aproksimacije (21), da je paket dugačak.

Pareto front i PECSO optimalna kriva se razlikuju u 4 tačke za AWGN kanal, a za Rayleigh kanal se poklapaju. Broj tačaka u kojima se Pareto front i PECSO optimalna kriva razlikuju, smanjuje se sa rezolucijom $E\{m\}$, koja se koristi u numeričkoj evaluaciji tako da za $0 \leq E\{m\} \leq 13$ sa rezolucijom 0,0025, razlika za AWGN kanal je u samo jednoj tački. Poređenjem ARQ i rARQ tehnika, slika 29 i slika 34, vidi se da povećanje rezolucije u prostoru odlučivanja značajno doprinosi smanjenju intervala prekida Pareto fronta.

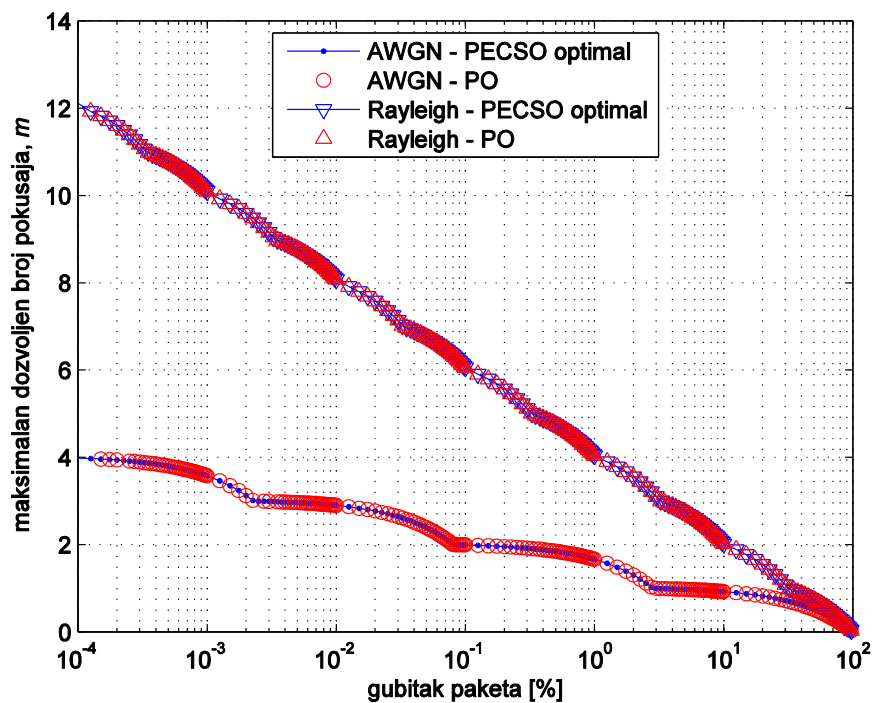
Uvođenjem mogućnosti odbacivanja paketa kod rARQ tehnike, očekivani broj pokušaja opada sa verovatnoćom gubitka paketa i dostiže nultu vrednost, slika 38, dok kod klasične ARQ tehnike opada do jednog pokušaja, slika 33, što implicira da ukupna energija po poslatom bitu opada sa verovatnoćom gubitka paketa do nulte vrednosti, kod rARQ, slika 34, a kod ARQ, do vrednosti energije potrebne za jedan pokušaj slanja paketa, slika 29.



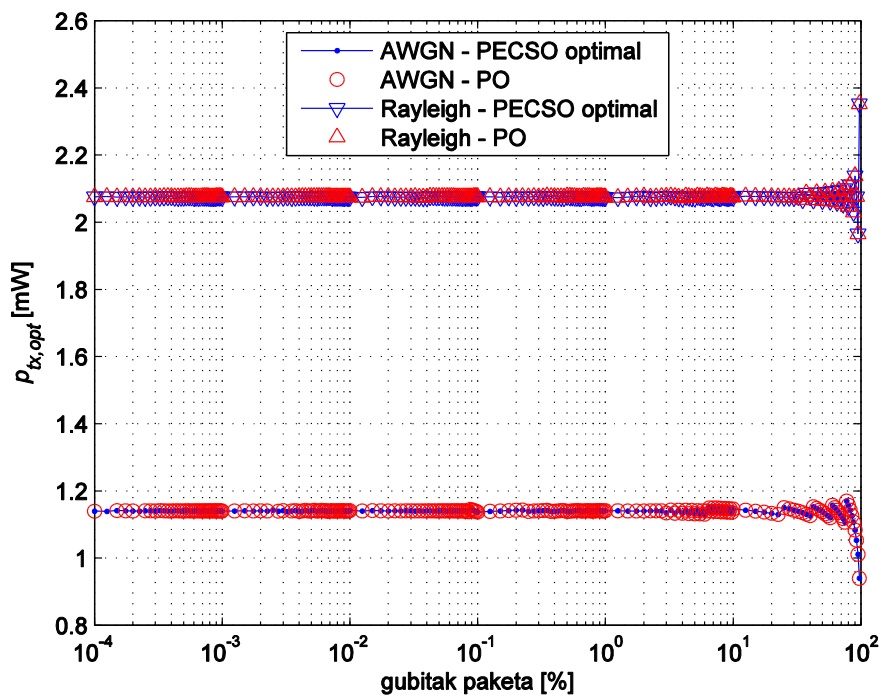
Slika 34. Prostor ciljeva (rARQ) – PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



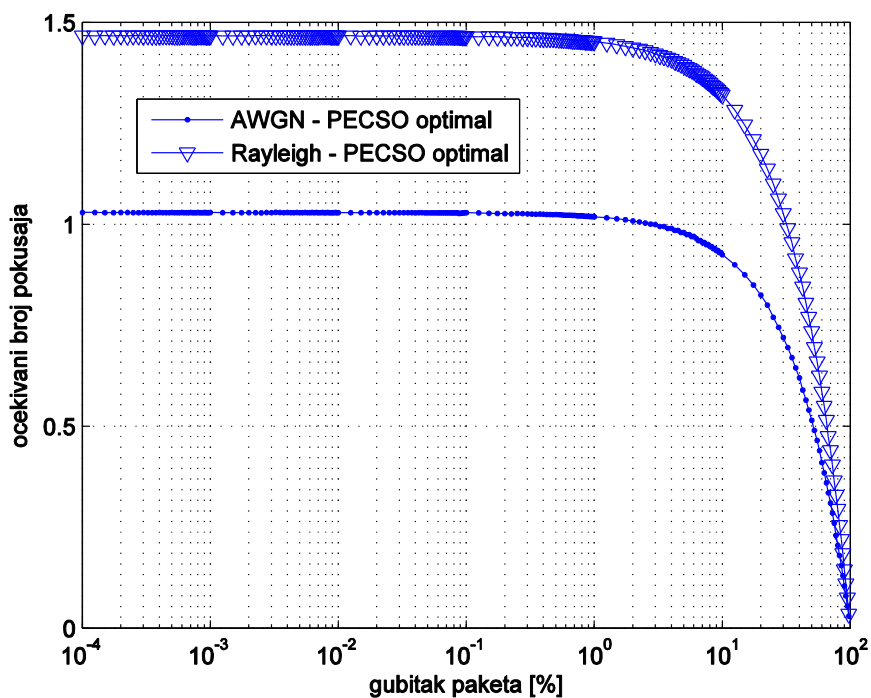
Slika 35. Dužina paketa (rARQ) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



Slika 36. Maksimalan broj pokušaja slanja paketa ($rARQ$) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECISO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



Slika 37. Predajna snaga ($rARQ$) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECISO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



Slika 38. Očekivan broj pokušaja slanja paketa, \bar{n} , u zavisnosti od gubitka paketa (rARQ), za PECSO optimalne tačke, za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB

