



УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ



ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Приједлог алгоритма за оптимизацију параметара преноса у IEEE 802.11 мрежама

Завршни рад II циклуса студија

Ментор:

**Др Гордана Гардашевић, ван.
проф.**

Кандидат:

Борис Малчић, дипл. инж. ел.

Бања Лука, април 2018. године



UNIVERSITY OF BANJA LUKA

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING



PROPOSAL OF ALGORITHM FOR OPTIMIZING TRANSMISSION PARAMETERS IN IEEE 802.11 NETWORKS

MASTER THESIS

Supervisor:

Prof. dr. Gordana Gardašević

M. Sc. candidate:

Boris Malčić, Dipl. Ing.

Banja Luka, April 2018.

Информације о ментору и мастер тези

Ментор: др Гордана Гардашевић, ванредни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Бањој Луци

Назив мастер тези: Приједлог алгоритма за оптимизацију параметара преноса у IEEE 802.11 мрежама

Сажетак: *Основни циљ истраживања у овом мастер раду је оптимизација преноса у реалним условима динамичког окружења, а на бази идеја математичког моделовања промјена тока података и просторног распореда клијената у IEEE 802.11 WLAN. У ту сврху, анализирано је постојеће стање у разматраној области оптимизације преноса у смислу смањења каналне интерференције уз енергетски ефикасан рад WLAN. На основу реализованих мјерења, извршено је моделовање у WLAN и предложени су DCA и TCRFFA који заједно чине јединствени приједлог алгоритма за један вид „оптимизације параметара“ преноса. У циљу оптимизације, наведена је имплементација паметне WLAN антене за коју је изведен математички модел за управљање. Предложен је и један начин реализације радио-локације клијената у WLAN, као и приједлог подршке diffServ QoS у областима покривања. Симулацијом је показано да предложена рјешења значајно смањују EVM и побољшавају QoS.*

Кључне ријечи:

IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax; beamforming smart antennas; DCA; TCRFFA; dense WLAN; RSSI; CAPEX; EVM; WAP; AoA

Научна област: Технолошке науке

Научно поље: Електротехника, електроника и информационо инжењерство

Класификациона ознака према CERIF шифрарнику: T 180

Тип одабране лиценце креативне заједнице: CC BY-NC-ND

Комисија за одбрану завршног рада II циклуса студија:

доц. др Славко Шајић, председник

проф. др Гордана Гардашевић, ментор

доц. др Дино Косић, члан

Кандидат: Борис Малчић (2202/13)

Information about mentor and master thesis

Mentor: dr Gordana Gardašević, associate professor, Faculty of Electrical Engineering, University of Banja Luka

Title of master thesis: Proposal of algorithm for optimizing the transmission parameters in IEEE 802.11 networks

Abstract: *The main purpose of this master thesis' research is to achieve a transmission optimization in real conditions of a dynamic environment. The optimization is based on an idea of mathematical modeling of data flow changes and spatial scheduling of clients in IEEE 802.11 WLAN. For this purpose, the existing state in the field of optimization in terms of reducing channel interference with energy-efficient work of WAPs, is analyzed. Then, based on measurements and traffic changes in WLAN, the DCA and TCRFFA are proposed. Both algorithms together make a unique proposal of algorithm for the optimization. Also, an algorithm for smart WLAN antenna is implemented in Matlab with a simple option of radio-localization in WLAN. Performed simulations have shown, that proposed solutions could lead to a decrease in EVM, improvements in QoS and transmission at higher bit rates. Also, at the end of Thesis, the Matlab codes and overview of WAPs' CAPEX in WLAN, are given.*

Keywords:

IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax; beamforming smart antennas; DCA; TCRFFA; dense WLAN; RSSI; CAPEX; EVM; WAP; AoA

Scientific area: Technological sciences

Scientific field: Electrical engineering, electronics and information engineering

Classification code according to CERIF: T 180

License type according to Creative Commons Community: CC BY-NC-ND

Examination commission: Asst. Prof. Dr. Slavko Šajjić, Chairperson

Assoc. Prof. Dr. Gordana Gardašević, Supervisor

Asst. Prof. Dr. Dino Kosić, Member

M. Sc. degree candidate: Boris Malčić (2202/13)

ACTA, NON VERBA¹

¹ *Користим ову прилику да изразим захвалност мојој ужој и широј породици, пријатељима, члановима комисије, као и осталом радном колективу Електротехничког факултета у Бањој Луци на њиховој великој помоћи са „ријечима и дјелима“ током мог досадашњег студирања.*

САДРЖАЈ

Листа скраћеница	ii
Листа табела и слика	iv
Предговор	vi
1. УВОД	1
2. ПРЕГЛЕД ПОСТОЈЕЋИХ РЈЕШЕЊА	3
3. ПОСТУПАК ПЛАНИРАЊА IEEE 802.11 WLAN.....	9
4. МЈЕРЕЊА У WLAN И ПРИЈЕДЛОГ DSA	13
5. TCRFF АЛГОРИТАМ	31
6. ПАМЕТНЕ WLAN АНТЕНЕ	42
7. ЗАКЉУЧАК	48
8. ПРИЛОГ	50
I ВАЖНИЈЕ РФ МАПЕ ПОКРИВАЊА WI-FI СИГНАЛОМ	50
II ВАЖНИЈЕ ФУКЦИЈЕ ИМПЛЕМЕНТИРАНЕ У МАТЛАВ-у.....	51
III ПРИЈЕДЛОГ ИЗВОЂЕЊА ИЗРАЗА ЗА EVM.....	57
IV ЕКОНОМСКА ОПРАВДАНОСТ WAPs.....	64
V ОПРАВДАНОСТ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА СПЕКТРАЛНЕ ГУСТИНЕ СНАГЕ WI-FI КАНАЛА	66
ЛИТЕРАТУРА	68
БИОГРАФИЈА	71

Листа скраћеница

AP	Access Point
AAS	Antenna Array System or Adaptive Antenna System
АоА	Angle of Arrival
BW	Black and White (logical) image
BER	Bit Error Rate
CAPEX	CAPital EXpenditur
CE	European Commision
CSMA&CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
diffServ	Differentiated Services
DC	Dirrect Current power supply
DCA	Dynamic Channel Assignment/Allocation
DSL	Digital Subscriber Line
DS-CDMA	Direct-Sequence Code Division Multiple Access
EVM	Error Vector Magnitude
E _{RMS}	Root Mean Square Value of Electric Field
FCC	Federal Communications Commision
FFT	Fast Fourier Transform
ETFBL	Faculty of Electrical Engineering, University of Banja Luka
ЕТФБЛ	Електротехнички факултет универзитета у Бањој Луци
IBSS	Independent Basic Service Set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISM	Industrial Science and Medical
MT (<i>MP</i>)	Мјерна Тачка (енг. <i>Measurement Point</i>)
MU-MIMO	Multi-User Multiple Input and Multiple Output
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPEX	OPerating EXpenses
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
PSD	Power Spectral Density
ПДВ (<i>VAT</i>)	Порез на додатну вриједност (енг. <i>Value Added Tax</i>)

QoS	Quality of Service
RADAR	RAdio Detection And Ranging
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RoD	Resource on Demand
PФ	радио - фреквенцијски
SNR	Signal to Noise Ratio
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio
SLA	Service Level Agreement
SDN	Software Defined Networks
SEAR	Survey-Evaluate-Adapt-Repeat
SSID	Service Set Identifier
TPC	Transmit Power Control Algorithm
TCRFFA	Traffic Clients Received Signal Strength Indicator Flow Filling Algorithm
TDD	Time Division Duplex
WAPs/WADs	Wireless Access Points/Devices
WAP/WAD	Wireless Access Point/Device
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WLANS	Wireless Local Area Networks
WLAN	Wireless Local Area Network
WiMAX	Worldwide interoperability for Microwave Access
5G	The Fifth Generation of Mobile Network Communication Technology

ЛИСТА ТАБЕЛА И СЛИКА

Листа табела

Табела 4.1 - Измјерени број корисника и њихова количина саобраћаја у одређеним временским тренуцима по појединим локацијама WAPs	15
Табела 6.1 - Конфигурација за симулацију 8×4 MIMO преноса	46
Табела 6.2 - Поређење EVM код MIMO и beamforming IEEE 802.11 WLAN	46

Листа слика

Слика 4.1 - Илустрација контролног софтвера UniFi 5.4.11	14
Слика 4.2 - Активни WAPs и клијенти на каналима у опсезима 2,4GHz и 5GHz	14
Слика 4.3 - Илустрација измјерених вриједности тренутне употребе WAPs	15
Слика 4.4 - Званични прорачун цијене електричне енергије у БиХ [20].....	17
Слика 4.5 - Спектар јачине електричног поља.....	18
Слика 4.6 - Измјерене вриједности јачине електричног поља у МТ	18
Слика 4.7 - Измјерена вриједност E_{RMS} у стању Idle код једног РФ канала.....	18
Слика 4.8 - Преоптерећеност опсега ISM WLAN 2,4 GHz	19
Слика 4.9 - Сусједна канална интерференције послјере примјене DCA.....	21
Слика 4.10 - Временски дијаграм промјене RSSI у истој МТ	21
Слика 4.11 - Доступни Wi-Fi канали у једној МТ	25
Слика 4.12 - Визуелизација различитих произвођача WAPs у WLAN окружењу	25
Слика 4.13 - Измјерени ниво сигнала у посматраној МТ	26
Слика 4.14 - RSSI мапа покривања дијела приземља на ЕТФБЛ.....	26
Слика 4.15 - RSSI мапа покривања на 2. спрату ЕТФБЛ	27
Слика 4.16 - RSSI мапа покривања WLAN сигналом на 1. спрату ЕТФБЛ.....	27
Слика 4.17 - Математички модел утицаја реалне интерференције сусједних канала.....	28
Слика 4.18 - Вриједности крос-корелације за избор оптималног канала код DCA	29
Слика 5.1 - Графичка илустрација математичког модела промјене саобраћаја	31
Слика 5.2 - Поједностављени дијаграм тока приједлога побољшаног TCRFF алгоритма	33
Слика 5.3 - Тлоцрт области Библиотека на 2. спрату ЕТФБЛ нове зграде [24].....	33
Слика 5.4 - RSSI мапа и тлоцрт сусједне области са облашћу на Слици 5.3	34
Слика 5.5 - Илустрација рада TCRFFA.....	35
Слика 5.6 - Област са бијелом бојом је са већим RSSI, односно задовољавајућим QoS.....	37
Слика 5.7 - BW област добијена морфолошком операцијом imclose над Сликаом 5.6.....	38
Слика 5.8 - Лоцирање групе клијената од WAP ради одређивања угла beamforming-а	38
Слика 5.9 - Област са најбољим подржаним QoS је означена бијелом бојом	38
Слика 5.10 - Област са средњим QoS у облику прстена бијеле боје	39
Слика 5.11 - RSSI области са diffServ QoS	39

Слика 6.1 - Зависност површинске густине снаге зрачења од угла усмјерења	44
Слика 6.2 - Нормализовани дијаграм зрачења конкретне паметне WLAN антене	45
Слика 6.3 - Констелациони дијаграм код 512-QAM при IEEE 802.11 преносу коришћењем 8×4 MIMO уз укључен утицај Доплеровог ефекта са 'Model-E' каналом у Matlab-у	47
Слика 6.4 - Констелациони дијаграм при 512-QAM преносу када се користи beamforming	47
Слика 8.1 - РФ мапа покривања за стару зграду ЕТФБЛ – Приземље	50
Слика 8.2 - РФ мапа покривености Wi-Fi сигналом на 1. спрату ЕТФБЛ	50
Слика 8.3 - Први квадрант констелационог дијаграма	58
Слика 8.4 - Експеримент мјерења спектралне густине снаге	66
Слика 8.5 - PSD код првог Wi-Fi канала у upstream-у	67

ПРЕДГОВОР

Мобилне и бежичне телекомуникационе мреже представљају изразито динамичну и актуелну област истраживања, посебно у смислу развоја стандарда за будуће мобилне мреже пете генерације (енг. *The Fifth Generation of Mobile Network Communication Technology - 5G*). Процјењује се да ће мобилни пренос података достићи 49 ексабајта на мјесечном нивоу до 2021. године и да ће до тада **Wi-Fi**² (енг. *Wireless Fidelity*) пренос преузети око 50% од укупног (*фиксни и мобилни*) телекомуникационог саобраћаја базираног на интернет протоколу (енг. *Internet Protocol – IP*). У овим мрежама је од посебног значаја развој алгоритама за обезбијеђивање оптималних вриједности преносних и мрежних параметара. Оригинални WLAN IEEE 802.11 стандард из 1997. године је спецификовао 1Mbps (*постоји и опција са 2Mbps*) битске брзине у овим популарно названим Wi-Fi мрежама. Данас, послје 21 годину од оригиналног стандарда, постоје физички омогућене битске брзине веће од 1Gbps. Један од водећих стручњака (*са универзитета енг. Massachusetts Institute of Technology - MIT*) из ове области, говори да је до повећања наведених битских брзина највише заслужена примјена математике, односно прецизније: примјена и развој алгоритама. Прије развоја алгоритама, најважније је извршити оптимално планирање мреже, а што ће у овом случају бити размотрено на примјеру IEEE 802.11 WLAN (енг. *Wireless Local Area Network*) на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци (*ЕТФБЛ*). Потом, да би се омогућило максимално искоришћење мрежних ресурса, погодно је користити алате вјештачке интелигенције за реализацију предикције релевантних параметара: ефективне брзине преноса, минималне вјероватноће битске грешке и енергетских захтјева за рад разматране телекомуникационе мреже. Један од основних проблема у раду бежичних телекомуникационих мрежа јесте појава интерференције. У ту сврху, у мастер раду је предложена нова варијанта алгорита (енг. *Dynamic Channel Assignment – DCA*) за смањење утицаја интерференције сусједних Wi-Fi канала који се користе код инсталираних бежичних приступних тачака (енг. *Wireless Access Points - WAPs*) у домену простора покривања сигналом посматране WLAN. Такође, будућим WLANs је циљ повећање односа снаге корисног сигнала у односу на снагу шума (енг. *Signal to Noise Ratio – SNR*), а што би

² **Wi-Fi** је бежична локална рачунарска мрежа (**WLAN**) која почива на стандарду IEEE 802.11.

омогућило повећање капацитета мреже и самим тим - побољшање квалитета сервиса (енг. *Quality of Service - QoS*) и увођење нових услуга у будућим IEEE 802.11 WLANs.

У циљу рјешавања ових изазова, послије увода, наведен је преглед постојећих алгоритама из ове тематике, као и приједлог новог алгорита који узима у обзир: динамичко кретање корисника, могућности лоцирања корисника, мјерења њихове активности у WLAN и праћење саобраћајног оптерећења. У ту сврху биће образложен значај и могућности које пружа техника усмјеравања зрачења антена (енг. *beamforming*) и примјена паметних антена (енг. *smart antennas*) у циљу унапређења перформанси коришћених WAPs . На основу мјерења у реалном окружењу, код постојеће инсталиране WLAN на ЕТФБЛ, биће представљена идеја за математичко моделовање и идеја за приједлог реализације управљања са саобраћајем у виду пожељне неуралне мреже, споменуте и остављене за будућу имплементацију, а која се треба обучавати на основу историје телекомуникационог саобраћаја и грешака између предвиђених и стварних вриједности које се накнадно требају користити за корекције коефицијената у функцији управљања. У ту сврху извршена је аутоматизација управљања са напајањем и усмјеравањем зрачења антена од појединих WAPs, а и с циљем: повећања енергетске ефикасности WLAN у цјелини; смањења интерференције при преносу; повећања SNR и већих брзина преноса уз истовремено смањење вјероватноће погрешног пријема бита при преносу (енг. *Bit Error Rate –BER*).

Примјеном софтверског програма **EkaHau HeatMapper** приказано је покривање области са РФ сигналом, тзв. РФ мапе покривања у IEEE 802.11 WLAN. Потом, извршена је анализа примјене *beamforming-a* помоћу софтверског пакета Matlab. Та анализа је показала значајне предности примјене наведених паметних антена. Повећање броја клијената у IEEE 802.11 WLAN остаје изазов, који такође представља дио мотивације за овдје предложене алгоритме.

Поступак, који се разматра у овој мастер тези и који омогућава оптимизацију IEEE 802.11 WLAN, подразумијева сљедеће кораке:

- **Планирање:** Одредити захтјеве апликација и уређаја за пропусним опсегом, подржаним протоколима, радним фреквенцијским каналима, приједлог уговора о нивоу услуга (енг. *Service Level Agreement – SLA*);
- **Дизајн:** Одређивање густине и величине ћелија, избора антена, покривености, истраживање локације за имплементацију мреже;

- **Имплементација:** Инсталирање и мониторинг, тј. контрола значајних параметара мреже, тестирање, подешавање, итд.;
- **Оптимизација:** Надгледање, извјештавање, прилагођење, провјеравање испуњености **SLA**;
- **Управљање:** Праћење перформанси, надгледање капацитета WLAN и тренутних вриједности телекомуникационог саобраћаја и броја корисника, као и примјене одговарајућих формата извјештавања.

Специфичне препоруке за имплементирање **IEEE 802.11 WLAN**, обухватају неке од постојећих алгоритама [1]:

1. Алгоритам контроле преноса снаге (енг. *Transmit Power Control Algorithm - TPC*), узима у обзир минималну осјетљивост пријемника и максималну снагу напајања и емитовања. **TCP** праг снаге се користи за подешавање снаге на граници ћелије и подразумијевана вриједност прага снаге је -70 dBm,
2. Алгоритам динамичког додјелјивања канала - **DCA**,
3. Алгоритам детекције непокривене области (енг. *Coverage Hole Detection Algorithm*) за оптимизацију прага покривања који врши одређивање минималног прихватљивог нивоа пријемног сигнала (енг. *Received Signal Strength Indicator - RSSI*) који подржава потребну брзину преноса података у области покривености сигналом уз задовољавајући **QoS**.

Традиционално, WAPs емитују своје радио-фреквентне ($P\Phi$) сигнале у само једном, унапријед дефинисаном, облику простора који одређује дијаграм зрачења антене. Овај приступ даје добре резултате у ситуацијама када се WAP налази унутар великог и неометаног подручја, са релативно мало извора конкурентских сметњи. Међутим, у већини реалних окружења, такав статички дијаграм зрачења је неефикасан и доводи до неусаглашених перформанси преко цјелокупне дистрибуције према клијентима у WLAN. Примјена **beamforming-a** омогућава да се амплитуде емитованих РФ-таласа комбинују на прецизним локацијама повезаних WAPs, па се јачина примљеног сигнала повећава с крајњим резултатом побољшања квалитета конекције и брзине преноса података.

Ова способност, **beamforming**, позната је као обликовање снопа или

усмјеравање радио-таласа. IEEE 802.11 WLANs, тј. Wi-Fi мреже, су понудиле значајне погодности својим корисницима првенствено у виду мобилности, али су и прошириле домен колизије са Ethernet порта на подручје покривености (енг. *coverage area*) бежичним сигналом једног WAP-а. Beamforming и његова примјена у облику вишекорисничког MIMO (енг. *Multi User - Multiple Input and Multiple Output or MU-MIMO*) у IEEE 802.11ac/ax имају потенцијал да редефинишу архитектуру мреже и динамички повећавају капацитет у складу са потребама корисника.