4.3.2 Odnos energetske efikasnosti i pouzdanosti

Radi lakšeg praćenja ponovljen je problem (4) za konkretan slučaj optimizacije E2-pouzdanost odnosa za slučaj OptTPPL tehnike kada se optimizacija vrši po sve 4 dimenzije prostora odlučivanja, formula (74). Prikazan je samo slučaj komunikacije preko Rayleigh blok fejdinog kanala bez frekvencijske selekcije kada se koristi rARQ tehnika.

$$\max \mathbf{F}(\mathbf{x}) \mid \mathbf{F} \in \mathbf{Z}, \mathbf{x} \in \mathbf{X},$$

$$\mathbf{Z} = \left\{ \mathbf{z} = \left(E_{b,data,tot}(\mathbf{x}), e(\mathbf{x}) \right) \mid \mathbf{x} \in \mathbf{X} \right\}, \quad (74)$$

$$\mathbf{X} = \{ \mathbf{x} = (r, l, E\{m\}, p_{tx}) \mid r \geq 0, l \in \mathbf{N}_l, E\{m\} \geq 0, p_{tx} \in \mathbf{P} \}$$

Detaljniju definiciju prostora odlučivanja i prostora ciljeva, kao i definiciju funkcija preslikavanja, videti u poglavljima 4.1.1, 4.1.2, respektivno.

Do rešenja problema (74) dolazi se evaluacijom (72) za različite vrednosti bitske brzine.

PECSO optimalna i PO rešenja problema (74) za Rayleigh blok fejdinog kanala bez frekvencijske selekcije, vizuelizovana u prostoru ciljeva, prikazana su na slici 39. Kako prostor odlučivanja ima 4 promenjive, vizuelizacija rešenja problema (74) u prostoru odlučivanja nije

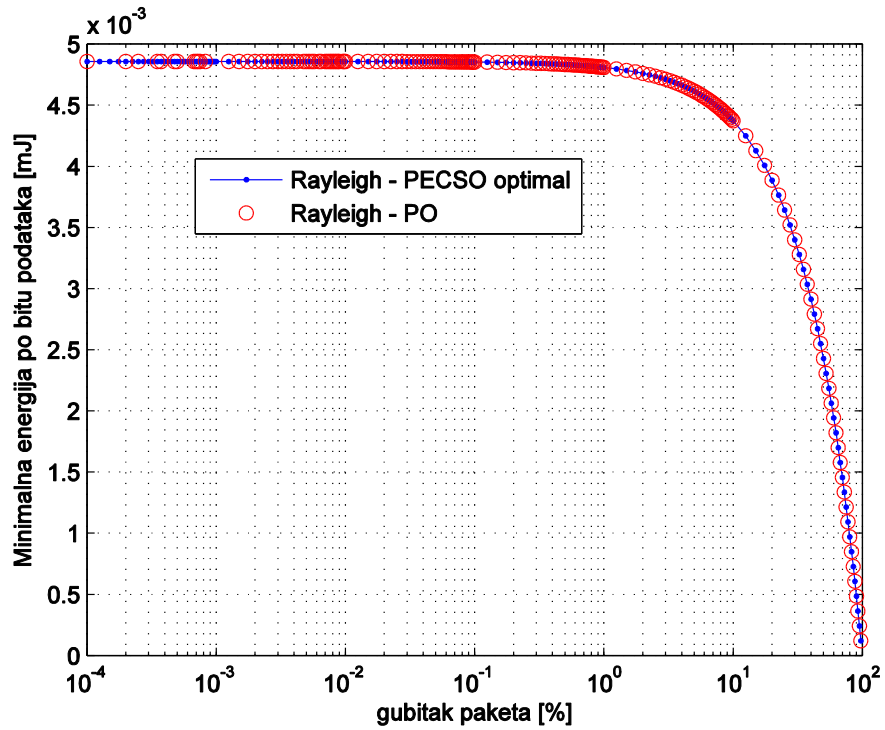
dovoljno jasna pa su promenjive odlučivanja prikazane svaka za sebe u zavisnosti od cilja gubitka paketa: bitska brzina - slika 40, dužina paketa - slika 41, maksimalan broj pokušaja slanja paketa - slika 42 i predajna snaga - slika 43. Takođe, prikazana je i očekivana vrednost broja pokušaja slanja paketa, \bar{n} , za PECSO optimalne tačke - slika 44. Zbog velikog broja tačaka u prostoru odlučivanja rezultati su dobijeni numeričkom evaluacijom u dva stepena. U prvom stepenu je rađena evaluacija sa grubom rezolucijom za bitsku brzinu, $1 \leq r \leq 100$ kb/s sa rezolucijom 1000 b/s. U drugom stepenu je korišćena finija rezolucija, u okolini bitske brzine koja je u prvom stepenu detektovana kao optimalna, $26,7 \leq r \leq 28,4$ kb/s sa rezolucijom 25 b/s. U oba stepena: $e \in \{10^{-6}, \dots, 0,9\}$ sa rezolucijom od 40 tačaka po decimalnom mestu, $0 \leq E\{m\} \leq 40$ sa rezolucijom 0,0025 i $800 \leq l \leq 4500$ b sa rezolucijom 8 b. Kako je optimalna dužina paketa za Rayleigh blok fejdning kanal oko 1900 b ili više, zadovoljen je dovoljan uslov aproksimacije (21), da je paket dugačak.

S obzirom na visinu rezolucije pretraživanja dobijeni PF nije kontinualan. Kao i u ranijim slučajevima, sa povećanjem rezolucije smanjuju se intervali PF diskontinuiteta.

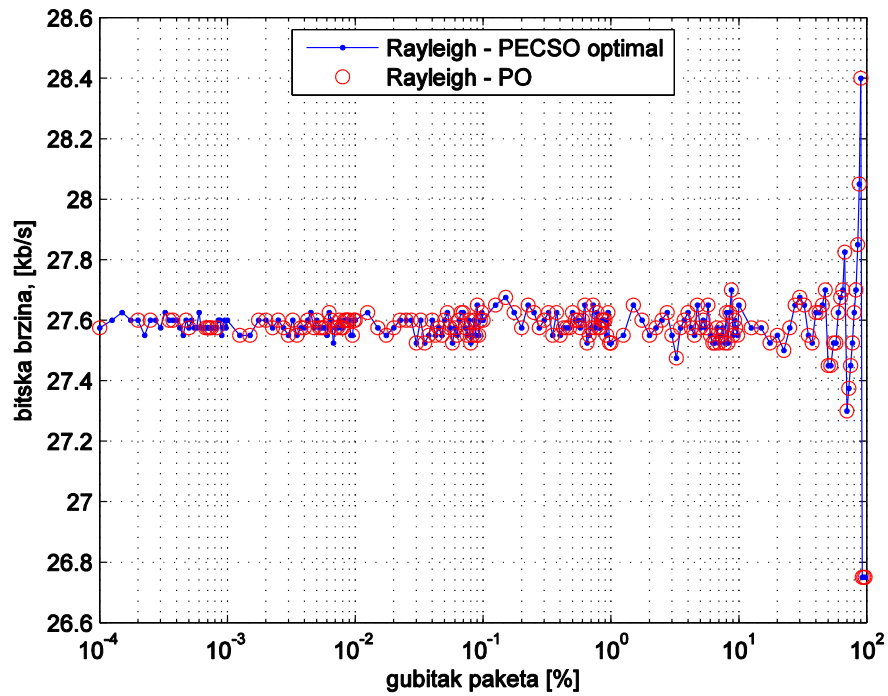
Poređenjem slike 34, slučaj Rayleigh kanala i fiksna bitska brzina ($r = 19,2$ kb/s) i slike 39, bitska brzina je promenjiva, vidi se da je moguće postići bolje Pareto optimalne vrednosti ciljeva kada se u prostor odlučivanja uključi i bitska brzina.

Optimalna bitska brzina, optimalna dužina paketa i optimalna snaga predaje imaju male oscilacije u zavisnosti od verovatnoće gubitka paketa, $<5,7\%$, $<5\%$ i $< 2,5 \cdot 10^{-5}\%$, respektivno. Može da se zaključi da odnos minimlane energije po bitu podataka i verovatnoće gubitka paketa u najvećoj meri može da se kontroliše očekivanim maksimalnim brojem pokušaja slanja paketa, za dato srednje slabljenje kanala.

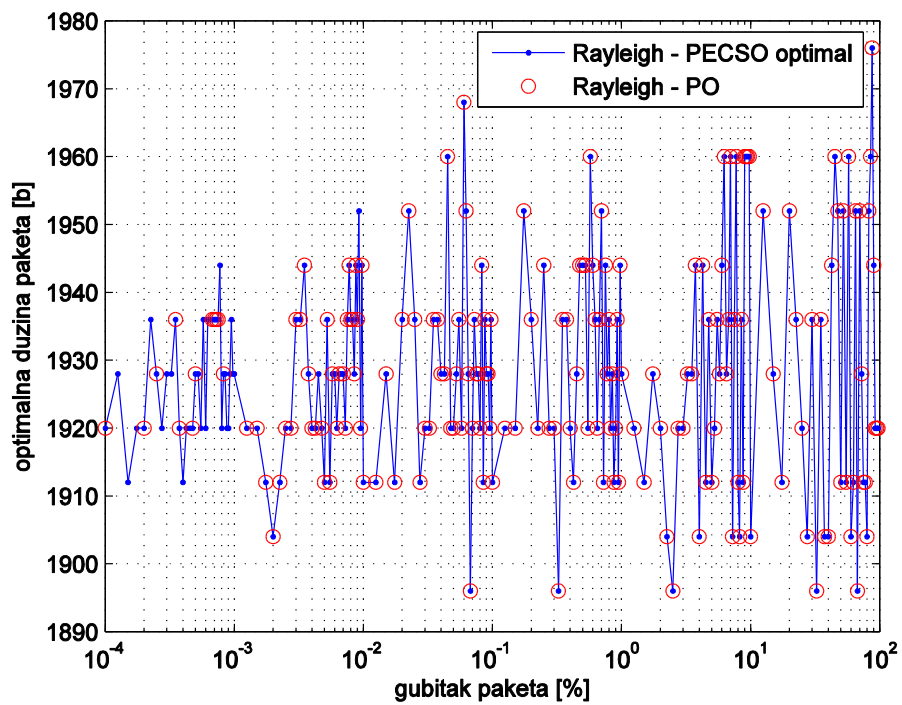
Kako optimalna predajna snaga vrlo malo varira oko maksimalne vrednosti ($p_{tx,max} = 3,1623$ mW), može da se zaključi da je optimalna snaga uvek najveća moguća. Ovaj zaključak je u skladu sa zaključcima iznetim u [41, 70], gde se tvrdi da je najveća moguća bitska brzina i energetska najefikasnija (videti poglavlje 2.2.1), pri čemu je bitska brzina ograničena upravo maksimalnom raspoloživom predajnom snagom. U prilog ovom zaključku ide i efikasnost pojačavača snage, koja je najveća baš za $p_{tx} = p_{tx,max}$, kod PA sa $v < 1$, (videti RFP-model, poglavlje 3.3.2).



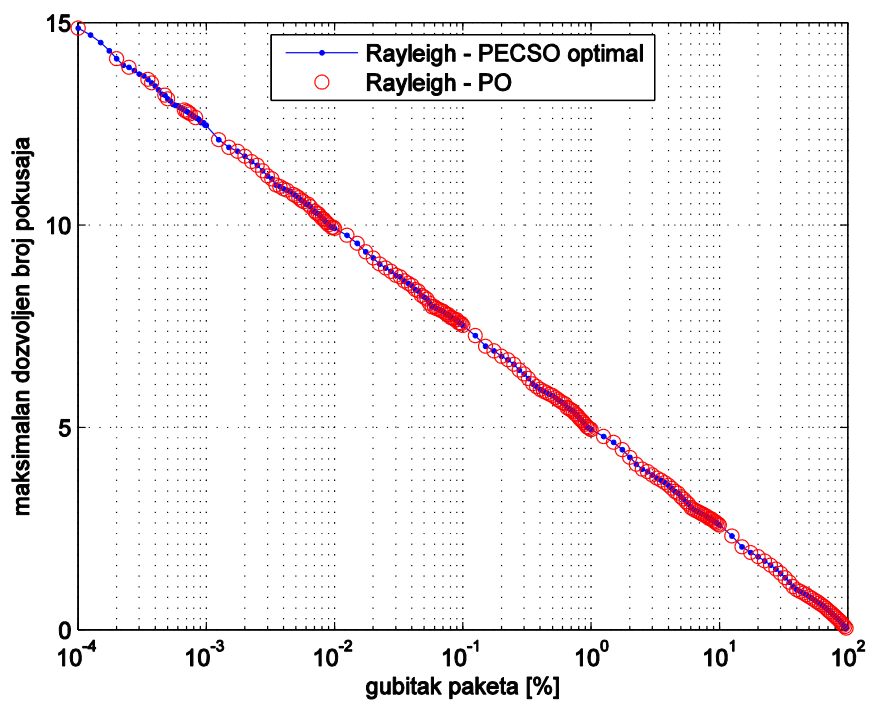
Slika 39. Prostor ciljeva (rARQ) – PECSO i Pareto optimalne tačke za Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



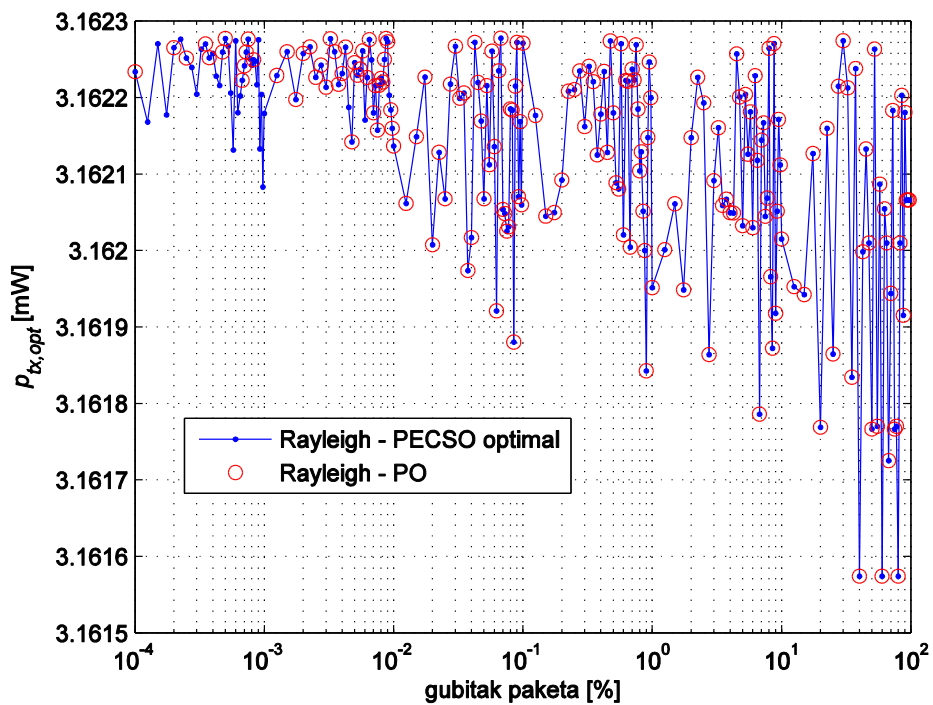
Slika 40. Bitska brzina (rARQ) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