1. УВОД

Основни циљ истраживања у овом мастер раду је оптимизација преноса у условима динамичког окружења, на бази идеја математичког моделовања промјена тока података и просторног распореда клијената у IEEE 802.11 WLAN. На основу резултата мјерења значајних параметара у посматраној WLAN, потребно је детектовати да ли се може предвидјети неактивност или смањена активност одређених корисника, те могућности реализације уштеде енергије и фокусирања зрачења радио-таласа на мјеста гдје су лоцирани најважнији клијенти ради повећања SNR. При томе ће се користити вишенивовски модулациони поступци, чиме ће се омогућити и повећање брзина преноса у посматраној мрежи јер се употребом паметних WLAN антена остварује повећање SNR при пријему. Због немогућности приступа и имплементацији алгоритма у управљачки систем **UniFi 5.4.11**, који врши управљање са инсталираним **WAPs UAP-AC-LR**, овдје је анализирана примјена алгоритма (*којег сачињавају два мања алгоритма названа **TCRFFA** (Traffic Clients RSSI Flow Filling Algorithm) и **DCA***) и добивени су резултати на основу математичког модела који је базиран на практичним резултатима мјерења у WLAN. Потом, извршене симулације у програмском пакету Matlab, показале су да употребом *beamforming*-а значајно долази до смањења **EVM**, при чему је у овом мастер раду изведена и апроксимативна веза **EVM** у функцији од реда модулације **M-QAM** у случају униформне расподјеле бијелог шума по читавом простору могућег пријема сигнала. Униформна расподјела нам је важна јер можемо шум посматрати и као један ометајући сигнал који је присутан у читавом фазно-амплитудском опсегу пријемног сигнала, а што може бити чест случај у војним комуникацијама када се користе разни ометајући сигнали да наруше квалитет комуникационе везе. Друге расподјеле имају већи значај у цивилним примјенама, као што су и WLAN, али се тада математички опис знатно компликује, при чему се може примјенити исти предложени принцип извођења.

Послије уводног дијела, у **2. ПОГЛАВЉУ** је дат осврт на постојећа рјешења и алгоритме са оствареним резултатима у смислу разматране оптимизације преноса. Наведени су алгоритми и стратегије које се користе за повећање енергетске ефикасности и смањење утицаја интерференције при WLAN преносу.

У **3. ПОГЛАВЉУ** су изложене опште информације у вези IEEE 802.11 WLAN. Те информације су, у даљњем излагању, важне ради планирања и реализације предложених алгоритама за оптимизацију.

У **4. ПОГЛАВЉУ**, приказана су мјерења активности клијената у WLAN на ЕТФБЛ, добијена помоћу управљачког софтвера UniFi 5.4.11. Приказани су и резултати појединих мјерења добијених са мјерним инструментом Narda SRM-3006, те апликацијама WiFi Analyzer и Ekahau HeatMapper, а на основу извршених мјерења у реалним ситуацијама анализиран је утицај сусједне и ко-каналне интерференције и дат приједлог и резултати примјене DCA алгоритма.

У **5. ПОГЛАВЉУ** је изложена идеја и начин рада предложеног TCRFFA алгоритма за повећање енергетске ефикасности у WLAN. Базирано на примјени интерполације представљено је математичко моделовање интензитета промјене количине пренесених података у току времена код WLAN. Представљен је и дијаграм тока TCRFFA, поједини кораци могуће софтверске имплементације у Matlab-у и приказан резултат примјене TCRFFA у смислу процентуалног повећања енергетске ефикасности на конкретном примјеру.

У **6. ПОГЛАВЉУ** је предложена хардверска и софтверска имплементација једне паметне WLAN антене која је погодна ради практичне имплементације предложених алгоритама за оптимизацију. Тестиран је утицај реда модулације, ширине канала, удаљености клијената, броја предајних и пријемних антена и модела пропагационог канала на вриједности EVM, извршених помоћу симулација са модификацијом уграђених параметара и примјера WLAN модела доступних у Matlab-у.

У **7. ПОГЛАВЉУ** је дат кратак закључак и наведени су будући планови за евентуално истраживање.

Послије тога, у ПРИЛОГУ I су приказане поједине РФ – мапе покривености Wi-Fi сигналом. Потом, у ПРИЛОГУ II је представљен програмски код предложених функција имплементираних у Matlab-у. У ПРИЛОГУ III је изложен и веома користан приједлог анализе утицаја EVM код вишенивовских M-QAM модулационих поступака који се планирају у будућим IEEE 802.11 WLAN, а наведена анализа је значајна и ради примјене паметних WLAN антена. Такође, у ПРИЛОГУ IV је изложена анализа економске оправданости избора оптималних WAPs, а у ПРИЛОГУ V је приказана оправданост коришћеног математичког модела код динамичке алокације канала.

2. ПРЕГЛЕД ПОСТОЈЕЋИХ РЈЕШЕЊА

Енергетска потрошња WAPs у разним стањима њиховог рада (idle, sleep, RX on, TX on) је детаљно анализирана [34]. Такође, показало се да су највеће уштеде у електричној енергији могуће уколико се врши управљање временским интервалима у којима ће одређени WAP бити укључен или искључен из напајања. Ово је последица тога што је предајна емисиона РФ енергија релативно мали проценат од укупне утрошене енергије из истосмјерног извора напајања WAPs. Ова чињеница доводи до значајних енергетских губитака јер је око 20% до 80% [2] од инсталираних WAPs управо у *idle* стању у WLANs инсталираним по кампусима, канцеларијама, итд.

Да би се ријешили изложени проблеми, у [3] се наводи да су предложена многа рјешења базирана на укључивању/искључивању напајања мало искоришћених WAPs који су у неактивном стању. Једно од тих рјешења [2] је базирано на софтверски дефинисаним мрежама (енг. *Software Defined Networks – SDN*) које требају омогућити гаранцију квалитета телекомуникационих услуга уз повећање укупне енергетске ефикасности цијеле мреже, а изнесени експериментални резултати су показали да тај предложени механизам (енг. *Energy Saving Mechanism, Scheme or Algorithm*) као рјешење омогућава одржавање QoS уз до 50% повећања енергетске ефикасности код WLAN са великим бројем клијената по јединици површине покривања сигналом (енг. *dense WLANs*). Значајни резултати у овој области су објављени прије више од 10 година у [4] гдје су извршене симулације сценарија примјене Green-clustering алгоритма на примјеру двије WLANs у којима се израчунавањем Еуклидове дистанце између WAPs формирају кластери с којима се управља централним контролером у WLAN. Аутори наводе да подјела на кластере има смисла при великим густинама (енг. *high-density*) имплементираних WAPs у WLANs јер је тада изражена просторна редунданса у споменутих WAPs који су међусобно близу постављени, па им се области покривања знатно преклапају и могуће је остварити велику брзину преноса код клијената у близини тих WAPs. Примјеном тог метода је остварено повећање енергетске ефикасности за око 20% - 80% код различитих WLAN, а у појединим једночасовним интервалима остваривало се повећање енергетске ефикасности и до чак 90% [4]. Такође, алгоритам који је представљен у овом мастер раду има боље перформансе када имамо велику просторну редундансу WAPs.

У [3] се наводи да је остварено од 50% - 80% уштеде у потрошњи енергије WAPs у зависности од различитих оптерећења код WAPs у WLAN. Уз то, истовремено је остварено од 7% - 20% повећања средње пропусне моћи код појединачног WAP, као и до 5% повећања енергетске ефикасности рада WAPs у односу на неке од других доступних алгоритама за ефикасно управљање са енергијом потрошње у раду WAPs (*неки од тих других алгоритама су: енг. Green-clustering и енг. Cooperative energy-efficient*)³[5]. Наравно, све наведене резултате треба узети са резервом јер су анализирани специјални случајеви телекомуникационих сценарија приликом примјене предложених алгоритама. У том смислу, пожељно је детаљније извршити практична тестирања наведених алгоритама над различитим сценаријима преноса како би се дошло до практично употребљивијих резултата.

Механизам управљања под називом **SEAR** (енг. *Survey Evaluate Adapt Repeat*) стратегије захтјева за ресурсима мреже (енг. *Resource on Demand – RoD*) је предложен у [6]. SEAR се може једноставно имплементирати користећи постојеће уређаје и RoD управљање напајањем WAPs представља остварљиву методу која не дјелује негативно⁴ на перформансе крајњих клијената у мрежи. Ту је уведено мјерење телекомуникационог саобраћаја клијената и разни термини (енг. *traffic traces, low traffic volume, high traffic volume*), уз мјерење броја регистрованих клијената у току времена са реализованим повећањем енергетске ефикасности за око 46%. Слична стратегија, базирана на **RoD**, је изложена у [7] гдје је извршено моделовање система (*тачније пријаве клијената на WLAN*) као реда чекања облика M/M/∞. Односно, извршено је стохастичко моделовање понашања корисника у мрежи узимајући у обзир учестаност укључивања/искључивања WAPs, симулирано на различитим сценаријима преноса, а који су исто показали да су RoD стратегије остварљиве и ефикасне као компромисно рјешење у супротстављеним захтјевима да се повећа енергетска ефикасност уз истовремено висок QoS у WLANs. Слична идеја је разматрана у [8], гдје се наводи да постоје три закона за ефикасна RoD управљања. То су:

³У овом раду аутори наводе остварење од 45% до 86% повећања енергетске ефикасности у типичним примјенама, тј. под уобичајним потребама/распореду/активностима клијената у WLANs.

⁴По личном мишљењу и резултатима добијених мјерења, може се десити и да утиче негативно тако да треба бити опрезан са свим наведеним подацима.

1. операције у WLAN мрежи морају остати стабилне,
2. WLAN област покривања не смије бити смањена и
3. понуђени QoS не смије бити смањен ка крајњим клијентима WLAN.

Такође, у претходном раду се уводи појам прага (енг. *Threshold*) у односу на број конекција које подржава WAP и на основу којег се дефинише када треба укључити додатни WAP у неким „*dense WLANs*”. Ту је извршено и аналитичко снимање и моделовање саобраћаја дневно у току 24 часа и израчунавање укупне потрошње енергије у току године. На основу два различита симулирана и моделована сценарија RoD начина управљања, аутори износе могућност до 87% повећања енергетске ефикасности у току временских периода „малих оптерећења“ (енг. *Low Traffic*) код имплементираних WAPs у WLANs. Такође, наведено је да се примјеном механизма контроле (укључивања/искључивања) напајања WAPs може знатно смањити емитовани ниво CO₂ и остварити уштеде у милионима долара у потрошњи електричне енергије на годишњем нивоу.

У алгоритмима предложеним у овом раду уведен је појам пресјека и уније скупова за одређивање заједничке области покривања више WAPs, односно укупне области покривања, респективно. У [9] су такође уведене уније и пресјеци скупова, али на примјени једноструких и вишеструких редова чекања у моделовању са укључивањем/искључивањем напајања WAPs, док се у овом мастер раду користе на примјени површина које се добијају крос-корелацијом преко пресјека области покривања WAPs са мјестима гдје се налазе корисници и вриједностима њихове потребне количине телекомуникационог саобраћаја у току времена. Потом, уведене су и матрице перформанси везане за вјероватноћу да се не може опслужити клијент у посматраној мрежи, просјечној потрошњи енергије по опслуженом клијенту и просјечном броју клијената на сваком могућем WAP у посматраној WLAN [9]. Истраживачи су уочили да се не смије занемарити вријеме потребно да се одређени WAP, који је претходно искључен, поново укључи у мрежу и постане у потпуности функционалан. То вријеме није једнако нули и анализиран је утицај кашњења у том укључивању са приједлогом централизованог алгоритма (енг. *Centralized adaptive control algorithm*) за оптимизацију потрошње енергије у WLAN у односу на критеријум кашњења усљед поновног укључивања WAP [10].

Такође, у нашој WLAN су тестирана и измјерена времена потребна за укључење/искључење WAP у/из WLAN, и показало се да се та времена налазе у опсегу од 22 до 30 секунди и да не зависе од броја WAPs које истовремено укључујемо или искључујемо у/из WLAN. С обзиром да су према претходно наведеним научним радовима, та времена била од 30 до 45 секунди, видљив је очигледан напредак у хардверској реализацији WAP уређаја, тј. брзине рада одговарајућих хардверских кола што је веома важно споменути јер је, са повећањем њихове брзине на основу **Nyquist/Kotelnik/Whittaker/Shannon**-ове теореме⁵ одмјеравања, омогућено коришћење већих ширина канала (*5MHz, 20MHz, 40MHz, 80MHz, 160MHz*) у новијим опцијама стандарда IEEE 802.11. Смањење кашњења усљед handover-a је разматрано и у [2]. У [11] је узето у обзир и кашњење усљед handover-a уз коначно вријеме преласка између различитих стања WAPs. Ту је анализирана веза између RSSI и пропусне моћи крајњег клијента контролишући учестаност (енг. *switching frequency*) укључивања/искључивања WAPs и доступну ширину пропусног опсега (енг. *available bandwidth per user*) која се нуди клијенту у одређеним временским тренуцима. Такође, у [11] се спомиње да је остварено повећање енергетске ефикасности од 24.3% са истовременим повећањем слободног пропусног опсега за 27.8% уз смањење *switching frequency* за 14.3%.

У суштини, сва наведена рјешења почивају на принципу моделовања појединих важнијих параметара (*нпр. количина саобраћаја, број клијената, разна кашњења, потребна ширина пропусног опсега, итд.*) у одређеној посматраној WLAN. Те идеје су давно представљене [12], само што се тада нису користиле за повећање енергетске ефикасности и оптимизацију преноса (*смањење интерференције при преносу, повећање SNR, повећање пропусног опсега по кориснику, итд.*) у WLANs јер у то вријеме тренутно разматрани проблеми нису били толико актуелни. С значајним повећањем броја клијената у овим мрежама, дошло је до све већег значаја изложених проблема јер је све већа актуелизација имплементације WLAN (*повећања броја WAPs, тј. све већег броја „dense WLANs”*) и доношења нових ревизија релевантних стандарда.

⁵Треба нагласити да је теорему одмјеравања у најопштијем случају први формулисао славни француски и свјетски математичар/физичар **Augustin-Louis Cauchy** (1789-1857), а којег многи сматрају и творцем комплексе анализе. Због значаја примјене, у телекомуникацијама је теорема одмјеравања позната по великим научницима: **Harry Theodor Nyquist** (1889-1976), **Vladimir Aleksandrovich Kotelnikov** (1908-2005), **Claude Elwood Shannon** (1916-2001) и **Edmund Taylor Whittaker** (1873-1956). Сматра се да су сви ови научници независно један од другог формулисали теорему одмјеравања приликом рјешавања конкретних проблема којима су се тада бавили.

Такође, у мастер раду биће обрађена могућност практичне имплементације преусмјеравања дијаграма зрачења антена, а што је реализовано примјеном паметних Wi-Fi антена (енг. *smart Wi-Fi antennas*). Ове антене се уводе ради максимизирања SNR, минимизирања EVM и BER, те додатних могућности које пружа просторно мултиплексирање. Такође, наведена је могућност примјене модификације дијаграма зрачења, тј. коришћење ових антена за побољшење енергетске ефикасности и оптимизацију преноса у WLAN коришћењем модела крос-корелације преко површина покривања пријемним сигналом и областима гдје се налазе корисници који генеришу телекомуникациони саобраћај.

Иначе, претходни принципи се одавно користе у војној индустрији и при раду уређаја под називом **RADAR** (енг. *RADio Detection And Ranging*), односно радио-локацији и навигацији. У скорије вријеме, на основу иновација и развоја технике, ти принципи попримају све већи значај и примјену у цивилним технологијама – као што је нпр. и овдје анализирана примјена у WLAN.

Што се тиче рјешења која се користе ради смањења WAPs РФ – каналне интерференције, показало се корисним коришћење фреквенцијског скакања канала (енг. *frequency channel hopping*) при Wi-Fi преносу [13]. У претходном раду је коришћена апликација Wi-Fi Analyzer, која се такође користи и у овом раду. Наиме, и примјена фреквенцијског скакања канала се користи као рјешење за смањење утицаја каналне интерференције због саме природе рада WLANs које користе временско мултиплексирање због којег је истовремено у опсегу ISM WLAN 2,4GHz могуће користити до три Wi-Fi канала појединачне ширине спектра од 22MHz. Односно, пожељно је да алогоритам врши динамичку додјелу канала тако да у одређеним временским интервалима обезбједимо ортогоналност спектра истовремено заузетих Wi-Fi канала који се користе код клијената појединих WAPs. Потом, у циљу процјене сусједне и ко-каналне интерференције, коришћене су спектралне густине снаге (енг. *Power Spectral Density – PSD*) примјених Wi-Fi сигнала и уведена је функција за процјену интерференције преко дијела енергије интерферирајућих сигнала [14]. У претходном раду, извршене су симулације и добијени резултати смањења интерференције коришћењем тзв. оригиналног DSATUR алгоритма и његове благе модификације дефинисане преко графичке представе тог алгоритма. Потом, у циљу мјерења интерференције између сусједних канала, дефинисан је фактор нивоа интерференције [15]. Такође, у истом раду, формулисан је проблем динамичке додјеле канала у виду рјешавања нелинеарних цјелобројних једначина.

Треба истаћи, иако то до сада није експлицитно наглашено и без обзира како су то аутори наведених радова називали, да је увијек суштина у смањењу интерференције била у минимизацији конкретно дефинисане естимације дискретне или континуалне крос-корелационе функције, а што је урађено и у овом мастер раду.

3. ПОСТУПАК ПЛАНИРАЊА IEEE 802.11 WLAN

Да би могли извршити оптимално планирање одређене IEEE 802.11 WLAN, потребно је прије свега знати које функције таква мрежа треба да подржава, потом како функционише и шта се захтијева за исправан рад мреже. То су веома широке области које превазилазе тематику овог мастер рада и заинтересовани читаоци детаље могу пронаћи у [16-19].

Иначе, стандарди IEEE 802.11a/b/g/n/ac/ah/ax се еволуционо мијењају. Нпр. циљ IEEE 802.11n, у којем су дефинисане ширине пропусног опсега канала 20MHz или 40MHz, био је достизање спектралне ефикасности при преносу од 3bps/Hz. У практичним ситуацијама највише је остварена ефикасност од 1,6bps/Hz⁶ у случају само једног корисника [19]. У истраживачким условима код примјене стандарда IEEE 802.11ax остварена је спектрална ефикасност од чак 10bps/Hz/ћелији. У случајевима већег броја корисника је мања спектрална ефикасност јер су IEEE 802.11 WLANs увијек у полудуплексном временском режиму (енг. *Time Division Duplex - TDD*) и користе метод вишеструког приступа са ослушкивањем носиоца и избјегавањем колизија (енг. *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance - CSMA&CA*) за шта се при преносу користе разни контролни и управљачки фрејмови података. Просјечна дужина додатних фрејмова који се користе при преносу је реда неколико десетина бајтова, тако да се смањује укупна спектрална ефикасност преноса. Најзначајније поруке које се шаљу управљачким фрејмовима су: - захтјев и одговор (енг. *Association request and response*) за придруживање WAP, порука за идентификацију (енг. *Authentication*), - порука за разне радње које треба извршити (енг. *Action*), као и веома важне⁷ поруке садржане у **beacon** фрејмовима, а које нам говоре о: подржаним брзинама преноса, да ли се користи фреквенцијско скакање или директна секвенца као пренос у проширеном опсегу, потом информацијама о идентификатору скупа услуга (енг. *Service Set Identifier - SSID*), информацијама о независном основном скупу услуга (енг. *Independent Basic Service Set - IBSS*), као и временској синхронизацији и разним другим параметрима преноса.

⁶ Према мјерењима у WLAN на ЕТФБЛ је остварена максимална брзина преноса од 36Mbps уз коришћење ширине канала од 22MHz код инсталиране IEEE 802.11n. На основу тога се показује да је омогућена спектрална ефикасност од 36Mbps/22MHz=1,64bps/Hz.