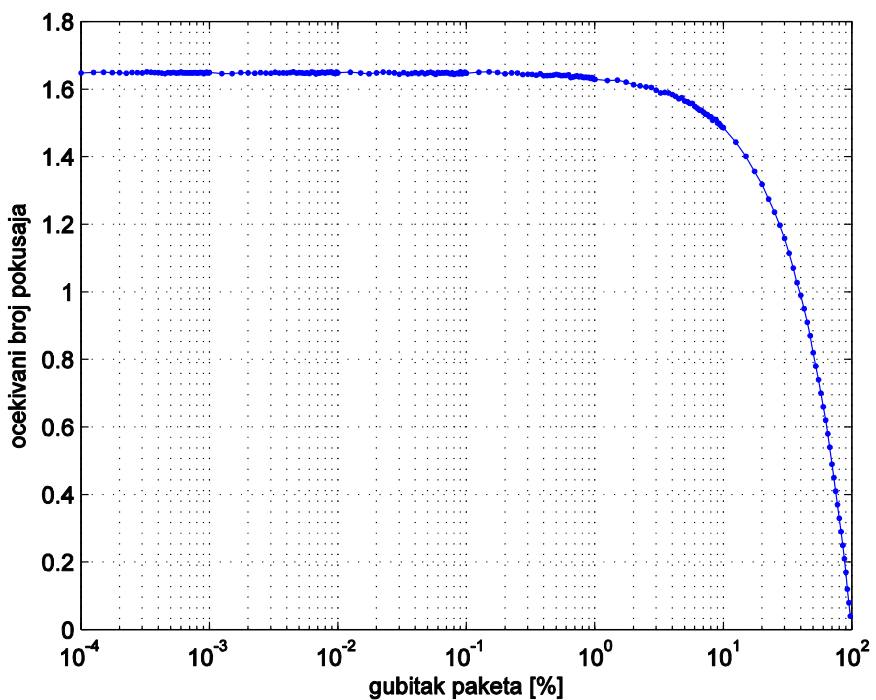
Slika 41. Dužina paketa (*rARQ*) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



Slika 42. Očekivan maksimalan broj pokušaja (*rARQ*) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za AWGN i Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



Slika 43. Predajna snaga (rARQ) – varijabla odlučivanja u zavisnosti od gubitka paketa - PECSO i Pareto optimalne tačke za Rayleigh kanal, $\bar{L} = 94$ dB



Slika 44. Očekivani broj pokušaja slanja paketa, \bar{n} , u zavisnosti od gubitka paketa (rARQ), za PECSO optimalne tačke, za Rayleigh kanal, $L = 94$ dB

5. ZAKLJUČAK

Cilj ove disertacije je kvantitativno određivanje odnosa energetske efikasnosti i pouzdanosti u bežičnim senzorskim mrežama na fizičkom sloju i sloju kontrole pristupa medijumu, kao i pronalaženje optimalnih vrednosti ovog odnosa u smislu višeciljne optimizacije sa Pareto pristupom.

Najpre su detaljno razmotreni razlozi koji nameću energetska efikasnost i pouzdanost kao najbitnije probleme u BSM i data je vremenska perspektiva u poslednjih 15-ak godina, koja se poklapa sa drugom generacijom BSM, rada na ova dva problema. Razmotrena je podrška za prevazilaženje ovih problema, sa komercijalnog stanovišta, i dat je tabelaran pregled karakteristika savremenih radio-primopredajnika.

Zatim su analizirane različite metrike kojima mogu da se kvantifikuju energetska efikasnost i pouzdanost na fizičkom sloju i sloju kontrole pristupa medijumu. Kao metrike koje u najvećoj meri odslikavaju procese na prva dva komunikaciona sloja u bežičnim senzorskim mrežama, detektovane su: ukupna energija po bitu podataka koje ova dva sloja treba da servisiraju, za energetska efikasnost, i 1-verovatnoća gubitka paketa podataka, za pouzdanost.

Kako ukupna energija podrazumeva energiju koju troše predajnik i prijemnik, za potrebe modelovanja energije, koju troši predajnik, razvijeni su originalni L-model i šire primenjiv RFP-model zavisnosti ukupne snage, koju troši predajnik, od snage signala isporučenog predajnoj anteni.

Prostor odlučivanja je definisan sa ciljem da obuhvati sve promenjive veličine na PHY i MAC slojevima, a onda su, za višeciljnu optimizaciju, određene samo one dimenzije prostora odlučivanja koje na ciljeve utiču konkurentno, dok je prostor ciljeva definisan tako da ima dve dimenzije, jednake metrikama za energetska efikasnost i pouzdanost. Prostori odlučivanja i ciljeva i funkcije preslikavanja su definisani tako da svaka tačka u prostoru ciljeva ima bar jednu odgovarajuću tačku u prostoru odlučivanja, odnosno, svaka tačka prostora ciljeva je dostižna iz prostora odlučivanja.

Kako je ukupan problem optimizacije energetske efikasnosti i pouzdanosti kompleksan i ima mnogo faktora koji na njega utiču, analizirano je nekoliko slučajeva, koji mogu da se podele sa više aspekata. Prvi aspekt podrazumeva mesto podešavanja odnosa. U prvom slučaju prostor odlučivanja je definisan tako da obuhvati samo one dimenzije koje se ne podešavaju na RX

strani već samo na TX strani: dužinu paketa, broj pokušaja slanja i snagu predaje. U drugom slučaju je uključena i bitska brzina, koja mora da bude podešena i na RX strani. Drugi aspekt se bavi funkcijama preslikavanja. Definisano je nekoliko tehnika transmisije tako da budu obuhvaćeni slučajevi savremene prakse transmisije u BSM i adaptibilne tehnike po svakoj od dimenzija prostora odlučivanja. Treći aspekt se odnosi na redosled bitnosti ciljeva u BSM. Kako je energetska efikasnost ranije počela i u većoj meri privukla pažnju istraživača, prvo je analiziran slučaj optimizacije energetske efikasnosti ali pod uslovom potpune pouzdanosti. Zatim je uvedena i tolerancija pouzdanosti pa je odnos energetske efikasnosti i pouzdanosti razmotren s ravnopravnim učešćem ciljeva, bez preferenci. Četvrti aspekt se odnosi na tip bežičnog kanala preko kojeg se odvija komunikacija. U prvom slučaju razmotren je teorijski, AWGN model kanala, a u drugom slučaju je razmotren realističan kanal sa blok Rayleigh fejdinom bez frekvencijske selekcije.

Rezultati analize energetske efikasnosti, pod uslovom potpune pouzdanosti, pokazuju da čak 20-50% bolja energetska efikasnost može da se postigne ako se adaptivne tehnike na oba sloja združe u odnosu na adaptivne tehnike na PHY sloju. Sve adaptivne tehnike pokazuju znatno poboljšanje energetske efikasnosti u odnosu na savremenu praksu slanja kratkih paketa maksimalnom raspoloživom snagom.

Analiza E2-pouzdanost odnosa za slučaj komunikacije preko AWGN kanala i blok Rayleigh fejdinog kanala kada se odnos podešava dužinom paketa, predajnom snagom i brojem pokušaja, pokazuje da odnos može da se podešava ali da Pareto front nije kontinualan. Ova činjenica je suprotna intuiciji, a odgovor leži u razlici prostora gde su energetska efikasnost i pouzdanost definisani kao kontinualne veličine i prostora ciljeva definisanog kao skup tačaka dostižnih iz prostora odlučivanja. Kako prostor odlučivanja po definiciji ima dve celobrojne veličine: dužinu paketa i maksimalan broj pokušaja slanja paketa, on nije kontinualan \mathbf{R}^3 podskup te ni prostor ciljeva ne može da bude kontinualan \mathbf{R}^2 podskup. Prekidi Pareto fronta se javljaju kada god se porede dve dovoljno bliske tačke u prostoru ciljeva čija je udaljenost uporediva ili manja od rezolucije prostora.

Kako sa praktične tačke gledišta, diskontinuitet Pareto fronta ima značaj jedino kada se javlja pri rezoluciji koja je sistemom komunikacije dostižna, ideja je da se poveća rezolucija prostora odlučivanja, a samim tim i prostora ciljeva. U tu svrhu je konstruisana originalna rARQ tehnika, koja modifikuje prostor odlučivanja tako da ima bolju rezoluciju, umesto celobrojne dimenzije -

maksimalan broj pokušaja, rARQ koristi realnu dimenziju - očekivan maksimalan broj pokušaja. Rezultati analize E2-pouzdanost odnosa kada se koristi rARQ pokazuju znatno, sa praktične tačke gledišta dovoljno, smanjenje intervala prekida Pareto fronta u odnosu na slučajeve kada se koriste klasične ARQ tehnike.

Analiza E2-pouzdanost odnosa kada prostor odlučivanja ima 4 dimenzije: bitska brzina, dužina paketa, broj pokušaja slanja i predajna snaga, pokazuje da je sa povećanjem broja dimenzija u prostoru odlučivanja moguće postići bolje Pareto optimalne vrednosti ciljeva nego kada je broj dimenzija u prostoru odlučivanja manji.

5.1 Dalji pravci istraživanja

U toku rada na temi disertacije detektovano je nekoliko pravaca po kojima je moguće nastaviti istraživanje. Generalno, dalji pravci istraživanja bi se bavili modifikacijom prostora odlučivanja, prostora ciljeva ili funkcija preslikavanja u cilju postizanja boljih Pareto optimalnih tačaka.

Poslednji zaključak, da je sa povećanjem broja dimenzija moguće postići bolje Pareto optimalne vrednosti ciljeva, trasira jedan od pravaca daljeg istraživanja na temu optimalnog E2-pouzdanost odnosa. Na osnovu tabele 4 lako se dolazi do zaključka da analizom uticaja broja skokova, *duty-cycle*a, FEC-a i modulacije kao dimenzija prostora odlučivanja mogu da se očekuju još bolji rezultati za Pareto optimalne tačke u (E2, pouzdanost) prostoru ciljeva.

U ovoj disertaciji su ispitane samo izabrane metrike: očekivana ukupna energije po bitu korisnih podataka i verovatnoća gubitka paketa, za AWGN i Rayleigh blok fejdinng kanal bez frekvencijske selekcije. Jedan od daljih pravaca istraživanja je ispitivanje odnosa drugih metrika u zavisnosti od kanala preko kojeg se vrši komunikacija.

Uvođenje dodatnih dimenzija u prostor ciljeva je takođe interesantno. Recimo, u disertaciji je E2-pouzdanost odnos ispitivan bez razmatranja kašnjenja i protoka.

Proširenje problema optimizacije sa PHY i MAC slojeva i na mrežni sloj, može u velikoj meri da doprinese povećanju broja dimenzija prostora odlučivanja, kojima bi mogle da se postignu još bolje Pareto optimalne tačke.

rARQ tehnika je uvela mogućnost transformacije maksimalnog broja pokušaja slanja paketa - diskretne promenjive, u očekivanu vrednost maksimalnog broja pokušaja – kontinualnu promenjivu. Ova transformacija je doprinela povećanju rezolucije u prostoru odlučivanja. Na sličan način moguće je transformisati i druge diskretne promenjive. Pronalaženje načina

transformacije drugih diskretnih promenjivih je još jedan moguć pravac daljeg istraživanja.

RFP model i posebno razmatranja prilikom konstruisanja modela otkrili su da pojačavači snage sa promenjivim pojačanjem, koji se danas koriste, su prilično neefikasni, posebno u režimima male izlazne snage. Moguć pravac daljeg istraživanja bi bio na dizajnu PA sa promenjivom izlaznom snagom, koji ima konstantnu efikasnost.

Kruna celokupnog istraživanja je prelazak sa teorijskih modela na implementaciju. Naime, do svih PO tačaka se u teoriji dolazi kompleksnim izračunavanjima, koja na resursima baterijski napajanih čvorova bežične senzorske mreže nisu moguća. Još jedan moguć pravac istraživanja je uprošćavanje algoritama za pronalaženje PO tačaka i konstrukcija adaptibilnih kontrolera na resursima BSM čvorova.

LITERATURA

- [1] Akyildiz, Ian F., et al. "Wireless sensor networks: a survey." *Computer networks* 38.4 (2002): 393-422.
- [2] Akyildiz, Ian F., et al. "A survey on sensor networks." *Communications magazine, IEEE* 40.8 (2002): 102-114
- [3] Chong, Chee-Yee, and Srikanta P. Kumar. "Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges." *Proceedings of the IEEE* 91.8 (2003): 1247-1256.
- [4] "21 ideas for the 21st century", Business Week, pp. 78-167, 30. avgust 1999.
- [5] Akyildiz, Ian F., Tommaso Melodia, and Kaushik R. Chowdhury. "A survey on wireless multimedia sensor networks." *Computer networks* 51.4 (2007): 921-960.
- [6] Lane, Nicholas D., et al. "A survey of mobile phone sensing." *Communications Magazine, IEEE* 48.9 (2010): 140-150.
- [7] Langendoen, Koen, and Gertjan Halkes. "Energy-efficient medium access control." *Embedded systems handbook* (2005): 34-1.
- [8] Pantazis, Nikolaos A., and Dimitrios D. Vergados. "A survey on power control issues in wireless sensor networks." *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* 9.4 (2007): 86-107
- [9] Demirkol, Ilker, Cem Ersoy, and Fatih Alagoz. "MAC protocols for wireless sensor networks: a survey." *Communications Magazine, IEEE* 44.4 (2006): 115-121.
- [10] Wang, Yuanli, Xianghui Liu, and Jianping Yin. "Requirements of quality of service in wireless sensor network." *Networking, International Conference on Systems and International Conference on Mobile Communications and Learning Technologies, 2006. ICN/ICONS/MCL 2006. International Conference on.* IEEE, 2006.
- [11] Chen, Dazhi, and Pramod K. Varshney. "QoS support in wireless sensor networks: A survey." *International Conference on Wireless Networks.* Vol. 233. 2004.
- [12] Xia, Feng. "QoS challenges and opportunities in wireless sensor/actuator networks." *Sensors* 8.2 (2008): 1099-1110.
- [13] Fallahi, Afshin, and Ekram Hossain. "QoS provisioning in wireless video sensor networks: a dynamic power management framework." *Wireless Communications, IEEE* 14.6 (2007): 40-49.