⁷Ове поруке, тачније поља у овим фрејмовима су веома корисна за имплементирање радио локационих и навигационих услуга у Wi-Fi мрежама, као и за усмјеравање дијаграма зрачења код паметних Wi-Fi антена.

Код WLAN се свака група бежичних уређаја назива скуп услуга. SSID је текстуални стринг (*до 32 карактера дужине*) који се налази у сваком фрејму који се преноси и произвољна два уређаја могу да комуницирају уколико се код предајног и пријемног уређаја подударају стрингови у пољу SSID. Уколико у WLAN два или више клијената директно комуницирају без неких додатних посредника (*тј. управљачких уређаја, као што су нпр. WAPs*), тада кажемо да је ријеч о независном основном скупу услуга или **IBSS** (*често се такве мреже називају и „lat. ad-hoc” бежичне мреже, што значи да су само за ту конкретну сврху настале, односно без додатног контролера при преносу*). Када се клијент удаљава од WAP, опада ниво корисног примљеног сигнала (*смањује се SNR*), услијед чега опада и брзина преноса са првобитне практично остварене вриједности од нпр. 36Mbps, на сљедеће стандардне брзине: 24Mbps, 18Mbps, 12Mbps, 9Mbps, (*нпр. код IEEE 802.11g*); итд. Уколико је подржана компатибилност са стандардом IEEE 802.11b може доћи до додатног смањења брзине преноса јер уколико у ћелији постоји више клијената који подржавају различите IEEE 802.11 стандарде, онда ће се у тој ћелији користити онај *стандард* (*нпр. одговарајућа вишенивовска модулација и кодовање*) коју подржава највећи број клијената у WLAN. То има за посљедицу да када би само један „*старији*“ стандардизован уређај, односно клијент нпр. типа IEEE 802.11b, прешао у ћелију којом управља приступна тачка која подржава IEEE 802.11b/g проузрокује да би тада цијела ћелија морала прећи на мању максималну стандардизовану брзину преноса, тј. умјесто 54Mbps на 11Mbps, а што би значајно деградирало првобитне перформансе преноса клијената у IEEE 802.11b/g ћелији. Стандард IEEE 802.11a није компатибилан са стандардима IEEE 802.11b/g јер користе различите фреквенцијске опсеге. Наиме, IEEE 802.11a користи нелиценцирани 5GHz фреквенцијски опсег који је **FCC** (енг. *Federal Communications Commission*) подјелила на три одвојена подопсега: 1. *за коришћење на отвореном простору на располагању је опсег фреквенција од 5,725GHz до 5,825GHz*; 2. *за коришћење у затвореном простору је на располагању опсег од 5,150GHz до 5,250 GHz*; док је *за коришћење у отвореном и затвореном простору на располагању тзв. средњи фреквенцијски опсег од 5,250 GHz до 5,350 GHz*. За разлику од претходног, стандарди IEEE 802.11b/g користе **ISM** (енг. *Industrial, Scientific and Medical*) фреквенцијски опсег на 2,4 GHz (*у Европи, Кини и САД-у је ISM WLAN опсег од 2,4000GHz до 2,4835GHz, док у Јапану за тај опсег постоји још и опција од 2.471GHz до 2.497GHz*) и у овом опсегу Wi-Fi клијенти се сматрају секундарним корисницима и обавезни су примарним корисницима препустити фреквенцијски опсег када год је то потребно.

Стандард IEEE 802.11ac се може имплементирати у мјешовитом окружењу са одговарајућим постојећим сертификованим IEEE 802.11 WAPs. При томе, препоручује се да предајна РФ снага буде за око 6dB (при том и разлика између минималне и максималне предајне РФ снаге у радио каналу не треба бити већа од 6dB јер утицај интерференције може бити значајан) већа када се користи 5GHz опсег, у односу на ситуацију када користимо фреквенцијски опсег 2,4GHz. Потребно повећање снаге емитовања је разумљиво ако се узме у обзир да се слабљење у слободном простору може изразити као:

$$a_{c.n.}[\text{dB}] \cong 32,45 + 20\log r[\text{m}] + 20\log f[\text{GHz}] \quad (3.1)$$

У (3.1) су: $a_{c.n.}[\text{dB}]$ слабљење при простирању у слободном простору изражено у децибелима, r је радијално растојање у метрима између клијента и WAP, и f је радна фреквенција изражена у гигахерцима. Из (3.1), ако одржавамо исто растојање r , онда са промјеном фреквенције са 2,4GHz на 5GHz долази до повећања слабљења за $14 - 7,6 \approx 6\text{dB}$.

Пренос на физичком слоју мреже се врши имплементацијом **OFDM** (енг. *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) коришћењем брзе Фуријеове трансформације (енг. *Fast Fourier Transform - FFT*) имплементирание на хардверски начин ради још веће брзине обраде и преноса.

Код IEEE 802.11ac се користе ширине РФ канала за пренос од 80MHz (овдје се користи 234 подносилаца⁸ података од укупно 242 OFDM подносилаца) и опција са 80MHz+80MHz=160MHz ширине РФ канала (са укупно 484 OFDM подносилаца). IEEE 802.11ac подржава MU-MIMO са до 8 различитих просторних стримова при преносу, али тренутно се производе уређаји са подршком највише до 4 различита просторна стрима што деградира укупне перформансе планиране имплементације мреже.

Постоји мноштво других параметара који су од значаја приликом оптимизације у одређеној WLAN [16].

⁸Код IEEE 802.11a/b/g/n/ac подносиоци (овдје се користи до 512 подносилаца, тј. ширине канала до $512 * 312,5\text{kHz} = 160\text{MHz}$) су међусобно размакнути у фреквенцијском домену по $312,5\text{kHz}$, па је симболско трајање $1/312,5\text{kHz} = 3,2\mu\text{s}$. Код стандарда IEEE 802.11a је $78,125\text{kHz}$ размак између OFDM подносилаца (ту се користи до 2048 подносилаца) и подржана је чак 1024QAM, док је код 802.11ac највећи ниво подржане модулације 256QAM. Ово 4 пута повећање је последица што сада постоје дигитална електронска кола која могу вршити 4 пута брже одмјеравање и процесирање података.

Треба нагласити да IEEE 802.11ac подржава 256QAM, али да би се нпр. обезбиједила брзина преноса од 86Mbps, захтјева се минимални ниво од $RSSI = -59\text{dBm}$ (*уз то треба бити и $SNR > 25\text{dB}$*) када се користи РФ канал ширине 20MHz. За постизање максималне брзине од 866Mbps потребан је $RSSI$ од минимално -49dBm уз употребу 160MHz укупне ширине РФ канала. Претходно наведене вриједности $RSSI$, уз потребни SNR , реализоваће се математички креираним моделом једног приједлога паметне WLAN антене базиране на beamforming-у.

Због ових захтјеваних снага сигнала важно је снимити РФ мапе снаге пријемног сигнала, односно $RSSI$ области покривања (енг. *RSSI coverage maps*) у којој се планирају поставити WAPs, што је у струци познато још под термином отиска ћелије (енг. *cell footprint*). При томе треба имати у виду да се обично препоручује да растојање између сусједних WAPs буде од 12 до 18 метара, при чему треба планирати око 50 активних уређаја по радио каналу инсталираног WAP, тј. над простором планиране WLAN. Овдје је то размотрено над конкретним примјером WLAN у циљу оптимизације преноса и примјене предложених алгоритама.

У [17], наведено је шта оптимизација бежичне мреже подразумијева, а у суштини се своди на кораке који су интуитивно јасни. Наиме, основни задатак код успјешне оптимизације је извршити компромис између предности и недостатака постојећих (*уз приједлог нових*) рјешења анализом CAPEX (енг. *CAPital EXpenditur*), OPEX (енг. *OPerating EXpenses*), SLA и ROI (енг. *Return On Investment*) различитих реализација разматраних рјешења. Прије тога су одређене оптималне величине појединих ћелија и мјеста гдје ће бити постављени WAPs како би се смањио утицај сусједа и интерференције. Потом су одређени одговарајући распореди подносилаца (*тј. радио – канала*), изабрани кодни поступци који ће се користити, израчунати задовољавајући прагови нивоа пријемног сигнала (*овдје ће се анализирати и снимити РФ – мапе покривања, тј. површине индикатори нивоа пријемног сигнала или RSSI – површине покривања сигналом*) при којима би требала да се врши примопредаја клијената између WAPs, и слично.

4. МЈЕРЕЊА У WLAN И ПРИЈЕДЛОГ DCA

Помоћу управљачког софтверског система, **UniFi 5.4.11**, који је инсталиран на серверу и који је спојен на комутатор на којем су спојени и WAPs, могу се посматрати: (Слика 4.1) подаци о корисницима (поље **NAME**) повезаним на поједине WAPs; њихове **IP** адресе; назив конекције – тј. Wi-Fi мреже; назив **AP/PORT**-а на који су повезани (нпр. *Prizemlje1, LabFizike, Biblioteka, Dekanat, itd.*); ниво њихове активности (поље **ACTIVITY**) илустровано зеленом бојом; количина података у downstream-у (**DOWN**) и upload-у (**UP**) за сваког корисника; укупно вријеме колико је корисник активно конектован (**UPTIME**) и радње које се могу извршити над корисницима/клијентима (**ACTIONS**).

Поједини од усредњених резултата мјерења, за један одређени дан, су приказани на сликама 4.2-4.3 и у Табели 4.1 је приказан измјерени број клијената у одређеним временским тренуцима (у 8:00, 10:00, 12:00, 14:00 и 16:00 часова) пријављених на одређену **Wi-Fi** локацију, тачније на Access Point (*Prizemlje, Dekanat,...*) и вриједност телекомуникационог саобраћаја⁹ (енг. *Traffic*) који размјењују. На основу ових измјерених података, закључено је у конкретном случају да су број активних корисника и саобраћај највећи у подне, док су знатно мањи у раним јутарњим и касним послје-подневним часовима. На основу тога је проистекла идеја да у одређеним временским интервалима можемо искључити поједине **WAPs** из напајања ради повећања њихове енергетске ефикасности и да се при том њихов телекомуникациони саобраћај преусмјери на неки од других **WAPs**.

⁹ Јединица за интензитет телекомуникационог саобраћаја је Erlang и посебно има велики значај при пројектовању и преносу телекомуникационих мрежа за говорне сервисе, али је код преноса података погодније изразити интензитет телекомуникационог саобраћаја преко укупне пренесене количине података у мрежи.

NAME	IP ADDRESS	CONNECTION	AP/PORT	ACTIVITY	DOWN	UP	UPTIME	ACTIONS
28:c2:dd:6c:5dc9	10.99.145.215	etfbl.net	Prizemlje1	---	162 KB	55.6 KB	2h 22m 35s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
AleksanriPhone	10.99.166.241	etfbl.net	Prizemlje1	---	80.6 KB	58.4 KB	2m 46s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
Amel	10.99.158.216	etfbl.net	LabFizike	---	6.76 MB	810 KB	3m 37s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-129e509fd0b139b7	10.99.174.219	etfbl.net	Biblioteka	---	787 KB	88.3 KB	3m 3s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-14bb7a811f08fe12	10.99.174.252	etfbl.net	Dekanat	---	172 KB	145 KB	30m 57s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-166424eaf69565bd	10.99.191.219	etfbl.net	Dekanat	---	14.3 KB	21.9 KB	3h 44m 13s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-182cfc361403fc	10.99.150.228	etfbl.net	Biblioteka	---	0 B	0 B	29s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-18957923e374c33a	10.99.148.150	etfbl.net	LabFizike	---	2.23 KB	5.93 KB	17m 11s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-19521e86daac0f7c	10.99.140.237	etfbl.net	Biblioteka	---	12.3 MB	761 KB	17m 36s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-1dc3e1f56ab20069	10.99.140.237	etfbl.net	Prizemlje1	---	0 B	140 B	13m 14s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-2580a1b78acc5d97	10.99.180.250	etfbl.net	PrviSpratLjevo	---	0 B	84 B	7m 33s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-27b4a324c814428	10.99.155.248	etfbl.net	Prizemlje1	---	0 B	598 B	6m 2s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-2b393741be2d1a45	10.99.175.253	etfbl.net	Biblioteka	---	761 B	372 B	4m 16s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE
android-32faab93b0899033	10.99.155.124	etfbl.net	Dekanat	---	0 B	84 B	3h 5m 54s	BLOCK RECONNECT UNAUTHORIZE

Слика 4.1 - Илустрација контролног софтвера UniFi 5.4.11

На Слици 4.2 је приказано укупно шест активних WAPs у опсегу 2.4GHz и 5GHz код посматране WLAN. Распоред канала који се користе од стране клијената је следећи: 1, 6 и 11 у опсегу 2,4GHz. Односно, у опсегу 5GHz, користе се канали: 36, 40, 44 и 48.



Слика 4.2 - Активни WAPs и клијенти на каналима у опсезима 2,4GHz и 5GHz

Потом, на Слици 4.3 је приказан распоред укупног броја од 38 активних клијената и тренутне вриједности укупне количине података пренесених у upload-у и download-у од стране разних WAPs. У Табели 4.1 су приказане само измјерене вриједности укупне пренесене количине података код различитих WAPs на ЕТФБЛ WLAN чији је SSID=etfbl.net, а за остале (Слика 4.8) WLAN немамо могућност управљања и мјерења њених параметара, али су њихови сигнали такође доступни у посматраном RSSI простору и у одређеним ситуацијама проузрокују значајну каналну интерференцију и друго деградирање квалитета у јавној etfbl.net WLAN чије параметре мјеримо у смислу утврђивања потребних математичких модела и законитости у њиховом раду.



Слика 4.3 - Илустрација измјерених вриједности тренутне употребе WAPs

Табела 4.1 - Измјерени број корисника и њихова количина саобраћаја у одређеним временским тренуцима по појединим локацијама WAPs

а) Оптерећење за понедељак, 18.09.2017., у 08:00^h

Вријеме мјерења: 08:00 ^h		
Локација	Број корисника	Саобраћај
Приземље	1	8,04KB
Библиотека	5	124KB
ЛабФизике	6	50,3KB
Деканат	3	3,11KB
ПСдесно	3	2,44KB
Укупно	18	188KB

б) Оптерећење за понедељак, 18.09.2017., у 10:00^h

Вријеме мјерења: 10:00 ^h		
Локација	Број корисника	Саобраћај
Приземље	12	1,07GB
Библиотека	27	1,05GB
ЛабФизике	15	309MB
Деканат	8	280MB
ПСдесно	9	252MB
Укупно	71	3,38GB

в) Оптерећење за понедељак, 18.09.2017., у 12:00^h

Вријеме мјерења: 12:00 ^h		
Локација	Број корисника	Саобраћај
Приземље	12	2,5GB
Библиотека	20	2,31GB
ЛабФизике	11	787MB
Деканат	11	390MB
ПСдесно	18	1,33GB
Укупно	72	7,28GB

г) Оптерећење за понедељак, 18.09.2017., у 14:00^h

Вријеме мјерења: 14:00 ^h		
Локација	Број корисника	Саобраћај
ПСлијево	11	264KB
Библиотека	20	4,49MB
ЛабФизике	17	9,46MB
Приземље	13	5,6MB
ПСдесно	14	5,2MB
Укупно	75	25,5MB

д) Оптерећење за понедељак, 18.09.2017., у 16:00^h

Вријеме мјерења: 16:00 ^h		
Локација	Број корисника	Саобраћај
Деканат	6	107MB
Библиотека	18	1,2GB
ЛабФизике	10	527MB
Приземље	17	259MB
ПСдесно	12	288MB
Укупно	63	2,35GB

У Табели 4.1 г) се први пут појављује локација *ПСлијево*, јер је у осталим временским тренуцима (*када су вршена мјерења*) телекомуникациони саобраћај на тој локацији био једнак нули, односно на тој локацији није било регистрованих активних клијената. Такође, у временским интервалима од 22:30^h до 06:30^h није било регистрованих клијената на ниједном WAP код ове WLAN, док у тренутном стању WLAN сви WAPs стално користе енергију из извора за **PoE** (енг. *Power over Ethernet*) напајање, па је пожељно обезбиједити опцију (*алгоритам управљања*) у контролном UniFi софтверу која би искључила у одређеним временским интервалима напајања **WAPs**. На тај начин би се извршила уштеда електричне енергије од 18,98kWh (*тј. 6.5W по 8 часова у току 365 дана, при чему је занемарено да на UTP CAT5е каблу дужине од 100 метара умјесто снаге напајања од 6.5W имамо повећање за око 2W, тј. стварна снага је 8,5W*) на годишњем нивоу по једном **UniFi AP**-у.

На основу садашње цијене (*Слика: 4.4*) би се годишње уштедило 29,56KM по једном WAP-у. То су резултати за конкретан дан и у детаљнијим мјерењима је долазило до значајних осцилација у резултатима, али се показало да је, посматрано на глобалном нивоу, могуће енергетски ефикасније управљање са побољшањем перформански при преносу. Овај закључак има велики значај у бежичним батеријски напајаним мрежама и у будућим примјенама, тј. када би било могуће управљање са радом свих WAPs у окружењу. Наиме, то би поготово имало користи када би сви WAPs били доступни у једној јединственој WLAN чијим свим WAPs управља само један провајдер услуга.

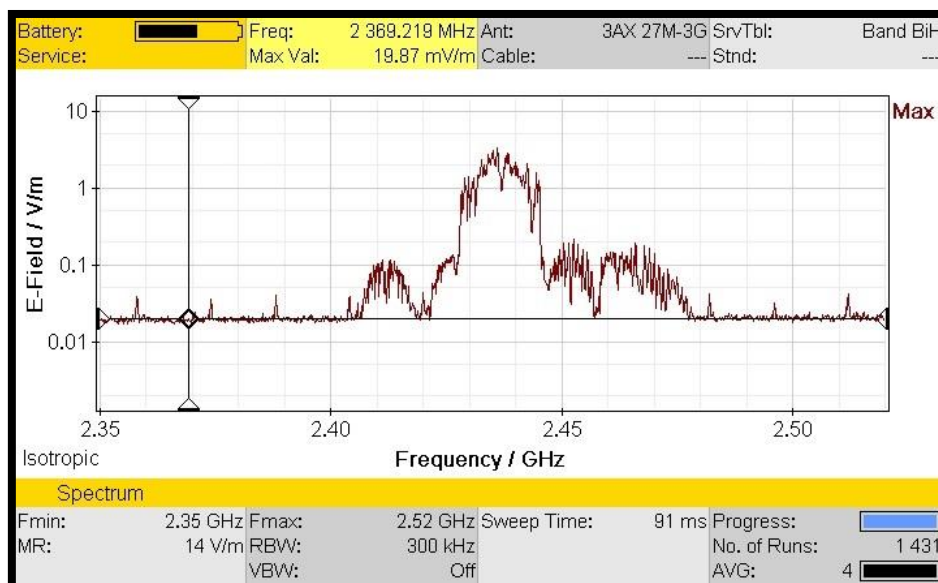
Kategorija potrošnje:	Ostala potrošnja ▾
Tarifna grupa:	III tarifna grupa - Dvotarifno brojilo ▾
Potrošnja VT	0
Potrošnja MT	18.98
Sezona obračuna:	Viša - Zimska (01.10. - 31.03.) ▾
Valuta:	KM ▾
<input type="button" value="Izračunaj"/>	
Obračunata snaga	20.74 KM
Potrošnja VT	0 KM
Potrošnja MT	1.96 KM
Ukupna mjesečna potrošnja	22.71 KM
PDV	3.86 KM
Naknada za mjerno mjesto	2.48 KM
PDV na naknadu	0.42 KM
Naknada za obnovljive izvore el. en.	0.08 KM
PDV na naknadu	0.01 KM
<hr/>	
Ukupan iznos računa	29.56 KM

Слика 4.4 - Званични прорачун цијене електричне енергије у БиХ [20]

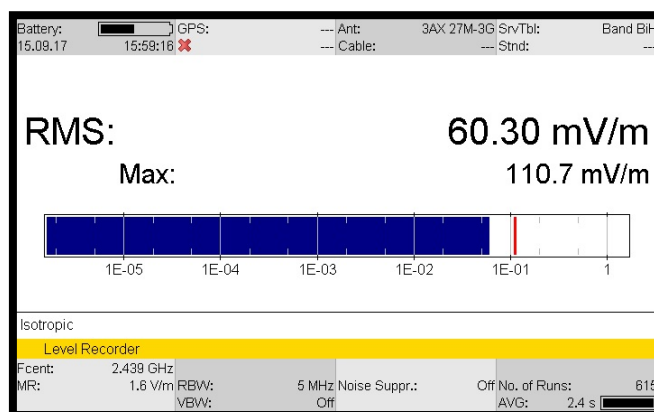
У циљу спровођења мјерења јачине електричног поља са мјерним уређајем *Narda SRM-3006*, одређене су позиције на факултету које назване Мјерним Тачкама (MT), а које су послужиле као референтне тачке у којима смо мјерили интензитет електричног поља од појединог WAP-а у зависности од његовог тренутног оптерећења. Измјерене ефективне (енг. *Root Mean Square - RMS*) вриједности јачине електричног поља су се мјењале током времена од (10,66 - 368,20) [mV/m] у WLAN простору од интереса, а што је зависило и од удаљености WAP од поједине MT. Све измјерене вриједности су у границама прописаних и дозвољених вриједности. Потом, извршене су провјере радних фреквенција канала у опсегу ISM, које су исто задовољиле прописане вриједности (слике 4.5-4.7). Наиме, на Слици 4.5 види се да је заузет фреквенцијски спектар у опсегу од 2,4GHz до 2,4835GHz, а што је у складу са FCC (енг. *Federal Communications Commission*) и CE (енг. *European Commission*) међународним прописима.

У наставку, приложени су резултати додатних извршених мјерења која су иницирала идеју за предложене алгоритме у циљу дјелимичне оптимизације рада и рјешавања уочених проблема у посматраној WLAN, али и уопште. На Слици 4.5 је представљен спектар јачине електричног поља на удаљености од 1 метра од WAP-а помоћу којег смо тестирали испуњеност услова од стране FCC у смислу заузећа ISM опсега и јачине сигнала. На основу мјерења, показало се да су ти услови испуњени у складу са прописима, док је на Слици 4.6 представљено и графичко окружење мјерног инструмента *Narda SRM-3006* за мјерење нивоа јачине електричног поља на конкретној фреквенцији од 2,439GHz са измјереном ефективном вриједношћу јачине електричног поља од 60,30mV/m чији је максимум у

току времена достигао 110,7mV/m. Потом, на Слици 4.7 је мјерењем установљено да је јачина емитованог РФ - сигнала око 5 пута мања у *idle* стању посматраног WAP-а.



Слика 4.5 - Спектар јачине електричног поља



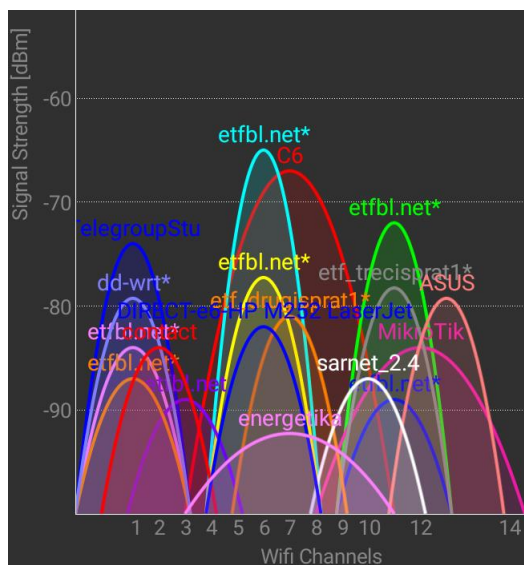
Слика 4.6 - Измјерене вриједности јачине електричног поља у МТ

narda
Safety Test Solutions®
an iB Communications Company

Meter	Configuration
Model: SRM	Antenna: Three-Axis Antenna 27MHz - 3GHz
S/N: G-0226	Cable:

Values		
Frequency	RMS	RMS Max
2 439.000 000 MHz	12.68 mV/m	74.95 mV/m

Слика 4.7 - Измјерена вриједност E_{RMS} у стању *Idle* код једног РФ канала



Слика 4.8 - Преоптерећеност опсега ISM WLAN 2,4 GHz

На Слици 4.8 су приказани спектри сигнала у једној МТ простора над којим је оперативна WLAN SSID=*etfbl.net*. Уочава се да је овај опсег фреквенција преоптерећен коришћењем WAPs од приватних (нпр. SSID = *TelegroupStu*, *Maja kancelarija*, *MikroTik*, ...) и јавних (нпр. *etfbl.net*) WLANs у заједничком оперативном простору. Уочљиво је значајно преклапање коришћених РФ канала, тј. фреквенцијског спектра од стране различитих SSID, WAPs и/или WLANs. То је дјелимично ријешено (*cmp. 24*) приједлогом **DCA** алгоритма, јер је пожељно што мање истовремено преклапање заузетог фреквенцијског спектра од различитих РФ канала [21]. Односно, што је више слободног спектра, може се користити већи број подносилаца при преносу и обезбиједити бољи QoS. На Слици 4.8 посебну пажњу треба обратити на РФ канал са SSID=*C6* чији је график спектралне густине снаге означен црвеном бојом и који је центриран на седми Wi-Fi канал. Уочава се да тај канал има значајно преклапање спектра са четвртим, петим и шестим Wi-Fi каналом, а и у подручју спектра од осмог до деветог Wi-Fi канала. То преклапање проузрокује већу интерференцију између сусједних канала (енг. *adjacent channel interference*), па је потребно да се смањи преклапање површина у спектру што је год могуће више. Наиме, познато нам је да уколико користимо већи број подносилаца при преносу OFDM сигнала да тада повећавамо битску брзину преноса и смањујемо утицај вишепутног простирања, али је тада потребно и дуже вријеме за обраду сигнала, већа је потрошња енергије, итд.

На основу претходног закључујемо да је потребно потражити компромисно рјешење.

На Слици 4.8 је розом бојом означен спектар од WAP са SSID = *energetika* и чија је ширина канала 40MHz (*тачније: 40MHz са још заштитних 2+2MHz што је укупно 44MHz*).

Такође, у том дијелу простора и у том временском тренутку мјерења, били су доступни и WAPs са WLAN SSID = *etfbl.net* ширине канала до прве нуле у спектру од $20+2=22\text{MHz}$, а на истој слици видимо и разне друге WAPs. Утицај сусједне (енг. *adjacent*) и ко-каналне (енг. *co-channel*) интерференције можемо смањити временским мултиплексирањем, или управљањем са нулама у спектру појединих подносилаца јер нам је познато да је интерполирајућа функција (приликом преноса дигиталног податка у временском домену) у фреквенцијском домену облика $\text{sinc}(f) \equiv \frac{\sin \pi f}{\pi f}$ и да су нуле ове функције у спектру дате са:

$$f_k = k\Delta f = k \frac{1}{T_s}, k = 1, 2, 3, \dots \text{ гдје смо са } T_s \text{ означили симболско трајање.}$$

Ради смањења интерсимболске интерференције и коришћења OFDM потребно је да обезбиједимо да када један од подносилаца има максимум у фреквенцијском домену, да тада од свих осталих подносилаца функције спектралне густине снаге пролазе кроз нулу и да бисмо то остварили можемо одржавати константним симболско трајање и да мијењамо укупан број подносилаца који одређени WAP користи, односно да мијењамо његову ефективну ширину канала. Други начин за смањење ове интерференције јесте да како се мијења слободна ширина канала коју има на располагању одређени WAP, да се с тим мијењају и симболска трајања појединих токова података који модулишу подносиоце тако да сваки наредни симболски интервал буде дупло дужег трајања од претходног и при томе можемо увијек користити исти укупан број подносилаца које користимо код различитих WAPs. Нешто слично претходно наведеном се већ одавно користи у WiMAX-у (енг. *Worldwide interoperability for Microwave Access option X, ie. IEEE 802.16x*), гдје је познато као SOFDMA (енг. *Scalable OFDMA*)¹⁰. На Слици 4.9 су приказани снимљени спектри након 10 минута у односу на Сliku 4.8. Наравно, ради још веће слободне површине у спектру, врши се динамичка контрола снаге носиоца, тако да је у истој МТ измјерено да у времену долази до промјена RSSI у износу до $\pm 6\text{dBm}$ у односу на средњу RSSI вриједност (Слика 4.10).

¹⁰енг. *OFDMA=OFDM Access, омогућава да више корисника врши симултано пренос на различитим подносиоцима по OFDM симболу. Обје опције (OFDM и OFDMA) имају своје предности и недостатке.*

При том преласку, долази до значајног смањења сусједне каналне интерференције јер се повећава слободна површина спектра код WAP SSID=C6. Потом, смањењем ширине канала на 20MHz (Слика 4.9) у односу на првобитних 40MHz (Слика 4.8) уз које је додатно извршено и повећање снаге емитовања долази до повећања QoS¹¹. У ту сврху, на Слици 4.10, приказана је временска зависност промјене вриједности RSSI од различитих WAPs у једној МТ. Ти подаци су важни јер су иницирали идеју за реализацију WAPs динамичке контроле избора оптималног канала. Такав вид алгоритма, од стране познате компаније CISCO Inc. означава се са DCA и наведено је да се њихова имплементација DCA подразумјевано врши сваких 10 минута. Такође, још једна идеја реализације DCA је предложена у [21]. По тој (нашој) идеји, одговарајући радни канал би се изабрао тако да међусобне површине преклапања ових канала буду минималне јер смо уочили са мјерењима и претпоставили да у реалној примјени долази до управо минимизације здружене међукорелације спектралних густина снага Wi-Fi канала код посматране WLAN. Дакле, потребно је да се пронађе канал када је највећи дио слободне површине спектра од одређеног WAP максималан, а што би се могло израчунати тражењем минимума крос-корелације спектралних густина снага појединих истовремено коришћених Wi-Fi канала. При томе, треба имати увид који су пилот канали, а на којима се врши стварни пренос података јер у супротном можемо доћи до погрешног закључка. Исти ефекат, практично се постиже варирањем снаге OFDM сигнала и временским мултиплексирањем интервала када ће који од WAPs бити активан. Примјер тога је илустрован на Слици 4.9 која је снимљена од стране истог клијента са исте позиције МТ као и код Сlike 4.8 и при истим свим осталим условима, али само 10 минута касније. На основу свега наведеног, ту је очигледно како се смањује утицај интерференције уз истовремено повећање SNR, максималног битског протока и уопште укупног QoS. Додатно смањење утицаја интерференције и повећање спектралне ефикасности, можемо остварити уколико претходним опцијама додамо могућност да сваки од WAPs може адаптивно мјењати ширину канала коју користи (5MHz, 10MHz, 20MHz, 40MHz, 80MHz, 160MHz) у складу са бројем активних клијената и њиховим тренутним потребама.

¹¹ На Слици 4.9 је максимум примјене снаге -63dBm, а на Слици 4.8 је максимум примјене снаге у истој МТ на средини седмог Wi-Fi канала износио -67dBm.

Наравно, тада морамо мијењати симболско трајање, односно фреквенцијски размак између подносилаца, а што доводи до усложњавања хардверске реализације. Са слика 4.8-4.9 видимо да нема смисла посматрати површину испод сигнала нивоа око -85dBm , јер је тада обично неизбјежно преклапање површина у спектрима, а и ти нивои сигнала нису толико значајни јер је максимални ниво око -63dBm .

Приједлог DCA алгоритма је формулисан у сљедећем псеудо облику:

Приједлог имплементације DCA [21]:

Почетак:

1. За сваки WAP у WLAN/WLANs, гдје је минимална вриједност $RSSI > \text{Threshold}$ (-85dBm): израчунати за посљедњих 30 минута активности колики је био број активних клијената и количина саобраћаја по WAP-у

2. Формирати листу $\{WAP_1, WAP_2, \dots, WAP_K\}$ постојећих WAPs у опадајућем редосљеду у односу на важност њихових појединачних клијената. Претходно смо одредили, на основу статистике-мјерењем њихове активности у посљедњих 30 минута и потребе за ширинама РФ канала коришћених WAPs.

3. WAP₁, који има највећи значај, поставити на средину, тј. 7. канал у 2,4GHz опсегу. На овај начин, тај WAP може подржати ширине канала од 5MHz до 80MHz и најбољу гаранцију QoS за своје клијенте;

4. WAP₂ подесити на Wi-Fi канале са редним бројем $N \in \{6,8,5,9,4,10,3,11,2,12,1,14\}$ и при томе рачунати крос-корелацију (односно преклапање површина) са површином у спектру коју заузима WAP₁;

5. Изаберемо први редни број из скупа N при коме је минимална вриједност срачунатих корелација. Означимо тај редни број са $N_2 \in N$.

6. Одредити редни број канала за сљедећи WAP₃ и тај редни број одређујемо тражењем минимума крос-корелације са постојећим спектрима од WAP₁ и WAP₂ са спектром од WAP₃ (односно када је највећа слободна површина) при чему нам је важна само површина изнад $RSSI = \text{Threshold}$ (нпр. -83dBm) и његов редни број означимо са $N_3 \in N \setminus \{N_1, N_2\}$. ;

7. Поступак наставимо за сваки WAP чији је максимални $RSSI > -83\text{dBm}$ у посматраној RSSI области покривања

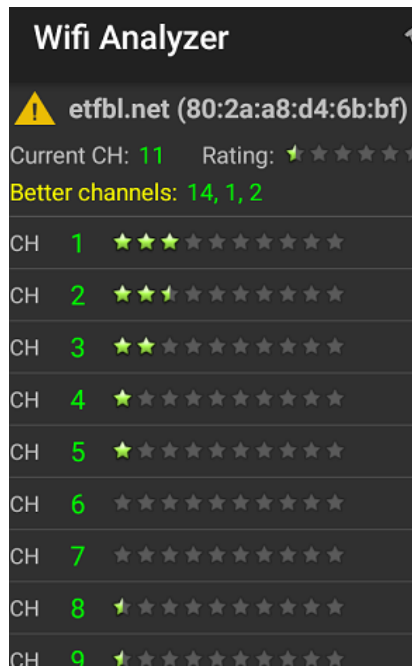
Крај.

Наиме, претходни алгоритам је посљедица реализованих мјерења код конкретне WLAN имплементације на простору ЕТФБЛ. Уочено је да у одређеним временским интервалима имамо нпр. само 1-3 активна клијента конектована на одређени WAP са просјечним потребама клијената до 1Mbps, а што значи да би тада била сасвим задовољавајућа ширина пропусног опсега канала од 5MHz. Наиме, уколико WAP не подржава DCA, тај WAP би увијек задржавао исту ширину канала која му је првобитно алоцирана од 22 (односно корисних 20) MHz или 44 (40) MHz. Значи да тада имамо малу спектралну искоришћеност, док је на одређеним другим WAPs у истој WLAN и у тим истим временским интервалима било конектовано по 30-50 клијената по једном WAP-у са просјечним потребама од 1,5-2Mbps по клијенту, а што значи да су тада биле потребне веће ширине канала за пренос.

Пошто је сама мрежа динамична у току времена, потребно је обезбиједити њену могућност адаптације и у погледу ширине канала који поједини WAP има на располагању у одређеним временским интервалима. Потом, с обзиром да у ISM 2,4GHz опсегу (Слика 4.9) имамо на располагању 14 канала ширине по 5MHz и који су означени редним бројевима: 1,2,3,...,14; да се закључити да у том опсегу можемо максимално истовремено користити два канала ширине 40MHz (односно 44MHz ако узмемо у обзир заштитни „енг. guard“ спектар) или три цијела канала од 22MHz, односно само један канал од 80MHz. На Слици 4.11 се виде канали који се у тим временским тренуцима користе код појединих WAPs у тој истој просторној МТ, као и понуђени „бољи“ канали који би се могли користити.

Избор временских интервала рада DCA зависи од статистике сваке понаособ посматране WLAN. На ЕТФБЛ, с обзиром на распоред наставе (45 минута час + 15 минута пауза) студената, те посматрања промјена статистичких показатеља дошли смо до закључка да би DCA било пожељно вршити на средини паузе и средини времена наставе, тј. конкретно у нашем случају на сваких 30 минута. Међутим, ради динамичког избора оптималних временских интервала, те ефикасним управљањем са радом WAPs, могао би се имплементирати један од облика вјештачке интелигенције детаљно описаних у [22-23].

На Слици 4.11 се види да је коришћен 11. Wi-Fi канал од стране једног клијента у посматраној МТ код наше *etfbl.net* WLAN. Такође, приказани су и бољи (14, 2 и 1) Wi-Fi канали који би се код конкретног клијента могли користити. С обзиром да се потребе за оптималним каналом рада WAP-а могу значајно мијењати код различитих клијената, погодно је примјенити технологију *beamforming-a*.



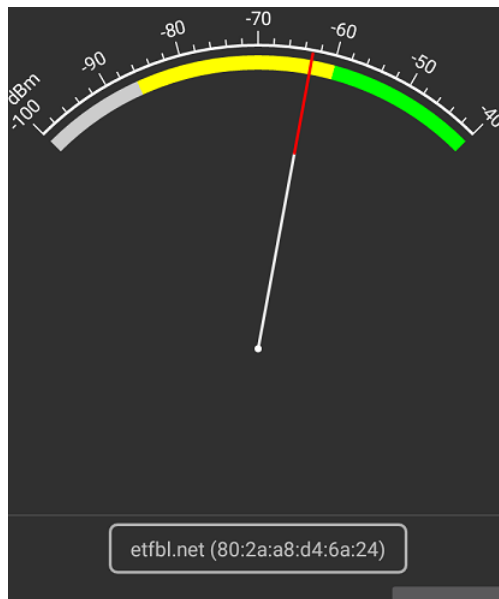
Слика 4.11 - Доступни Wi-Fi канали у једној МТ

У циљу оптимизације преноса, у смислу минимизације сусједне и ко-каналске интерференције и повећања енергетске ефикасности, значајне проблеме нам стварају и различити власници од разних произвођача WAPs у простору WLAN на ЕТФБЛ. Поједини од тих произвођача и власника су приказани на Слици 4.12. У циљу повећања енергетске ефикасности, приказане су и снимљене РФ мапе покривања сигналом на сликама 4.14 – 4.16.