- [14] Tsigkas, Orestis, and F-N. Pavudou. "Providing QoS support at the distributed wireless MAC layer: a comprehensive study." *Wireless Communications, IEEE* 15.1 (2008): 22-31.
- [15] Wu, Dapeng. "QoS provisioning in wireless networks." *Wireless communications and mobile computing* 5.8 (2005): 957-969.
- [16] Chen, Chao, and Sumi Helal. "Sifting through the jungle of sensor standards." *Pervasive Computing, IEEE* 7.4 (2008): 84-88.
- [17] IEEE 802.15.4 Standard Part 15.4: wireless medium access control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE, NY, USA, 2006.
- [18] ZigBee Alliance, ZigBee Specifications, version 1.0, April 2005.
- [19] Shelby, Zach, and Carsten Bormann. *6LoWPAN: the wireless embedded internet*. Vol. 43. Wiley, 2011.
- [20] IEEE STD 1451.5-2007, Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Wireless Communication and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats, IEEE Instrumentation and Measurement Society, TC-9, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, N.Y. 10016, SH99685, October 5, 2007.
- [21] Wong, K. Daniel. "Physical layer considerations for wireless sensor networks." *Networking, Sensing and Control, 2004 IEEE International Conference on*. Vol. 2. IEEE, 2004.
- [22] Kocaoglu Murat, Derya Malak, and Ozgur Akan, "Fundamentals of Green Communications and Computing: Modeling and Simulation", *IEEE Computer*, Vol. 45, Issue 9, Sept. 2012, p.p. 40-46
- [23] Paradiso, Joseph A., and Thad Starner. "Energy scavenging for mobile and wireless electronics." *Pervasive Computing, IEEE* 4.1 (2005): 18-27.
- [24] Kansal Aman, et al. "Power management in energy harvesting sensor networks." *ACM Transactions on Embedded Computing Systems (TECS)* 6.4 (2007): 32.
- [25] Li, Ye, Bertan Bakkaloglu, and Chaitali Chakrabarti. "A system level energy model and energy-quality evaluation for integrated transceiver front-ends." *Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, IEEE Transactions on* 15.1 (2007): 90-103.
- [26] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-constrained modulation optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 5, pp.2349–2360, Sep. 2005.

- [27] Correia, L. H., Macedo, D. F., dos Santos, A. L., Loureiro, A. A., & Nogueira, J. M. S. (2007). Transmission power control techniques for wireless sensor networks. *Computer Networks*, 51(17), 4765-4779.
- [28] Lin, Shan, et al. "ATPC: adaptive transmission power control for wireless sensor networks." *Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM, 2006.
- [29] Ye, Wei, John Heidemann, and Deborah Estrin. "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks." *INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*. Vol. 3. IEEE, 2002.
- [30] Van Dam, Tijs, and Koen Langendoen. "An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks." *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM, 2003.
- [31] Byun, Heejung, and Junglok Yu. "Adaptive Duty Cycle Control with Queue Management in Wireless Sensor Networks." *IEEE Transactions on Mobile Computing* (2012).
- [32] Han, Congzheng, et al. "Green radio: radio techniques to enable energy-efficient wireless networks." *Communications Magazine, IEEE* 49.6 (2011): 46-54.
- [33] Anastasi, Giuseppe, et al. "Energy conservation in wireless sensor networks: A survey." *Ad Hoc Networks* 7.3 (2009): 537-568.
- [34] Haenggi, Martin. "Twelve reasons not to route over many short hops." *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th*. Vol. 5. IEEE, 2004.
- [35] Banerjee, Suman, and Archan Misra. "Minimum energy paths for reliable communication in multi-hop wireless networks." *Proceedings of the 3rd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*. ACM, 2002.
- [36] Holland, Matthew, et al. "Optimizing physical-layer parameters for wireless sensor networks." *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 7.4 (2011): 28.
- [37] Chaporkar, Prasanna, Kimmo Kansanen, and Ralf R. Müller. "On the Delay-Energy Tradeoff in Multiuser Fading Channels Volume 2009, Article ID 198903, 14 pages." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2 (2009).
- [38] Cohen, Kobi, and Amir Leshem. "Time-varying Opportunistic Protocol for maximizing sensor networks lifetime." *Acoustics, Speech and Signal Processing, 2009. ICASSP 2009. IEEE International Conference on*. IEEE, 2009.

- [39] Lee, Juyul, and Nihar Jindal. "Energy-efficient scheduling of delay constrained traffic over fading channels." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 8.4 (2009): 1866-1875.
- [40] Liu, Xin, Edwin KP Chong, and Ness B. Shroff. "A framework for opportunistic scheduling in wireless networks." *Computer Networks* 41.4 (2003): 451-474.
- [41] Schurgers, Curt, Olivier Aberthorne, and Mani Srivastava. "Modulation scaling for energy aware communication systems." *Proceedings of the 2001 international symposium on Low power electronics and design*. ACM, 2001.
- [42] Chen, Qing, and Mustafa Cenk Gursoy. "Energy-efficient modulation design for reliable communication in wireless networks." *Information Sciences and Systems, 2009. CISS 2009. 43rd Annual Conference on*. IEEE, 2009.
- [43] Tang, Qiuling, et al. "Battery power efficiency of PPM and FSK in wireless sensor networks." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 6.4 (2007): 1308-1319.
- [44] Lettieri, Paul, and Mani B. Srivastava. "Adaptive frame length control for improving wireless link throughput, range, and energy efficiency." *INFOCOM'98. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*. Vol. 2. IEEE, 1998
- [45] Dong, Wei, et al. "DPLC: Dynamic packet length control in wireless sensor networks." *INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE*. IEEE, 2010.
- [46] Li, Tianji, et al. "Aggregation with fragment retransmission for very high-speed WLANs." *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)* 17.2 (2009): 591-604.
- [47] Hong, Jung Ha, and Khosrow Sohraby. "On modeling, analysis, and optimization of packet aggregation systems." *Communications, IEEE Transactions on* 58.2 (2010): 660-668.
- [48] Zogovic, N., G. Dimic, and D. Bajic. "PHY-MAC cross-layer approach to energy-efficiency improvement in low-power communications." *Wireless Communication Systems (ISWCS), 2011 8th International Symposium on*. IEEE, 2011.
- [49] Marron, Pedro Jose, and Daniel Minder. *Embedded WiSeNts research roadmap*. Logos, 2006.
- [50] Anastasi, Giuseppe, Marco Conti, and Mario Di Francesco. "A comprehensive analysis of the MAC unreliability problem in IEEE 802.15. 4 wireless sensor networks." *Industrial Informatics, IEEE Transactions on* 7.1 (2011): 52-65.
- [51] Oliveira, Talmai, et al. "Reliability tradeoffs for energy efficient wireless networks." *Mobile and Wireless Networking (iCOST), 2012 International Conference on Selected Topics in*. IEEE, 2012.

- [52] Di Francesco, Mario, et al. "Reliability and Energy-Efficiency in IEEE 802.15. 4/ZigBee Sensor Networks: An Adaptive and Cross-Layer Approach." *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 29.8 (2011): 1508-1524.
- [53] Minn, Hlaing, Mao Zeng, and Vijay K. Bhargava. "On ARQ scheme with adaptive error control." *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 50.6 (2001): 1426-1436.
- [54] Liu, Qingwen, Shengli Zhou, and Georgios B. Giannakis. "Cross-layer combining of adaptive modulation and coding with truncated ARQ over wireless links." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 3.5 (2004): 1746-1755.
- [55] Chen, Yan, et al. "Fundamental trade-offs on green wireless networks." *Communications Magazine, IEEE* 49.6 (2011): 30-37.
- [56] Vaze, Rahul. "Throughput-delay-reliability tradeoff with ARQ in wireless ad hoc networks." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 10.7 (2011): 2142-2149.
- [57] Wang, Changmian, Liuguo Yin, and Geir E. Øien. "Energy-efficient route optimization for adaptive MPSK-based wireless sensor networks." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2010 (2010): 2.
- [58] Zhao, Jerry, and Ramesh Govindan. "Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor networks." *Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM, 2003.
- [59] Zuniga, Marco, and Bhaskar Krishnamachari. "Analyzing the transitional region in low power wireless links." *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2004. IEEE SECON 2004. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on*. IEEE, 2004.
- [60] Zhou, Gang, et al. "Impact of radio irregularity on wireless sensor networks." *Proceedings of the 2nd international conference on Mobile systems, applications, and services*. ACM, 2004.
- [61] Simon, Marvin K., and Mohamed-Slim Alouini. "Digital Communication over Fading Channels." (2000).
- [62] Zhang, Ruifeng, and J-M. Gorce. "Optimal transmission range for minimum energy consumption in wireless sensor networks." *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*. IEEE, 2008.