Слика 4.12 - Визуелизација различитих произвођача WAPs у WLAN окружењу

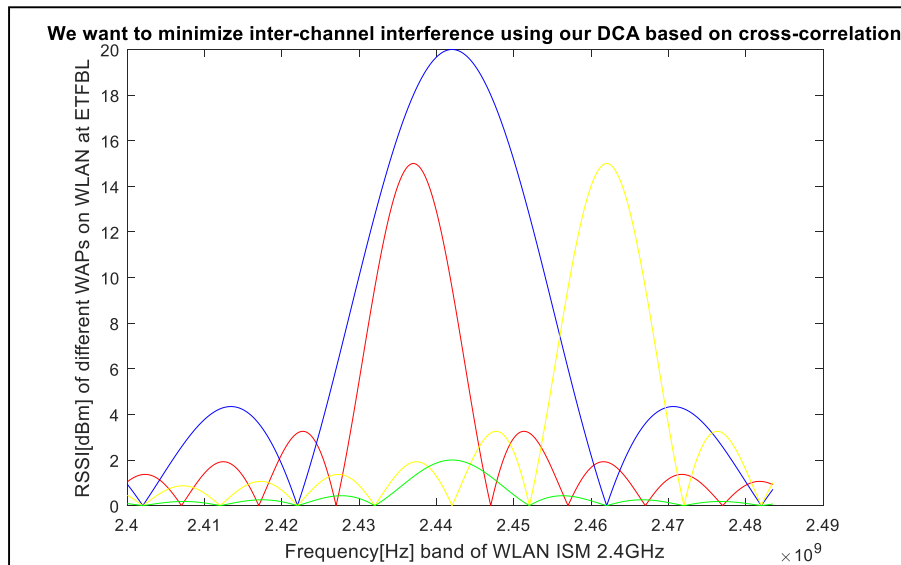
Са Слике 4.12 се види да је у посматраној МТ ниво $RSSI = -63\text{dBm}$, а што је и увеличано приказано на Слици 4.13.



Слика 4.13 - Измјерени ниво сигнала у посматраној МТ



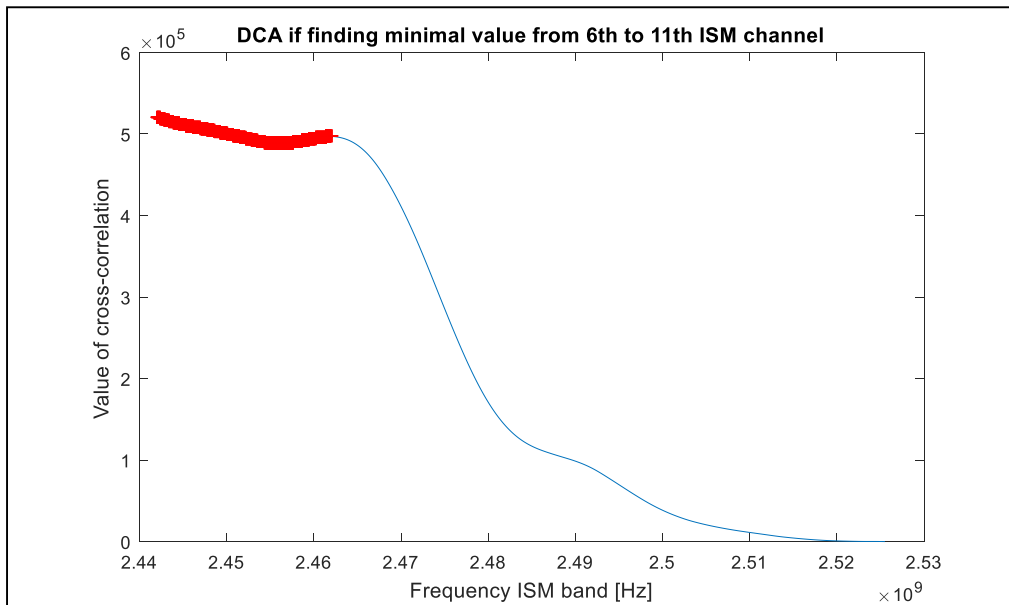
Слика 4.14 - RSSI мапа покривања дијела приземља на ЕТФБЛ



Слика 4.17 - Математички модел утицаја реалне интерференције сусједних канала

На Слици 4.17, бочне лобове спектра густине снага сигнала можемо сматрати као утицај дригух сигнала од осталих WAPs, а чији су сигнали присутни у истом простору. На тој слици је ниво сигнала од 20dBm у стварности ниво од -63dBm, а ниво од 0dBm је у стварности праг (енг. *Threshold*) пријемног сигнала од -83dBm. Појам прага се уводи јер практично нема смисла оптерећивати алгоритам са веома малим вриједностима пријемног сигнала у РФ – мапама (слике 4.13-4.16). На Слици 4.18 је приказан график крос-корелационе функције спектралних густина снага од канала са Слике 4.17. Наведена функција се користи за одређивање на који оптимални Wi-Fi канал треба прећи WAP са SSID=C6 ради минимизирања интерференције сусједних канала (енг. *adjacent channel interference*) приказане на Слици 4.8. Практично, од интереса нам је налажење минимума те функције у опсегу означеном црвеном бојом на истој слици (*црвена боја представља опсег од 6-ог до 11-ог WLAN канала код ISM 2.4GHz опсега*). Наиме, тај опсег је од интереса јер желимо да упоредимо резултате овдје приједложеног DCA алгоритма са стварним дјеловањем DCA алгоритма имплементираниог код посматраног WAP са SSID=C6. У ту сврху, реална интерференција сусједних Wi-Fi канала са Слике 4.17 је математички¹² моделована помоћу крос-корелационе функције спектралних густина снага посматраних Wi-Fi канала, као на Слици 4.18.

¹² *Оправданост математичког модела спектра снаге са Слике 4.17 је практично измјерена и потврђена помоћу мјерне опреме у лабораторији за телекомуникације ЕТФБЛ, а детаљније информације су дате у Прилогу V.*



Слика 4.18 - Вриједности крос-корелације за избор оптималног канала код DCA

На основу Сlike 4.18, процјењујемо да се утицај интерференције сусједних канала, помоћу нашег ProposeDCA, процентуално смањује за:

$$R[\%] = (xcorr(CH6) - xcorr(CH9)) * 100[\%] / xcorr(CH6) = (5,21 - 4,885) * 100 [\%] / 5,21 = 6,2\%.$$

Као доказ за претходно изложено, наводимо покретање предложене функције у command promp-у Matlab-a са:

```
>> ProposeDCA .
```

Након тога, добијени су сљедећи резултати:

```
F_carrierDCA =2.4560e+09 % ово би била оптимална фреквенција носиоца у [Hz]
indChannel =10 % ово је оптималан индекс канала у WLAN ISM 2.4GHz
minDistance_8 =8950000 % ове дистанце тражимо да видимо која је најближа оптимуму
minDistance_7 =13950000 % овдје је највећа дистанца јер је највећа крос-корелација.
minDistance_9 =3950000 % послеје канала 10, је најближе оптимуму редни канал 9.
minDistance_10 =1050000 % ако би користили канал 10. ширина BWch је до 10MHz
minDistance_11 = 6050000
```

Укупно трајање ProposeDCA симулације у Matlab-у R2016a је 1,008 секунди на 64-битном оперативном систему Windows 10 Education @2017 Microsoft Corporation са 64-битним (x64) процесором Intel(R) Core (TM) i5-5200U, CPU@2.20GHz уз RAM=8GB.

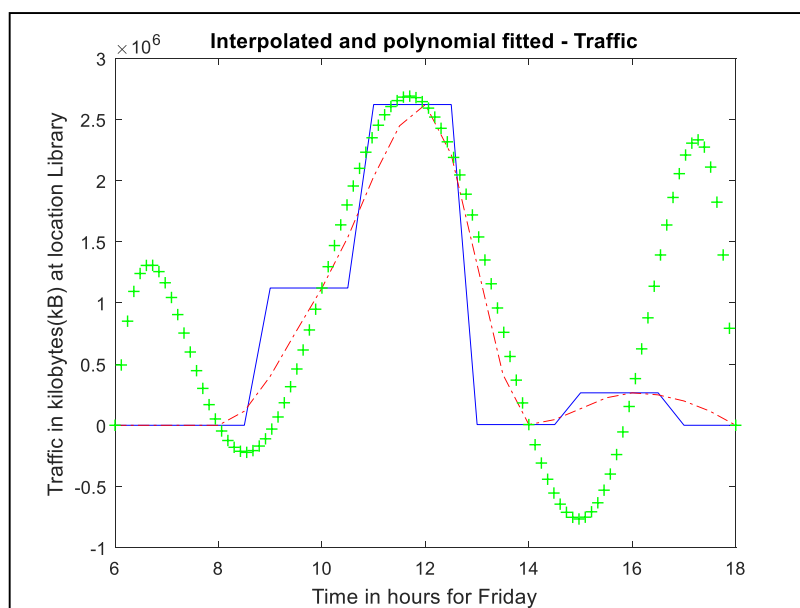
У извршеним мјерењима код разматране WLAN је уочено да WAP SSID = C6 од произвођача “TP-LINK technologies co., LTD”, врши DCA у најмањем временском кораку од 10 секунди, па је занемарљиво трајање извршавања овдје предложеног DCA, а што је један доказ могуће практичне реализације предложеног рјешења за DCA.

Наравно, избор оптималног канала би требало вршити у одређеним временским корацима, а чак би било пожељно да се може адаптирати временски корак у којем се врши DCA што би могли реализовати адаптивном неуралном мрежом, али то остављамо за будућа истраживања. Одређивање ширине (нпр. 20MHz, 40MHz, 80MHz, ...) пропусног опсега посматраног канала врши TCRFFA на основу моделовања саобраћаја, тако да овдје предложени алгоритми чине једну цјелину коју називамо: „Алгоритмом за оптимизацију параметара преноса у IEEE WLANs”, при чему је оптимизација разматрана само по специјалним случајевима смањења каналне интерференције, повећања енергетске ефикасности, побољшања SNR и спектралне ефикасности.

5. TCRFF АЛГОРИТАМ

Одлука, о томе који WAP је потребно укључити, одређена је на основу максимума крос-корелације од снимљених локација клијената и њиховог саобраћаја у току времена, при чему су узете у обзир РФ мапе покривања (слике 4.14-4.16) Wi-Fi сигналом. Наравно, треба водити рачуна и да се преостала територија покривања Wi-Fi сигналом распореди на најмањи број преосталих WAPs. На РФ мапама се уочава да постоји велики број видљивих и различитих WAPs у домету, тако да је велика редувантност и ако би се извршило заједничко управљање са свим тим WAPs (али они припадају различитим власницима) могло би се извршити још квалитетније управљање ресурсима. Међутим, UniFi софтверски систем управља само са факултетском WLAN SSID=*etfbl.net*, али резултати мјерења су показали да и када се посматра само *etfbl.net* WLAN може доћи до значајног унапређења у коришћењу мрежних ресурса и енергетској ефикасности. Алгоритам [24], који је у овом мастер раду изложен, инспирисан је радом познатог **Water Filling** алгоритма у DSL (енг. *Digital Subscriber Line*) технологији, потом радом **Envelope Tracking** и **Doherty** појачавача снаге. Укључивање и искључивање WAPs се одређује на основу крос-корелација површина клијената и РФ мапа покривања које се мијењају у складу са кретањем клијената у мрежи и њиховим промјенљивим потребама за битским брзинама преноса.

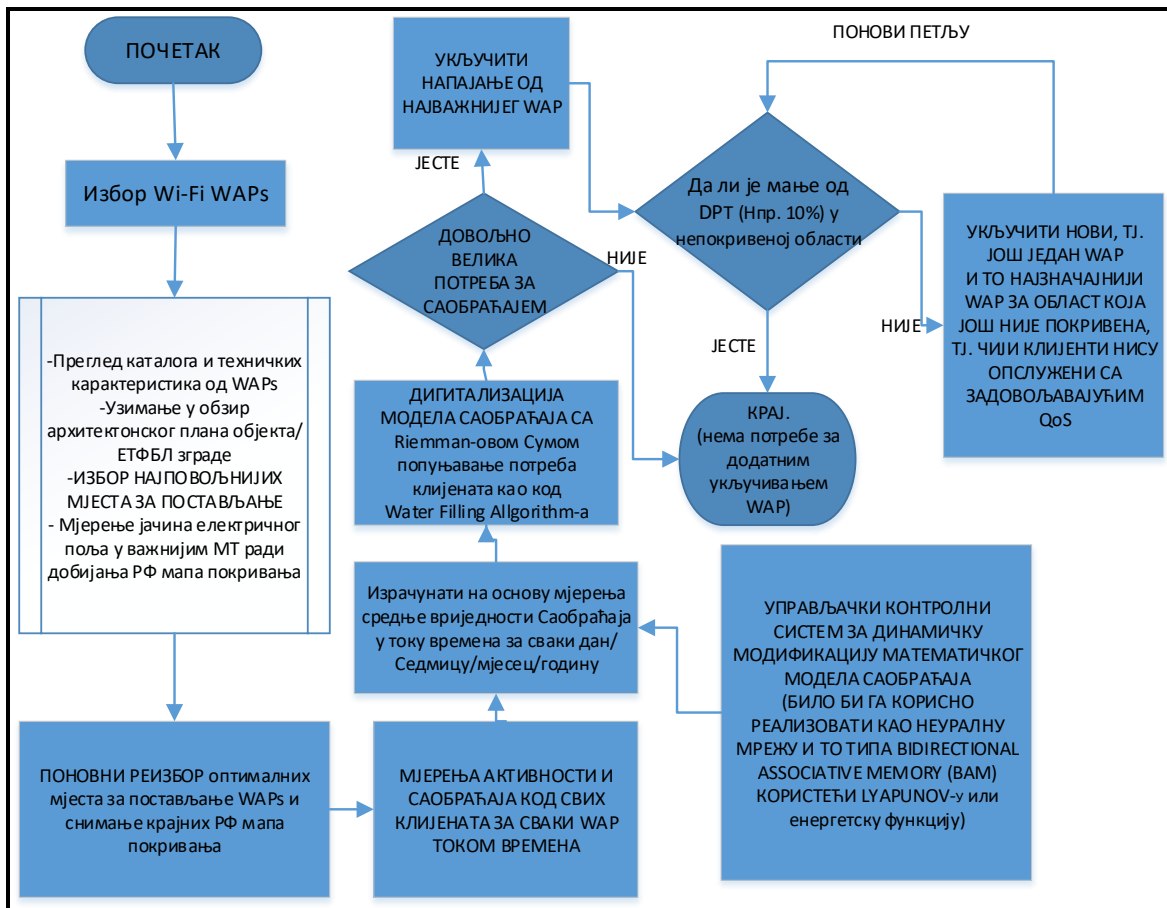
Илустровано на WAP локацији назива *Prizemlje*, представљено је моделовање саобраћаја (Слика 5.1) које је извршено помоћу Matlab-а.



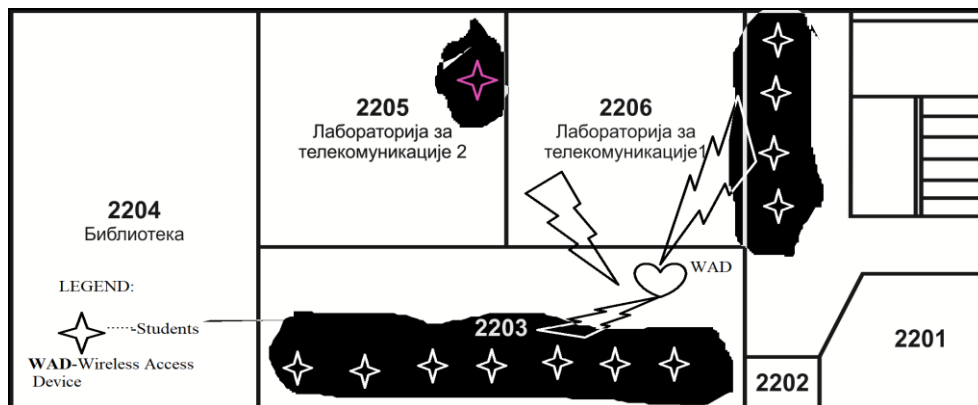
Слика 5.1 - Графичка илустрација математичког модела промене саобраћаја

На Слици 5.1 је приказана графичка зависност саобраћаја у току времена на основу измјерених вриједности за дан петак (слично као у Табеле 4.1 гдје су измјерене вриједности саобраћаја приказане за понедељак, а наравно да смо извршили мјерења за сваки дан у седмици) за локацију *Biblioteka*. При томе, графичка зависност је моделована помоћу интерполације и/или фитовања као анvelopа саобраћаја на сљедеће начине: **црвена линија** – означава примјењену Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial (веома слична Gauss-овој или нормалној расподјели), **плава линија** – означава примјењену Nearest Neighbour Interpolation и **зелена линија** – представља график добијен са 6th degree Polynomial Curve Fitting [24].

Од свих примјењених модела за представљање математичке зависности промјене саобраћаја, показало се да од изложених модела најмању средњеквадратну грешку између моделованих и стварних измјерених вриједности саобраћаја добијамо примјеном Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial. С друге стране, показује се да претходна интерполација даје као излаз полином са веома великим бројем коефицијената и у одређеним ситуацијама може имати и значајне негативне вриједности (које су физички немогуће). У том смислу, оптималан приједлог за избор математичког модела приказан је плавом бојом и представља једноставну интерполацију са најближим сусједом. Ради побољшања овог модела, пожељно је да се изврши мјерење саобраћаја сваких од 15 до 30 минута. Такође, ради валиднијег модела потребно је извршити мјерење саобраћаја и кретања клијената (нпр. распореда студената, распореда наставе, итд.) за сваки дан у току дужег временског интервала од неколико година у циљу да се добију вјеродостојнији резултати и практично кориснији модел за сваки дан појединачно. У том смислу, у будућности бисмо могли креирати неуралну мрежу која би се обучила на основу тих вишегодишњих тренинг скупова који би се добили практичним мјерењима. Напоменимо да није пожељно ни пречесто вршити мјерења, а ни веома ријетко јер у оба случаја долази до или прекомпиковања математичког модела са великим бројем коефицијената интерполирајућег полинома и/или до великих грешки у моделу саобраћаја.

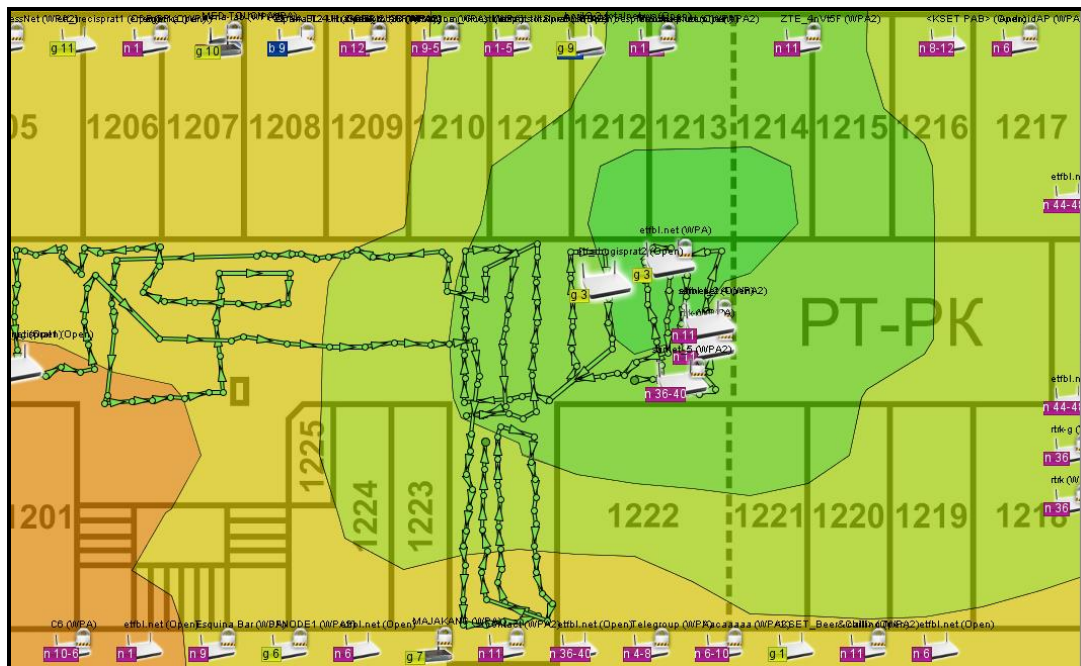


Слика 5.2 - Поједностављени дијаграм тока приједлога побољшаног TCRFF алгоритма



Слика 5.3 - Тлоцрт области Библиотека на 2. спрату ЕТФБЛ нове зграде [24]

На Слици 5.2 је приказан дијаграм тока TCRFFA гдје је приказано да је пожељно обучавање управљачког алгоритма, односно његова реализација у виду нпр. ВAM (енг. *Bidirectional Associative Memory*) неуралне мреже користећи *Lyapunov*-у енергетску функцију. Наведена ВAM имплементација, због своје комплексности, није овдје изложена. О могућностима једне такве релизације је више података доступно у [22-23].