- [63] Zogovic, Nikola, Goran Dimic, and Dragana Bajic. "Packet length and transmission power adaptation for energy-efficiency in low-power wireless communications." *Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TELSIKS), 2011 10th International Conference on*. Vol. 2. IEEE, 2011.
- [64] Mary, Philippe, et al. "Packet Error Outage for Coded Systems Experiencing Fast Fading and Shadowing." *IEEE Transactions on Wireless Communications* (2012): 1-12.
- [65] Heinzelman, Wendi Rabiner, Anantha Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks." *System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on*. IEEE, 2000.
- [66] Heinzelman, Wendi B., Anantha P. Chandrakasan, and Hari Balakrishnan. "An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks." *IEEE Transactions on wireless communications* 1.4 (2002): 660-670.
- [67] Haenggi, Martin. "The impact of power amplifier characteristics on routing in random wireless networks." *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM'03. IEEE*. Vol. 1. IEEE, 2003.
- [68] Wang, Qin, Mark Hempstead, and Woodward Yang. "A realistic power consumption model for wireless sensor network devices." *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2006. SECON'06. 2006 3rd Annual IEEE Communications Society on*. Vol. 1. IEEE, 2006.
- [69] Mikami, Shinji, et al. "An efficiency degradation model of power amplifier and the impact against transmission power control for wireless sensor networks." *Radio and Wireless Symposium, 2007 IEEE*. IEEE, 2007.
- [70] Zogović, N., G. Dimić, and D. Bajić. "Low-power wireless transceiver—Total channel-loss based power consumption model." *Electronics and Telecommunications (ISETC), 2010 9th International Symposium on*. IEEE, 2010.
- [71] Zogović, N., G. Dimić, and D. Bajić. "Channel loss based energy consumption model for low-power wireless communications." *New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2011 4th IFIP International Conference on*. IEEE, 2011.
- [72] G. Dimić, N. Zogović, D. Bajić, "Energy Efficiency of Two-hop Transmission - Part I: A Novel Wireless Transceiver Power Consumption Model," COST IC1004 2nd MCM and Scientific Meeting, Oct. 19-21, 2011, Lisbon, Portugal, TD(11)02033

- [73] Dimic, Goran, Nikola Zogovic, and Dragana Bajic. "Energy efficiency of supportive relay with a novel wireless transmitter power consumption model." *Mobile and Wireless Networking (iCOST), 2012 International Conference on Selected Topics in*. IEEE, 2012.
- [74] DIMIC, Goran, Nikola ZOGOVIĆ, and Dragana BAJIĆ. "A Wireless Transceiver Power Consumption Model and Two-hop vs. Single-hop Energy Efficiency Ratio." *Future Network & Mobile Summit* (2012): 4-6.
- [75] Lee, Thomas H. *The design of CMOS radio-frequency integrated circuits*. Cambridge university press, 2004.
- [76] Razavi, Behzad, and Razavi Behzad. *RF microelectronics*. Vol. 1. New Jersey: Prentice Hall, 1998.
- [77] Dal Fabbro, Paulo Augusto, and Maher Kayal. "Design of the Dynamic Supply CMOS RF Power Amplifier." *Linear CMOS RF Power Amplifiers for Wireless Applications*. Springer Netherlands, 2010. 17-38.
- [78] Xi, Yong, et al. "A general upper bound to evaluate packet error rate over quasi-static fading channels." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 10.5 (2011): 1373-1377.
- [79] Liu, ShaoYang, et al. "On the Throughput and Optimal Packet Length of an Uncoded ARQ System over Slow Rayleigh Fading Channels." *Communications Letters, IEEE* 16.8 (2012): 1173-1175.
- [80] Kobravi, Alireza, and Mohammd Shikh-Bahaei. "Cross-layer adaptive ARQ and modulation tradeoffs." *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*. IEEE, 2007.
- [81] Harsini, Jalil Seifali, et al. "Analysis of non-cooperative and cooperative type II hybrid ARQ protocols with AMC over correlated fading channels." *Wireless Communications, IEEE Transactions on* 10.3 (2011): 877-889.
- [82] Neely, Michael J. "Intelligent packet dropping for optimal energy-delay tradeoffs in wireless downlinks." *Automatic Control, IEEE Transactions on* 54.3 (2009): 565-579.
- [83] Lott, Christopher, Olgica Milenkovic, and Emina Soljanin. "Hybrid ARQ: theory, state of the art and future directions." *Information Theory for Wireless Networks, 2007 IEEE Information Theory Workshop on*. IEEE, 2007.
- [84] L.L. Peterson and B.S. Davie, *Computer Networks – A system approach*, 5th ed., The Morgan Kaufmann, 2012.

- [85] Marler, R. Timothy, and Jasbir S. Arora. "Survey of multi-objective optimization methods for engineering." *Structural and multidisciplinary optimization* 26.6 (2004): 369-395.
- [86] N. Zogović, „Pregled komercijalno raspoloživih platformi za realizaciju bežičnih senzorskih mreža“, Zbornik radova, Konferencija ETRAN, Herceg Novi, Srbija i Crna Gora, 2007.
- [87] N. Zogović, G. Dimić, „Evaluacija radio-primopredajnika za primenu u bežičnim senzorskim mrežama“, Zbornik radova, Konferencija ETRAN, Subotica, 2008.
- [88] Cáceres, Ramón, and Adrian Friday. "UbiComp systems at 20: Progress, opportunities, and challenges." *Pervasive Computing, IEEE* 11.1 (2012): 14-21.
- [89] Yick, Jennifer, Biswanath Mukherjee, and Dipak Ghosal. "Wireless sensor network survey." *Computer networks* 52.12 (2008): 2292-2330.
- [90] Hill, Jason, et al. "The platforms enabling wireless sensor networks." *Communications of the ACM* 47.6 (2004): 41-46.
- [91] Lorincz, Konrad, et al. "Sensor networks for emergency response: challenges and opportunities." *Pervasive Computing, IEEE* 3.4 (2004): 16-23.
- [92] Wheeler, Andrew. "Commercial applications of wireless sensor networks using ZigBee." *Communications Magazine, IEEE* 45.4 (2007): 70-77.
- [93] Kuorilehto, Mauri, Marko Hä, and Timo D. Hä. "A survey of application distribution in wireless sensor networks." *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2005.5 (2005): 774-788.
- [94] Estrin, Deborah, et al. "Connecting the physical world with pervasive networks." *Pervasive Computing, IEEE* 1.1 (2002): 59-69.
- [95] Jovanov, Emil, et al. "A wireless body area network of intelligent motion sensors for computer assisted physical rehabilitation." *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 2.1 (2005): 6.
- [96] Durisic, Milica Pejanovic, et al. "A survey of military applications of wireless sensor networks." *Embedded Computing (MECO), 2012 Mediterranean Conference on. IEEE*, 2012.
- [97] Hault, Neil, et al. "Wireless sensor networks: creating 'smart infrastructure'." *Proceedings of the ICE-Civil Engineering*. Vol. 162. No. 3. Ice Virtual Library, 2009.
- [98] Kim, Sukun, et al. "Health monitoring of civil infrastructures using wireless sensor networks." *Information Processing in Sensor Networks, 2007. IPSN 2007. 6th International Symposium on. IEEE*, 2007.