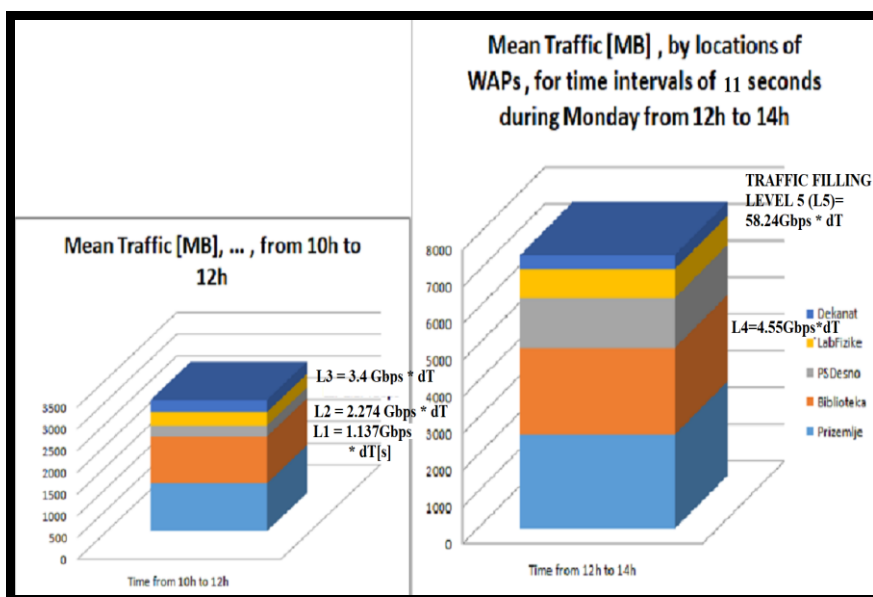


Слика 5.4 - RSSI мапа и тлоурт сусједне области са облашћу на Слици 5.3

Поједностављен дијаграм тока TCRFF алгоритма је приказан на Слици 5.2. Локације значајнијих области клијената (најчешће су то студенти) су приказане црном бојом на Слици 5.3 код WAP (WAD) на локацији SSID=Biblioteka. На Слици 5.4. зелена боја представља квалитетан сигнал ($RSSI > -75dBm$) у тој области простора, а смањење површина некавалитетног пријема сигнала (области жуте и црвене боје) се може извршити погодним избором положаја за инсталацију WAPs на посматраним локацијама.

Принцип рада алгоритама TCRFFA [24], о избору укључења¹³ WAPs/WADs, се може илустровати на примјеру једног дана, као на Слици 5.5.

¹³ Реализација управљачке функције би могла бити на основу базног математичког модела рада перцептрона чији би излазни сигнал укључивао или искључивао напајање одговарајућих WAPs [23]. Ради практично вјеродостојнијих резултата - требало би извршити и вишегодишње (пратити саобраћај за сваки дан у години) обучавање излазне функције перцептрона, односно начина на који би требало мјењати тежинске коефицијенте који одређују излазни управљачки сигнал у таквом приједлогу имплементације неуралне мреже [22-23].



Слика 5.5 - Илустрација рада TCRFFA

На Слици 5.5 су са: L1, L2, L3, L4 и L5 представљени нивои саобраћаја. Капацитет саобраћаја једног WAP (WAD) представља L1 (*Traffic/Water Filling Level No. 1*) и у идеалном случају је максимално једнак:¹⁴

$$L1 = T_{WADI}^{CAPACITY} = (450 + 687) [\text{Mbps}] \times dT [\text{s}],$$

а ако су сви исти WAPs, онда је: L2=2×L1, ..., L5=5×L1. Надаље, сматрамо да је dT константан интервал временског усредњавања саобраћаја и да износи $dT=11$ секунди.

Једна варијанта TCRFFA се може дефинисати на следећи начин:

Опис алгоритама: **TCRFFA** [24]

1. Снимити RF мапе покривања сигналом од сваког WAP.
2. Поједноставити тродимензионални случај РФ–мапа покривања у дводимензионални случај, тако што посматрамо RSSI мапу само на висини студентског стола.
3. Снимити и одредити мјеста клијената (учионице, радни столови, итд.), гдје се налазе студенти (*већински клијенти*) у току времена, као на Слици 5.3 гдје су таква мјеста осјенчена црном бојом.
4. Измјерити саобраћај ($T_{WAP_1}, T_{WAP_2}, \dots, T_{WAP_n}$) за сваки WAP и одредити Total Traffic (T_T).

¹⁴Реално, физички реализабилне брзине преноса су увијек за око 10%-20% мање од брзина на слоју 2 OSI – модела, а пошто је код неких излаз према switch-у преко UTP CAT5е кабла те брзине неће прећи ни 100Mbps, али код неких WAPs је обезбјеђен и излазни проток до 1000Mb/s. Горње формуле само објашњавају суштину рада алгоритама.

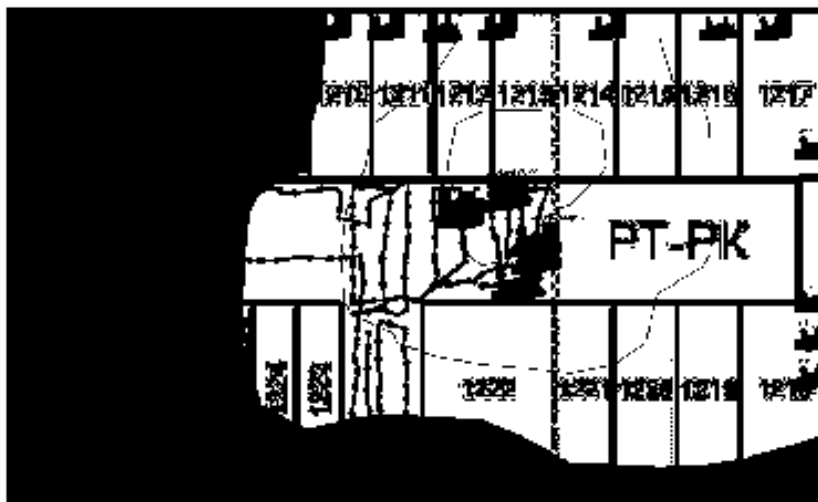
5. Пронаћи пресеке (представљене као површине) од токова Traffics' Flow и Clients' Flow области.
6. Пронаћи нове пресеке површина са РФ мапама покривања од сваког појединачног WAP.
7. Израчунати $T_T^{8^h-10^h} \equiv \sum_{k=1}^N T_{WAP_k}^{8^h-10^h}$, гдје је T_{WAP_k} саобраћај од k -тог WAP и N -укупан број WAPs у WLAN.
8. Одредити да се укључи WAP (означен у даљњем са WAP1) који опслужује највећи проценат (односно површину) од $T_T^{8^h-10^h}$ (јачина сигнала одређује DiffServ QoS), при чему је преостала површина пресека (корисника и РФ мапа) опслужљива са минималним бројем преосталих WAPs.
9. Означимо максимум површине области саобраћаја (енг. Traffic Area), која се може опслужити са WAP1, као $T_{WAP1}^{8^h-10^h}$, гдје је $T_{WAP1}^{8^h-10^h} \leq T_{WAP1}^{CAPACITY} = 1.137[\text{Gbps}] \times dT[s]$.
10. Ако је $T_{WAP1}^{8^h-10^h} > T_{WAP1}^{CAPACITY}$, онда одбацити области које може опслужити WAP1 са слабијим нивоом RSSI (нпр. жута и црвена боја области код РФ – мапа), уколико су те области (површине код РФ мапа) у домету другог WAP са већим RSSI.
11. Израчунати остатак укупне површине која није опслужена са покривањем укључених WAPs:

$$T_{RESIDUM}^{8^h-10^h} = T_T^{8^h-10^h} \setminus T_{WAP1}^{8^h-10^h} = T_T^{8^h-10^h} - T_{WAP1}^{8^h-10^h}.$$

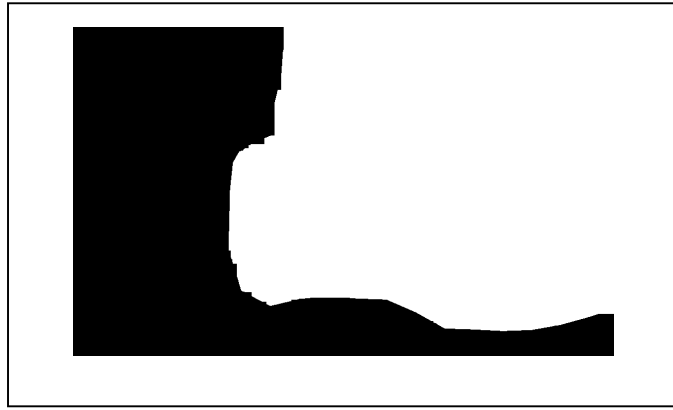
12. Ако је $T_{RESIDUM}^{8^h-10^h} \leq DP_T \times T_T^{8^h-10^h} \Rightarrow \text{END}$, гдје DP_T означава Discard Percent Threshold (mj. проценат од укупне површине која се може занемарити у покривању сигналом, нпр. ако је занемарљиво 10% од укупне површине – коју називамо укупни саобраћај -Total Traffic, тада је: $DP_T = 0.1$)
13. У супротном пронаћи нови WAP, који треба укључити и означимо га са WAP2. Овај WAP има највећи проценат у покривању преостале површине, тј. $T_{RESIDUM}^{8^h-10^h}$ (и означимо његово покривање у површини са $T_{WAP2}^{8^h-10^h}$) и поново урадимо исто као у кораку под 9. и 10.
Провјерити да ли је: $T_{WAP2}^{8^h-10^h} \leq T_{WAP2}^{CAPACITY}$.
14. Израчунати $T_{RESIDUM_2}^{8^h-10^h} = T_T^{8^h-10^h} \setminus (T_{WAP1}^{8^h-10^h} \cup T_{WAP2}^{8^h-10^h})$
15. Ако је: $T_{RESIDUM_2}^{8^h-10^h} \leq DP_T \times T_T^{8^h-10^h} \Rightarrow \text{END}$.
16. У супротном се вратити на **корак 6.** да се пронађе WAP3 и наставити све док се не пронађе WAPj, $1 \leq j \leq N$, тако да је **корак 15.** задовољен са: $T_{RESIDUM_j}^{8^h-10^h} = T_T^{8^h-10^h} \setminus \left(\bigcup_{k=1}^j T_{WAP_k}^{8^h-10^h} \right) \Rightarrow \text{END}$.

За имплементацију претходног алгоритма се могу користити **FOR** петље, и то: једна **FOR** петља за пролазак кроз WAPs и друга за пролазак кроз све могуће РФ мапе покривања од сваког WAP-а, при чему се рачунају потребе за ресурсима мреже примјеном математичких операција уније, разлике и пресјека површина области које одговарају току односно промјенама саобраћаја (енг. *Traffic Flow*), току/промјени површина које заузимају клијенти (енг. *Subscribers' Flow*) (*клијенти могу имати различите приоритете*) и *RF RSSI* мапама покривања, а које се могу израчунати са функцијама у **Image Processing Toolbox**-у **Matlab**-а. Наиме, Matlab–ов оператор за реализацију пресјека двије бинарне слике **A** и **B** је логичка **AND** операција, тј. у Matlab–у напишемо **A & B**. За реализацију уније површина у Matlab–у користимо **A | B**, тј. логичку **OR** операцију, а за комплемент површине **A** користимо логичку негацију, тј. у Matlab–у је $\sim A$, док разлику површине **A** и површине **B** у Matlab–у рачунамо као **A & ~B**. За одређивање конкретних површина користимо Matlab–ову операцију за претварање слике у боји (**A**) у црно-бијелу (*тј. логичку*) слику **BW** (енг. *Black and White*) примјеном морфолошких операција и на основу вриједности боја у РФ-мапи (*Слика 5.4*) гдје зеленијој боји одговара бољи QoS јер је већи RSSI (*од -40dBm до -55dBm је тамно зелена боја на РФ мапи код Слика 5.4*), а жуте и црвене области на РФ-мапи показују (*веома мали RSSI, испод -83dBm*) гдје није задовољавајући QoS.

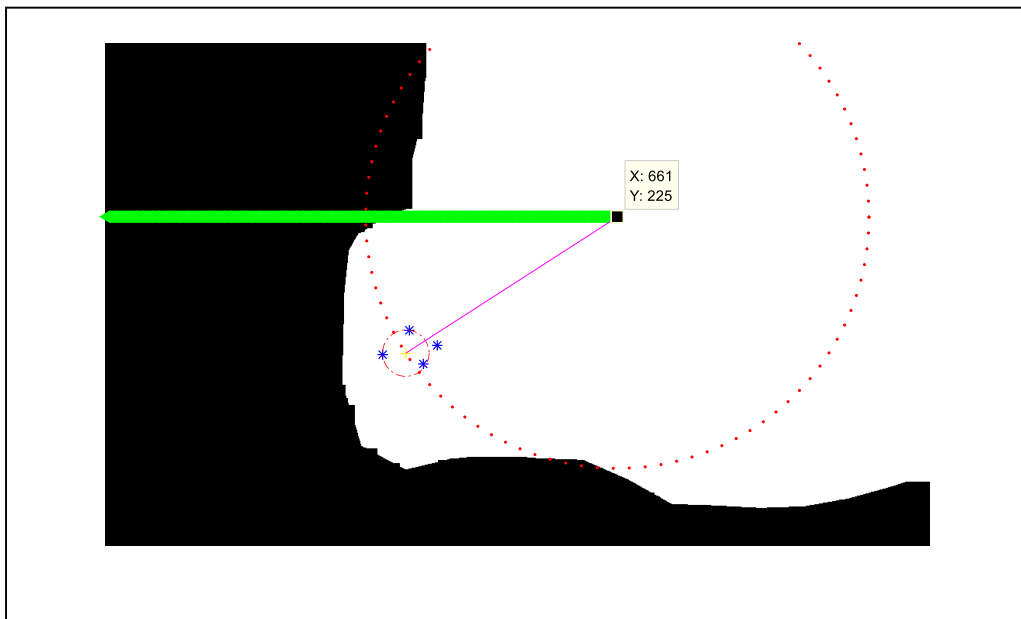
Реализација појединачних корака код TCRFFA је имплементирана помоћу морфолошких операција у Matlab–у, а на основу знања из дигиталне обраде сигнала и слике са основног циклуса студија. Прво учитамо *RSSI* мапу за одређену област, која је снимљена помоћу софтвера EkaHau Heatmaper, те употребом функције **LocationInWiFi.m** (*листинг функције је дат у Прилогу II*), добијамо као излаз резултате приказане на сликама 5.6 – 5.11.



Слика 5.6 - Област са бијелом бојом је са већим RSSI, односно задовољавајућим QoS



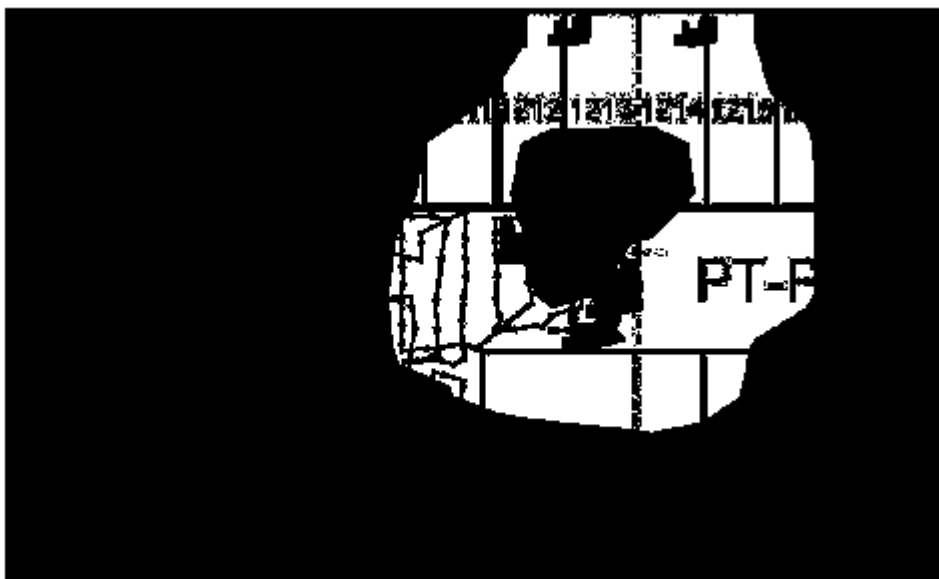
Слика 5.7 - *BW* област добијена морфолошком операцијом *imclose* над Сlikом 5.6



Слика 5.8 - Лоцирање групе клијената од *WAP* ради одређивања угла *beamforming-a*



Слика 5.9 - Област са најбољим подржаним *QoS* је означена бијелом бојом



Слика 5.10 - Област са средњим QoS у облику прстена бијеле боје



Слика 5.11 - RSSI области са diffServ QoS

На Слици 5.10 је приказана бијела област на 2. спрату ЕТФБЛ са нивом $RSSI$ између -55dBm и -64dBm , док је на Слици 5.9 дата област углавном бијеле боје, лоцирана у средини мјеста гдје је постављен WAP и код које је $-55[\text{dBm}] \leq RSSI \leq -40[\text{dBm}]$. На Слици 5.11 је $-72[\text{dBm}] \leq RSSI \leq -64[\text{dBm}]$. У тој посљедњој $RSSI$ области је најслабији дозвољени ниво QoS који има практичног смисла у пријему од стране крајњих клијената код једног WAP на 2. спрату ЕТФБЛ.

На основу претходно изложеног, запажа се проблем одређивања локације клијената, али то се релативно лако ријешава на основу мјерења времена (*постоје за ту сврху намијењена поља у пакетима*) преноса пакета између WAP и клијената, те мијењањем угла beamforming-а при чему шаљемо у пакету вриједност угла и вриједност емитоване снаге, а пријемник врати WAP-у тај пакет уз додато поље које садржи *RSSI* вриједност.

У [25] је наведена могућност локације WLAN клијента с прецизношћу од 40cm, а у те сврхе се могу примјенити знања стечена на другом циклусу из [26].

Нумеричком примјеном произлази, као оптимално рјешење, да у току конкретног¹⁵ понедјељка буде укључен један WAP уређај (*на локацији Biblioteka*) у периоду од 8:00^h до 9:00^h, а од 9:00^h до 9:30^h би требало да буду два WAP укључена (*локације Biblioteka и Prizemlje*), од 9:30^h – 14:00^h би требало да свих 5 WAP уређаја буду укључени, док од 14:00^h до 15:00^h би довољно било да буде укључен WAP на локацији *LabFizike*, а од 15:00^h до 16:00^h треба још укључити и WAD на локацији *Biblioteka* [24]. Тако би требали радити до 17:00^h, а после тога се може искључити WAD на локацији *LabFizike*, а после 18:00^h се углавном може искључити и WAD на локацији *Biblioteka* и да сви тако остану искључени до сљедећег радног дана до 08:00^h. Наравно, за сваки радни дан је другачија оптимална шема управљања.

Потом, у току једног дана (T_{24h}), ако се управљање напајањем врши сваких $\Delta T = 30$ минута, може се израчунати укупна (*при томе је овдје занемарено вријеме потребно за укључење или искључење појединог WAP које је мјерењем одређено да износи око 22 - 30 секунди*) количина електричне енергије ($E_{T_{24h}}^S$) потрошена на напајање WADs у мрежи као:

$$E_{T_{24h}}^S = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M E_k^{WAD}(i\Delta T) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^M P_k^{WAD} \times \Delta T. \quad (5.1)$$

Примјеном (5.1) се показало да је могуће остварити уштеду од чак:

¹⁵ Ради оптимизације треба извршити адаптацију тежинских коефицијената управљачке неуралне мреже за сваки дан понаособ, а за шта нам треба и већи сет измјерених вриједности за обучавање мреже, а по стеченим знањима требало би вршити мјерења у временском интервалу од минимално 4 године за добијање практично кориснијих резултата и приједлога имплементације управљачке мреже.

$E_{T_{24h}}^S [\text{kWh}] = \frac{1}{1000} (8 \times 6.5\text{W} \times 1\text{h} + 5 \times 6.5\text{W} \times 4.5\text{h})$, односно $E_{T_{24h}}^S = 0,1980\text{kWh}$ (да су сви укључени WAPs имали би $E_{T_{24h}}^S = 0.780\text{kWh}$, а што значи процентуалну уштеду од 74%¹⁶ у односу на тренутну потрошњу).

Поређењем овдје остварене ефикасности са вриједностима наведеним у уводу, произлази релативно задовољавајући резултат примјене предложеног алгоритма. Ово је посебно важно у циљу примјене истог код батеријски напајаних сензорских мрежа или Wi-Fi уређаја уз комбинацију са Passive Wi-Fi технологијом која може додатно смањити чак до 1000 пута емитовану снагу РФ зрачења [25].

¹⁶ У одређеним ситуацијама није могуће постићи уштеду, а понекад (нпр. када су нерадни дани или преко ноћи) је могуће и у потпуности искључити WAPs из напајања тако да је процентуална уштеда могућа од 0% до 100% на дневном нивоу. Овдје требамо посебно нагласити да искључивањем појединог WAP из мреже настаје „тзв. рупа“ у покривању те територије. Ако би се тада конектовао неки нови клијент, онда би WAP морао повећати свој ниво РФ снаге зрачења, али при чему је веома важно да искључењем појединих WAPs који су неактивни можемо значајно смањити интерференцију између сусједних WAPs и повећати спектралну ефикасност искоришћења могућих РФ канала.

6. ПАМЕТНЕ WLAN АНТЕНЕ

У циљу избора оптималних WAPs за инсталацију и оптимизацију WLAN на ЕТФБЛ треба имати на уму да WAPs са тзв. паметним антенама имају значајне предности у повећању покривања сигналом и истовременим смањењем интерференције у односу на друге водеће свјетске WAPs произвођаче који не подржавају паметне WLAN антене. Опис дизајнирања и фабриковања паметних WLAN антена је детаљно обрађен [27-28]. Паметне¹⁷ антене не треба мијешати само са *beamforming*-ом и у наставку су изложене основе рада таквих антена и представљамо један конкретан примјер софтверске имплементације паметне WLAN антене која ради у опсегу 2,4GHz. Такође, имплементирана анализирана је хардверска имплементација у WLAN 2,4GHz и 5GHz опсегу, реализована помоћу софтверског алата AntSyn [29]. Резултати симулација помоћу AntSyn нису наведени јер нам по њиховој едукационој лиценци то није дозвољено. Углавном, добијени резултати у симулатору AntSyn су потврдили теоријска разматрања изложена у наставку овог поглавља.

Напредни антенски систем се може направити помоћу више антенских елемената који се напајају са сигнаlima различитих фаза (*могу се мјењати и амплитуде, али су фазе много значајније*) и тако могу генерисати, тј. направити максимуме или нуле (*односно, потпуно поништење*) на одређеним мјестима у дијаграму зрачења читавог таквог антенског система [30-31]. Ова особина се користи да се појача сигнал у жељеном смјеру, те оствари значајно слабљење у нежељеним смјеровима уз истовремено смањење интерференције.

У циљу конкретне имплементације паметне WLAN антене, предложена је функција **AntenskiSistem7.m** која одређује потребне фазе од седам антенских елемената сачињених од полуталасних дипола који се налазе постављени у истом правцу на међусобном растојању од половине таласне дужине електромагнетских таласа које антенски систем емитује.

¹⁷Антене нису саме по себи паметне (енг. *smart*), већ то чини управљачка логика (софтвери и алгоритми). Иначе, паметне антене се још називају:

„Систем антенског низа (енг. *Antenna Array System -AAS*), Напредни антенски систем (енг. *Advanced Antenna System - AAS*)“ или „Систем адаптивног антенског управљања (енг. *Adaptive Antenna Steering - AAS*)“, тј. формирања усмјереног РФ-зрачења под одређеним углом у дијаграму антене (енг. *beamforming*).

У истој функцији, израз за интензитет (P_{zr}) Поинтинговог¹⁸ вектора конкретног паметног WLAN антенског система је

$$P_{zr}(r, \alpha, K, \alpha_0) = \left| \vec{E} \times \vec{H}^* \right| = \frac{I_m^2}{4\pi r^2} \cdot \left| \frac{\cos \frac{\pi}{2} \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin(\alpha - \alpha_0)} \right|^2 \cdot \left| \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} K \cos(\alpha - \alpha_0)\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{2} \cos(\alpha - \alpha_0)\right)} \right|^2. \quad (6.1)$$

У (6.1) су: I_m – ефективна вриједност струје у максимуму стојећег таласа једног антенског елемента (овдје је полуталасни дипол антенски елемент), r – је растојање удаљене тачке гдје се налази клијент у односу на центар антенског елемента, K – број антенских елемента у антенском систему, α_0 – угао под којим се жели усмјерити зрачење антенског система, а α – произвољни угао¹⁹ у односу на осу у којој су постављени антенски елементи.

За реализацију функције **AntenskiSistem7.m**, значајно је допријело знање стечено из [30-31].

Позивом претходне функције, у Matlab-овој командној линији, са:

```
>> faze=AntenskiSistem7(6, 2400000000, pi/6);
```

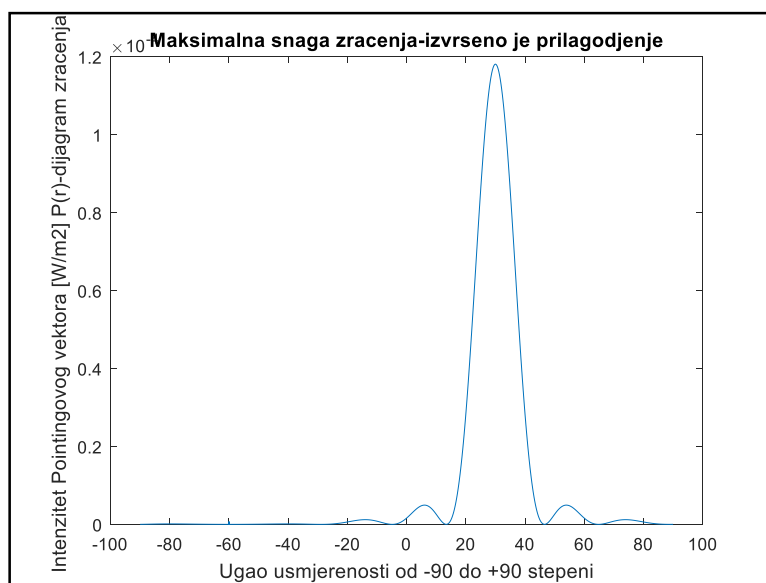
добивамо као излаз функције вектор **faze** =[0 0.0541 0.1082 0.1623 0.2164 0.2704 0.3245] који представља фазне разлике простопериодичних сигнала који побуђују седам појединачних антенских елемената. Фаза простопериодичног сигнала једног од антенских елемената се може узети као произвољна, нпр. фаза првог елемента је овдје проглашена као 0[rad], али је онда фазна разлика између 2. и 1. антенског елемента 0,0541[rad] и та фазна разлика између сусједних елемената је увијек 0,0541[rad]. Иначе, тачан износ вриједности фазне разлике зависи од таласне дужине, дужине антенских елемената и угла усмјерења. У позиву претходне функције као аргументи позива функције се редом наводе радијално растојање (*6 метара*) на којем је клијент у односу на WAP, радна фреквенција изражена у херцима (*2.4GHz*) и посљедњи аргумент је угао (*pi/6*) под којим се врши усмјеравање главног снопа зрачења антене и који је изражен у [rad].

¹⁸John Henry Royniting (1852-1914), је био енглески професор физике на Mason научном колеџу, Универзитет у Бирмингему.

¹⁹Угао α се често означава и са θ , а у неким литературама и са ψ .

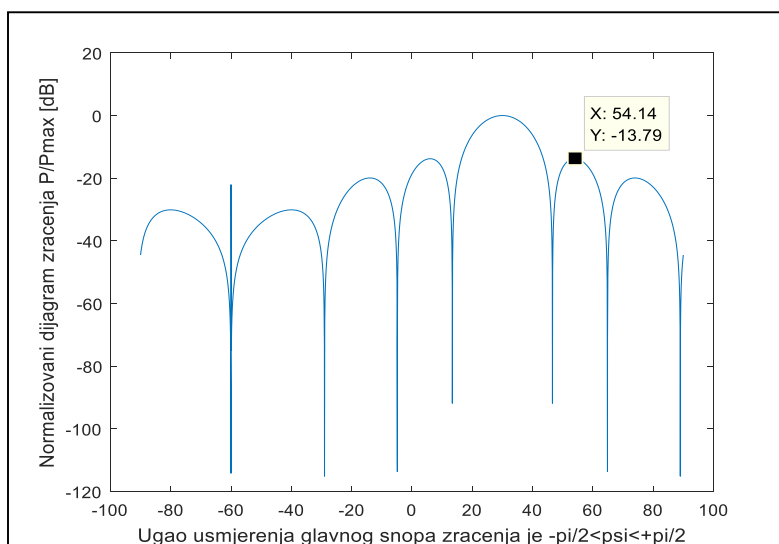
Након претходног извршавања *AntenskiSistem7.m*, на Слици 6.1 је представљена вриједност добијеног интензитета Поинтинговог вектора зрачења на растојању $r=6m$ када су клијенти и WAP у слободном простору без препрека. Максимална вриједност површинске густине снаге зрачења има вриједност од $1,18 \times 10^{-4} W/m^2$ при углу усмјерености од 30^0 јер је задат као улазни аргумент тај угао beamforming-а при коме треба остварити максимум снаге зрачења, а што је корисно за примјену *AoA* (енг. *Angle of Arrival*) локације клијената. Вриједност примљене снаге на мјесту клијента зависи од конкретне вриједности ефективне површине антене код пријемника (*што опет зависи од добитка те антене и таласне дужине електромагнетских таласа*).

Нормализовани дијаграм зрачења ове антене је приказан на Слици 6.2, гдје се види да максимум зрачења главног снопа износи 0dB при углу усмјерења од 30^0 . Такође, видимо да је потискивање најизраженијег ($\alpha=54,14^0$) бочног лоба више од 13dB у односу на максимум главног снопа зрачења. То нам је важно јер на тај начин повећавамо однос SNR, а што омогућава и веће брзине преноса података примјеном просторног мултиплексирања.



Слика 6.1 - Зависност површинске густине снаге зрачења од угла усмјерења

Листинг функције *AntenskiSistem7.m*, уз детаљне коментаре како се дошло до петходно наведених израза, су дати у Прилогу II.



Слика 6.2 - Нормализовани дијаграм зрачења конкретне паметне WLAN антене

На Слици 6.2 је приказан дијаграм зрачења у функцији угла *beamforming-a* за паметну WLAN антену који смо математички моделовали и извршили симулацију у Matlab-у R2016a. У оквиру уграђених Matlab-ових примјера (енг. *WLAN System Toolbox Examples*), налази се веома користан примјер под називом *802.11ac™ Transmit Beamforming*. У том примјеру је софтверски имплементиран стварни утицај употребе *beamforming-a* на повећање SNR. Симулацијама је долазило до смањења ефективне вриједности вектора грешке (енг. *Error Vector Magnitude – EVM²⁰*) за око 5% до 7%, а максимална вриједност EVM је смањивана за више од 30% у односу на случај када се користи просторно проширење преноса, тј. у конкретном случају 4×2 MIMO пренос. Потом, у наведеном Matlab-овом примјеру, начињене су модификације у овом мастер раду ради симулације 8×4 MIMO WLAN преноса који је у данашње вријеме практично могућ и веома актуелан. У спецификацијама новог стандарда [32] постоји опција да се подржи у будућности 16×16 MIMO, као и до 16 антена за тзв. (енг. *sounding*) који у овим мрежама означава *beamforming*. Начињене модификације ради симулације преноса су приказане у Табели 6.2.

²⁰ Детаљним симулацијама у Matlab-у показала се да би било пожељно извршити сопствено математичко моделовање промјене EVM у зависности од SNR и промјена реда примјењене модулације M-QAM, али је та анализа остављена за будуће радове и истраживања како не би преоптеретили оvdје разматрани проблем. Наиме, у ту сврху је потребно погледати изложену анализу EVM која је предложена у Прилогу III.

Табела 6.1 - Конфигурација за симулацију 8×4 MIMO преноса

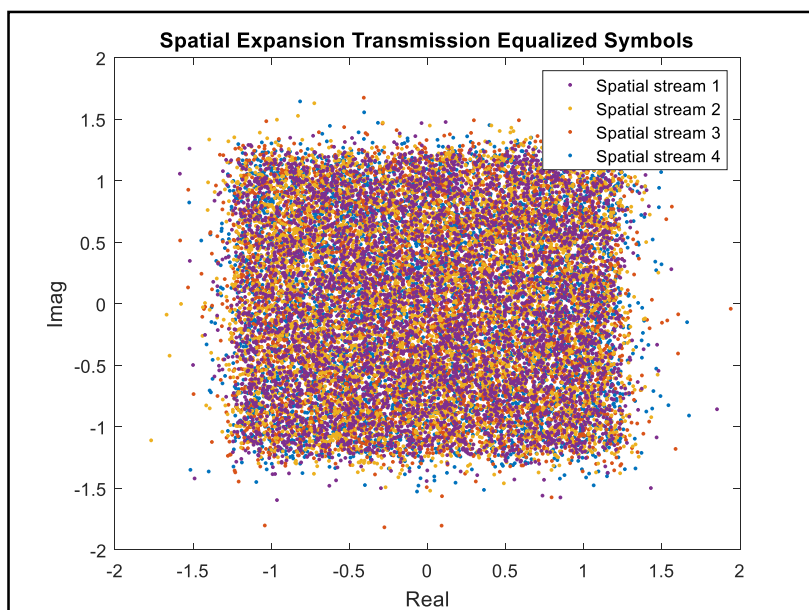
Ознака параметра	Опис параметра	Вриједност параметра
NumTxAnts	број предајних антена	8
NumSTS	број просторних временских стримова преноса	4
NumRxAnts	број пријемних антена	4
cfgVHT.ChannelBandwidth	ширина Wi-Fi канала	160MHz
cfgVHT.APEPLength	величина APPEP у бајтовима	16384
cfgVHT.MCS	512-QAM и кодни број 3/4	9
tgac.DelayProfile	модел пропагационог канала са урачунатим Доплеровим ефектом	Model-E
tgac.TransmitReceiveDistance	удаљеност клијента од WAP	15 метара

Осим вриједности из Табеле 6.1, остале вриједности Matlab-овог симулационог примјера/модела нису мијењане. Након покретања симулације преноса 802.11ac са MIMO и beamforming-ом, добијају се резултати као на сликама 6.3 – 6.4. Запажа се смањење ефективне (RMS) и максималне вриједности EVM по просторном стриму података, на основу сљедећих резултата симулације из Табеле 6.2.

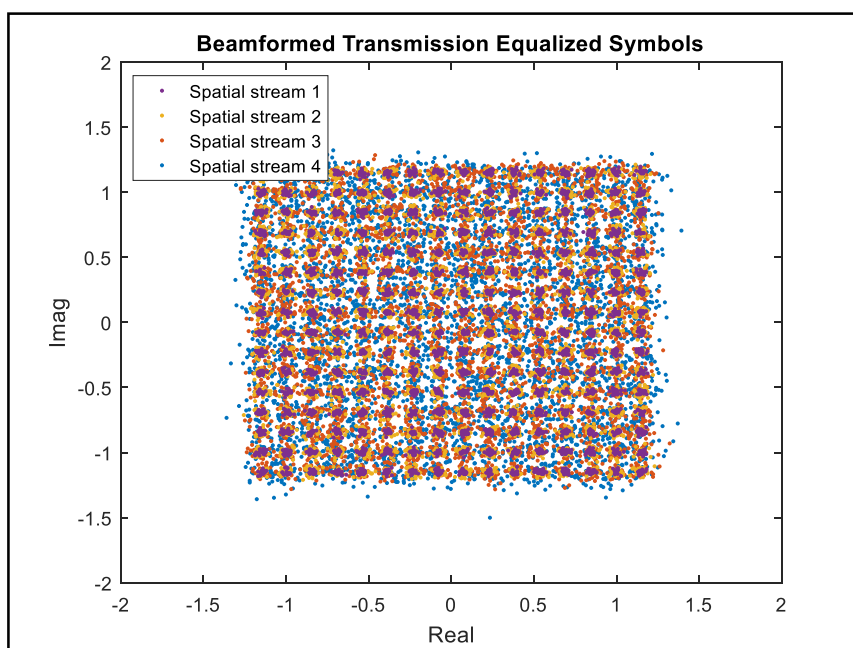
Табела 6.2 - Поређење EVM код MIMO и beamforming IEEE 802.11 WLAN

Редни број просторног стрима	EVM _{RMS} (MIMO)	Максимална вриједност EVM (MIMO)	EVM _{RMS} (beamforming)	Максимална вриједност EVM (beamforming)	EVM _{RMS} (beamforming) EVM _{RMS} (MIMO)
1. стрим	7,2%	70,9%	1,8%	5,8%	1,4%
2. стрим	7,5%	122,7%	3,2%	10,7%	4,3%
3. стрим	7,7%	80,0%	4,9%	18,4%	1,8%
4. стрим	7,5%	52,8%	6,3%	34,9%	1,2%

На основу Табеле 6.2 слиједи закључак о значајном смањењу EVM употребом beamforming-а у односу на MIMO. Дакле, најбољи резултати се остварују када би била могућа истовремена употреба MIMO и beamforming-а, а за ту реализацију је потребан велики број антенских елемената. Због тога што могу знатно повећати SNR према крајњим клијентима, односно смањити EVM и омогућити знатно веће протоке у будућим 5G и IEEE WLAN, у 6. поглављу је предложена једна хардверска и софтверска имплементација паметне WLAN базиране на beamforming-у.



Слика 6.3 - Констелациони дијаграм код 512-QAM при IEEE 802.11 преносу коришћењем 8×4 MIMO уз укључен утицај Доплеровог ефекта са 'Model-E' каналом у Matlab-у



Слика 6.4 - Констелациони дијаграм при 512-QAM преносу када се користи beamforming

Са Сlike 6.4 се запажа повећање Еуклидове дистанце, односно смањење EVM при 512-QAM преносу када се употребљава beamforming. Да не бисмо овдје оптеретили основну разматрану тематску област која је везана за предложене алгоритме, у Прилогу III дат је приједлог начина за извођење зависности између EVM и реда примјењене M-QAM који ће бити од користи за потенцијални будући научно-истраживачки рад у овој области.