- [99] Xu, Ning, et al. "A wireless sensor network for structural monitoring." *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*. ACM, 2004.
- [100] Tubaishat, Malik, et al. "Wireless sensor networks in intelligent transportation systems." *Wireless communications and mobile computing* 9.3 (2009): 287-302.
- [101] Zogović, Nikola, and Goran Dimić. "Zahtevi i tehnološke mogućnosti komunikacionih sistema u preciznoj poljoprivredi.", Konferencija TELFOR, Beograd, 2008.
- [102] Wang, Ning, Naiqian Zhang, and Maohua Wang. "Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective." *Computers and electronics in agriculture* 50.1 (2006): 1-14.
- [103] Lai, Xiaochen, et al. "A Survey of Body Sensor Networks." *Sensors* 13.5 (2013): 5406-5447
- [104] Alemdar, Hande, and Cem Ersoy. "Wireless sensor networks for healthcare: A survey." *Computer Networks* 54.15 (2010): 2688-2710.
- [105] Gungor, Vehbi C., Bin Lu, and Gerhard P. Hancke. "Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 57.10 (2010): 3557-3564.
- [106] Dietrich, Isabel, and Falko Dressler. "On the lifetime of wireless sensor networks." *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 5.1 (2009): 5.
- [107] Chen, Yunxia, and Qing Zhao. "On the lifetime of wireless sensor networks." *Communications Letters, IEEE* 9.11 (2005): 976-978.
- [108] Alfieri, A., et al. "Maximizing system lifetime in wireless sensor networks." *European Journal of Operational Research* 181.1 (2007): 390-402.
- [109] Dishongh, Terrance J., Michael McGrath, and Ben Kuris. *Wireless sensor networks for healthcare applications*. Artech House, 2009.
- [110] Miettinen, Kaisa. *Nonlinear multiobjective optimization*. Vol. 12. Springer, 1999.
- [111] Lin, Jiguan. "Multiple-objective problems: Pareto-optimal solutions by method of proper equality constraints." *Automatic Control, IEEE Transactions on* 21.5 (1976): 641-650.
- [112] Zogovic, Nikola, Goran Dimic, and Dragana Bajic. "PHY-MAC Cross-Layer Approach to Energy-Efficiency and Packet-Loss Trade-off in Low-Power, Low-Rate Wireless Communications." *Communications Letters, IEEE* 17.4 (2013): 661-664.

- [113] Romer, Kay, and Friedemann Mattern. "The design space of wireless sensor networks." *Wireless Communications, IEEE* 11.6 (2004): 54-61.
- [114] Ubiquitous sensor networks (USN), ITV-T Technology Watch Briefing Report Series, No. 4, februar 2008.
- [115] Hoes, Rob, et al. "Quality-of-service trade-off analysis for wireless sensor networks." *Performance Evaluation* 66.3 (2009): 191-208.
- [116] Wang, Xin, Georgios B. Giannakis, and Antonio G. Marques. "A unified approach to QoS-guaranteed scheduling for channel-adaptive wireless networks." *Proceedings of the IEEE* 95.12 (2007): 2410-2431.
- [117] Bauckhage, Christian, Kristian Kersting, and Albrecht Schmidt. "Agriculture's Technological Makeover." *Pervasive Computing, IEEE* 11.2 (2012): 4-7.
- [118] Pantazis, Nikolaos A., and Dimitrios D. Vergados. "A survey on power control issues in wireless sensor networks." *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* 9.4 (2007): 86-107.
- [119] Lin, Tsung-Hsien, William J. Kaiser, and Gregory J. Pottie. "Integrated low-power communication system design for wireless sensor networks." *Communications Magazine, IEEE* 42.12 (2004): 142-150.
- [120] Oliveira, Luís M., and Joel J. Rodrigues. "Wireless sensor networks: a survey on environmental monitoring." *Journal of communications* 6.2 (2011): 143-151.
- [121] Dubois-Ferrière, Henri, et al. "TinyNode: a comprehensive platform for wireless sensor network applications." *Proceedings of the 5th international conference on Information processing in sensor networks*. ACM, 2006.
- [122] Jung, Deokwoo, Thiago Teixeira, and Andreas Savvides. "Sensor node lifetime analysis: Models and tools." *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 5.1 (2009): 3.
- [123] Weddell, Alexander S., et al. "A Survey of Multi-Source Energy Harvesting Systems." (2013).
- [124] Park, Seung-Jong, and Raghupathy Sivakumar. "Quantitative analysis of transmission power control in wireless ad-hoc networks." *Parallel Processing Workshops, 2002. Proceedings. International Conference on*. IEEE, 2002.
- [125] Kubisch, Martin, et al. "Distributed algorithms for transmission power control in wireless sensor networks." *Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003. 2003 IEEE*. Vol. 1. IEEE, 2003.

- [126] Xue, Feng, and Panganamala R. Kumar. "The number of neighbors needed for connectivity of wireless networks." *Wireless networks* 10.2 (2004): 169-181.
- [127] Abouei, Jamshid, Konstantinos N. Plataniotis, and Subbarayan Pasupathy. "Green modulation in dense wireless sensor networks." *Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), 2010 IEEE International Conference on*. IEEE, 2010.
- [128] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2002 :Prentice-Hall
- [129] Akan, O.B.; Akyildiz, I.F., "Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol.13, no.5, pp.1003,1016, Oct. 2005
- [130] W. Zhang, M. Branicky, and S. Phillips, "Stability of networked control systems," *IEEE Control. Syst. Mag.*, vol. 21, pp. 84–99, Feb. 2001.
- [131] Vuran, Mehmet C., and Ian F. Akyildiz. "Error control in wireless sensor networks: a cross layer analysis." *Networking, IEEE/ACM Transactions on* 17.4 (2009): 1186-1199.
- [132] Tian, Zhen, Dongfeng Yuan, and Quanquan Liang. "Energy efficiency analysis of error control schemes in wireless sensor networks." *Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2008. IWCMC'08. International*. IEEE, 2008.
- [133] Chen, Tao, Haesik Kim, and Yang Yang. "Energy efficiency metrics for green wireless communications." *Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), 2010 International Conference on*. IEEE, 2010.
- [134] Dal Fabbro, Paulo Augusto, and Maher Kayal. *Linear CMOS RF Power Amplifiers for Wireless Applications: Efficiency Enhancement and Frequency-tunable Capability*. Springer, 2010.
- [135] J. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th edition. McGraw-Hill, 2008.
- [136] Conti, Andrea, et al. "Bit error outage for diversity reception in shadowing environment." *Communications Letters, IEEE* 7.1 (2003): 15-17.
- [137] Khan, W.Z.; Yang Xiang; Aalsalem, M.Y.; Arshad, Q., "Mobile Phone Sensing Systems: A Survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* , vol.15, no.1, pp.402,427, First Quarter 2013
- [138] Langendoen, Koen, and Andreas Meier. "Analyzing MAC protocols for low data-rate applications." *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)* 7.2 (2010): 19.
- [139] Castagnoli, Guy, Juerg Ganz, and Patrick Graber. "Optimum cycle redundancy-check codes with 16-bit redundancy." *Communications, IEEE Transactions on* 38.1 (1990): 111-114.

- [140] Messac, Achille, Amir Ismail-Yahaya, and Christopher A. Mattson. "The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier." *Structural and multidisciplinary optimization* 25.2 (2003): 86-98.
- [141] Branke, Jürgen, et al., eds. *Multiobjective optimization: Interactive and evolutionary approaches*. Vol. 5252. Springer-Verlag New York Incorporated, 2008.
- [142] Athan, Timothy Ward, and Panos Y. Papalambros. "A note on weighted criteria methods for compromise solutions in multi-objective optimization." *Engineering Optimization* 27.2 (1996): 155-176.
- [143] Chen, Wei, et al. "Exploration of the effectiveness of physical programming in robust design." *Journal of Mechanical Design* 122 (2000): 155.
- [144] Lee, Uichin, and Mario Gerla. "A survey of urban vehicular sensing platforms." *Computer Networks* 54.4 (2010): 527-544