7. ЗАКЉУЧАК

Представљена два приједлога алгоритама (*DCA* и *TCRFFA*) се могу схватити као јединствени „Приједлог алгоритама који има за циљ разматрану оптимизацију преноса у *IEEE 802.11 WLANs*“. Предложена је и динамичка контрола снаге емитовања употребом приједлога софтверске имплементације *beamforming*-а и додатним могућностима просторног диверзитија употребом истих паметних *WLAN* антена. Изложена тематика у овом мастер раду је доста широка, те у сврху рјешавања тих тематских проблема, изложена су размишљања с циљем рјешења тих проблема, а базирана на приједлогу *DCA* и *TCRFFA* које би било пожељно у будућим истраживањима детаљније дорадити.

У том смислу, што се тиче предложеног *DCA* алгорита, у будућем истраживачком раду би било погодно извршити поређење оvdје предложеног *DCA* са радом *DMU-Access* [32] за којег аутори наводе да врши динамичку додјелу подносилаца. Такође, предложени *DCA* се може проширити да узима у обзир динамичку додјелу подносилаца. Потом, ради примјене у сензорским мрежама је пожељно да можемо мјерити²¹ и спектар од других (*Bluetooth*, *ZigBee*, ...) бежичних технологија у *ISM 2.4GHz* опсегу [33]. Тада је потребно рачунати укупну крос-корелацију спектра свих присутних канала од значаја, а пошто се користи *TDMA&CA* у сваком од временских слотова потребно је одредити и оптималан канал за сваког од клијената понаособ што може бити веома изазовно за практичну имплементацију.

У резултатима симулације, предложени *DCA* је показао да може остварити за око 6,2% смањење утицаја сусједне каналске интерференције која је естимирана смањењем крос-корелационе функције *PSD* од истовремено присутних *Wi-Fi* канала код клијента. Затим, предложени *TCRFFA* је показао да може обезбиједити значајно повећање енергетске ефикасности реда 74% у једном дану, при чему тај резултат треба узети са резервом (*то измјерено повећање енергетске ефикасности у одређеним данима је могуће за само неколико процената, а у неким другим дневним интервалима је могуће остварити више од 80% повећања енергетске ефикасности у раду*) и потребно је извршити знатно више мјерења ради практично кориснијих резултата. Смисао разматраних алгоритама и рјешења, првенствено се односи на могућност будућих побољшања и примјене у *5G* мобилним мрежама и све актуелнијим сензорским и *IoT*

²¹ За детаље, пожељно је погледати мјерења изложена у Прилогу V.

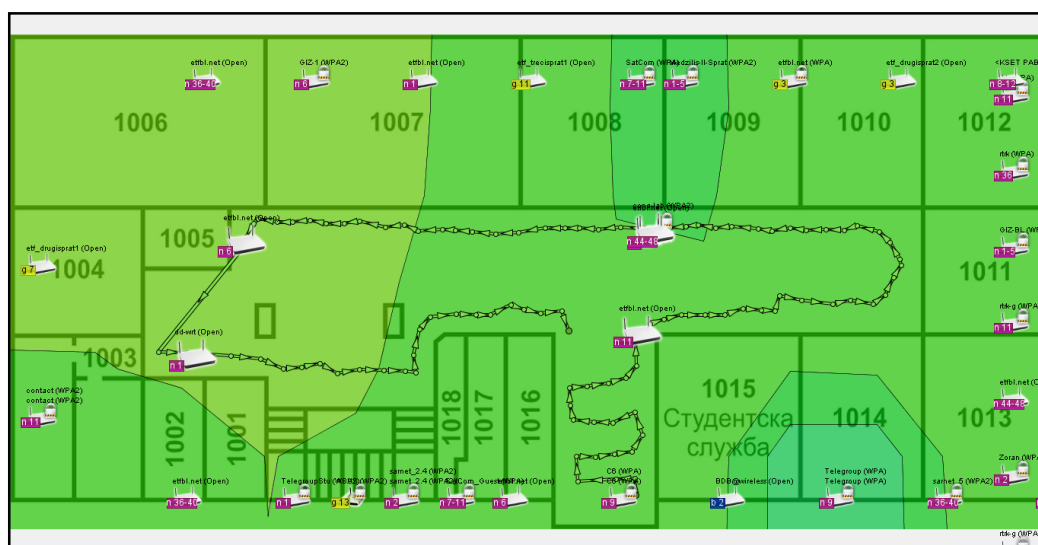
рјешењима [36-37], док је овдје само извршена експериментална анализа на примјеру доступне WLAN са ЕТФБЛ.

Смисао разматраних алгоритама и рјешења, првенствено се односи на могућност будућих побољшања и примјене у 5G мобилним мрежама и све актуелнијим сензорским и IoT рјешењима [36-37], док је овдје само извршена експериментална анализа на примјеру доступне WLAN са ЕТФБЛ.

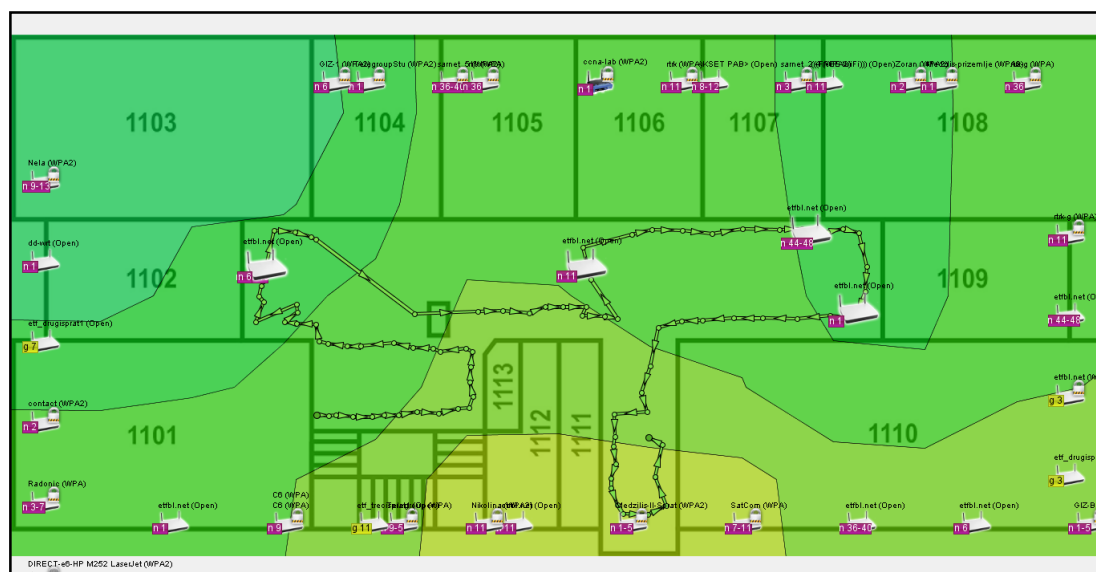
8. ПРИЛОГ

I ВАЖНИЈЕ РФ МАПЕ ПОКРИВАЊА WI-FI СИГНАЛОМ

На Слици 8.1 је минимални ниво пријемног сигнала око -56dBm (у одређеним критичним тачкама минимум је до -62dBm) што у потпуности испуњава услове за минималним вриједностима $RSSI$ које су дефинисане у поставци задатка овог мастер рада. Потом, са Сlike 8.2 се види да су и на 1. спрату ЕТФБЛ испуњени у потпуности услови за квалитетним преносом јер је мали дио простора (жута боја) са малим нивоом $RSSI$.



Слика 8.1 - РФ мапа покривања за стару зграду ЕТФБЛ – Приземље



Слика 8.2 - РФ мапа покривености Wi-Fi сигналом на 1. спрату ЕТФБЛ

II ВАЖНИЈЕ ФУНКЦИЈЕ ИМПЛЕМЕНТИРАНЕ У МАТЛАБ-У

Листинг функције: **Oblast_RSSI_QoS.m**

```
function [A,B,C,D]=Oblast_RSSI_QoS(RBG_map)
%%
%Аутор: Boris Malcic
%%
% RBG_RSSI_map - је улазна слика у боји (formata rgb) која представља
% снимљену мапу покривања RSSI са Ekahau Heatmapper програмом
% A,B,C,D - су излазне логичке слике "BW-black and white" које су тамне/крне
% (вриједност пиксела 0)
% гдје је простор RSSI сигнала нездовољјавajući, а бијела (1) гдје је RSSI
% задовољјавajući
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
S=size(RBG_map);
A=zeros(S(1),S(2));% 1.oblast najveceg nivoa RSSI, tj. najbolji QoS-Quality of
% Service
B=A;% 2. oblast RSSI, Slabiji QoS se garantuje
C=A;% 3. oblast QoS, 1. i 2. i 3. su difServ QoS
D=A;% Ukupna oblast pokrivanja QoS sa najmanjim RSSI dozvoljenim nivoom
% D=A U B U C; tj. unija svih površina A, B i C.
for kk=1:S(1)
for ll=1:S(2)
% svakom kvalitetu prijemnog signala RSSI odgovara одређена боја,
% конкретно за вриједност боје RGB=[98 211 75] је тамно зелена
% површина у снимљеним мапама RSSI coverage са Ekahau Heatmapper
% softverom.
if (RBG_map(kk,ll,1)==98 & RBG_map(kk,ll,2)==211 & RBG_map(kk,ll,3)==75)
A(kk,ll)=1;% oblast najboljeg QoS је бијела, -> 1
D(kk,ll)=1;% ukupna oblast је бијела ->1
end
% 2. QoS oblast је умјерено/средње зелена oblast површине код снимљених
% RSSI мапа са Ekahau Heatmapperом има боју RGB=[141 213 75]
if (RBG_map(kk,ll,1)==141 & RBG_map(kk,ll,2)==213 & RBG_map(kk,ll,3)==75)
B(kk,ll)=1;% Друга QoS oblast је бијела, -> 1
D(kk,ll)=1;% ukupna oblast је бијела/svijetla ->1
end
% Treća QoS oblast (bice слика C) је свијетле зелене боје у Ekahau %HeatMapper-у
% чије су вриједности боје RGB=[187 218 75]
if (RBG_map(kk,ll,1)==187 & RBG_map(kk,ll,2)==218& ... RBG_map(kk,ll,3)==75)
C(kk,ll)=1;% 3. oblast QoS је бијела, -> 1
D(kk,ll)=1;% ukupna oblast је бијела/svijetla ->1
end
end
end
end
end
```

Листинг функције: **usmjeriZracenje.m**

```
function [alfa,P_loss,X_koor,Y_koor,R_D,r_c]=usmjeriZracenje(KLIJENTI,...
WAP,Fc,Razmjera)
%% Autor: Boris Malcic
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Funkcija vraca ugao alfa [rad] pod kojim treba izvrstiti beamforming
% Kliјenti su vektor vrsta u kojem se nalaze locirani kliјenti u WLAN mrezi
% WAP je lokacija (koordinate) gdje je postavljen Wireless Access Point -
% WAP
% Fc[GHz] je radna frekvencija, unјeti 2.4 ili 5
% Razmjera je odnos koliko tacaka na slici A je jednako 1 metar u stvarnosti
% Npr. ako 50 piksela u radiusu odgovara 1 metar u stvarnosti, onda treba unјeti
% Razmjera=50 prilikom poziva funkcije.
KL=length(KLIJENTI)/2; % ukupan broj kliјenata, jer svaki ima dvije %koordinate
% u ravni visina stola = 0.8 metara, jer bi inace morali uzimati
% 3D-koordinate kliјenata, ovdje smo pojednostavili
DS=zeros(KL); % matrica rastoјanja izmedju pojedinih kliјenata
MAX_R=0; % maksimalno rastoјanje (Euklidova distanca) ce sigurno biti vece od 0
MIN_X=KLIJENTI(1); % od 1.kliјenta uzmemo da je minimalana x-koordinata jer je
% maksimalna velicina slike po x osi do 649
MIN_Y=KLIJENTI(2); % kao pocetna vrijednost proizvolјno je uzeto da je
% y-koordinata od 1.kliјenta minimalna

for j=1:KL
for i=(j+1):KL
if KLIJENTI(j*2+1)<MIN_X
% sa 1.kliјentom ne moramo porediti, (KL-1)+2+1 je x koordinata KL-tog %kliјenta
MIN_X=KLIJENTI(j*2+1);
end
if KLIJENTI(j*2+2)<MIN_Y % (KL-1)+2+2 je y koordinata KL-tog %kliјenta
MIN_Y=KLIJENTI(j*2+2);% ovo je minimalna vrijednost y-%koordinate
%grupe kliјenata
end
% sada imamo prave koordinate minimuma i maksimuma kliјenta gdje
% su locirani po x osi i po y osi
% racunamo sada maksimalnu udalјenost izmedju x i y koordinata
if j<KL
DS(j,i)=sqrt((KLIJENTI((j-1)*2+1)-KLIJENTI(j*2+2))^2+(KLIJENTI((j-
1)*2+2)-KLIJENTI((j*2+2)))^2);%
% Gore smo izracunali Euklidovu distancu izmedju kliјenata
if DS(j,i)>MAX_R
MAX_R=DS(j,i);
end
end
end
end

r_c=ceil(MAX_R/2); % radiјus obuhvacenih kliјenata
X_koor=MIN_X+r_c; % smatramo da su kliјenti obuhvaceni krugom
% poluprecnik kruga je r=MAX_R/2;
Y_koor=MIN_Y+r_c; %Y_koor i X_koor su koordinate centra grupe %kliјenata
% x_koor i y_koor su koordinate centra oblasti gdje su locirani
% kliјenti
```

```

    d_x=abs(X_koor-WAP(1));
    d_y=abs(Y_koor-WAP(2));
    R_D=sqrt(d_x^2+d_y^2);
% R_D je poluprecnik, tj, udaljenost od WAP do sredine grupe klijenata
% prema kojima vrsimo beamforming
    alfa=atan(d_y/d_x); % ugao beamforminga u [rad], smatram da sam
% antenski niz koji sacinjjava moju SMART WLAN antenu postavio u pravcu z->
% x=WAP(1). To nam je kao referentna z-osa koja se obicno uzima da
% se postavi antena ili antenski niz u tom pravcu.
    R_D=R_D/Razmjera;
    P_loss=32.45+20*log10(R_D) + 20*log10(Fc); % procjena slabljenja na
% mjestu gdje su klijenti

% Gdje su: P_loss [dB], R_D [m], Fc [GHz]; koje treba unjeti u gornju formulu.

end

```

Листинг функције: AntenskiSistem7.m

```

function [faze] = AntenskiSistem7(r,f,ugao)
%Autor: Boris Malcic
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% r je rastojanje od WAP do klijenata u metrima
% f je frekvencija rada WLAN ili 2.4GHz unjeti kao 2 400 000 000, tj.
% izraziti u Hz, analogno za 5GHz opseg
% ugao unjeti u radijanima, to je ugao pod kojim zelimo da imamo maksimum
% dijagrama
% zracenja i taj ugao se odredjuje lokacijom klijenata u WLAN
% L je rastojanje izmedju antenskih elemenata i cesto se u litaraturi
% oznacava sa l ili sa d i kod nas smatrajmo da su na rastojanju lambda/2
% jer se tako cesto realizuju ovi WAPs uredjaji, a sto se moze vidjeti u
% raznim specifikacijama komercijalno dostupnih uredjaja kao npr. u [28]
% f - je radna frekvencija, a posto se koriste opsezi 2.4GHz i 5GHz,
% posebno bi trebali simulirati za svaki opseg
% U praksi se najcesce proizvode dvije antene u uredjaju za svaki opseg
% pojedinačno ili se jedna antena realizuje kao dvopojasna sto je teze
% realizovati.
% Za simulacije najcesce uzmemo centralne frekvencije
% opsega, ali se tada mjenja i L, pa je dobro uzeti poluprovodnicke
% elektronske prekidače koji mogu prespajati antenske elemente koji se npr.
% nalaze na lambda/2 za razlicito lambda
c=299792458; % brzina svjetlosti u vakuumu [m/s]
lambda=c/f;
L=lambda/2;
% r je rastojanje (kao poluprecnik sfere) na kome se nalaze klijenti
% udaljeni od WAP koji je u centru te sfere
% r neka se unosi u metrima% r se inace moze odrediti primjenom lokacije
% klijenata u WLAN mrezama
% K neka bude broj antenskih elemenata, npr. polutalasnog dipol antene koje
% su u jednoj liniji medjusobno razmaknute za rastojanje L

K=7; %uzeo sam da ima 7 antenskih elemenata radi simetrije faza
snaga=0.25; % 250mW
Rzr=73; % otpornost zracenja polutalasnog dipola je 73[Ohm]
Im=sqrt(snaga/Rzr); % tj. efektivna vrijednost struje u maksimumu stojeceg
%talasa kod polutalasnog dipola
% ovako se dobija struja Im=58,5mA
% zracenje je simetricno u odnosu na ravan ugao=pi/2, pa treba staviti da
% ugao ide od -pi/2 do pi/2 radijana, ili od nula do pi radijana, ovdje cemo

```

```

% izabrati da bude racunanje ugla u opsegu 0 - pi [rad]

theta=0:(pi/180000):pi; % ugao
P_zr=(Im*Im/(4*pi*pi*r*r)).*(abs((cos((pi/2).*cos(theta-ugao)))./...
    (sin(theta-ugao))).^2).*(abs(sin(K*pi.*cos(theta-ugao)./2)./...
    (sin(pi.*cos(theta-ugao)./2))).^2);
% gornji izraz predstavlja dijagram zracenja, tacnije površinsku gustinu
% snage zracenja na sferi poluprecnika r
faze=zeros(1,K);

for v=1:K
    faze(1,v)=(v-1)*L*cos(ugao);
end

figure;
% Pretvorimo ugao iz radijana u stepene jer je intuitivnije
stheta=theta.*180./pi-90;% u nekim literaturama se ovaj ugao oznacava sa psi i
% uzima vrijednosti od -90 stepeni do +90 stepeni, ali kada je theta=0 tada ovaj
% ugao psi je -pi/2,dok kada je theta=pi, onda je psi = +pi/2, tj. psi=theta -
% 90 [deg].
plot(stheta,P_zr);
xlabel('Ugao usmjerenosti od -90 do +90 stepeni');
ylabel('Intenzitet Pointingovog vektora [W/m2] P(r)-dijagram zracenja ');
title('Maksimalna snaga zracenja-izvršeno je prilagodjenje');
% zumiramo, normalizujemo i izrazimo u dB dijagram zracenja na sljedeci
% nacin
MaksPzr=Im*Im*K*K/(4*pi*pi*r*r);% Ovo je maksimum u dijagramu zracenja, jer
% drugi faktor moze biti maksimalno jedan, a treci faktor je maksimalno K*K,
% gdje je K-broj antenskih elemenata u nizu.
normPzr=P_zr./MaksPzr;
normPzr_dB=10.*log10(normPzr);
figure;
plot(stheta,normPzr_dB);
ylabel('Normalizovani dijagram zracenja P/Pmax [dB]');
xlabel('Ugao usmjerenja glavnog snopa zracenja je -pi/2<psi<+pi/2');
end

```

Листинг процедуре: ProposeDCA.m

```
function ProposeDCA
%%
% Autor: Boris Malcic
% Proceduru ProposeDCA.m je jednostavno modifikovati u prakticno korisnu funkciju za estimaciju
% interferencije susjednih WiFi kanala kod koristenih WAPs i
% prelazak na optimalni WiFi kanal u cilju minimizacije uocene procjenjene
% interferencije
% Napomena: Pripaziti na frekvencijski razmak kod OFDM podnosilaca i ako ovaj DCA
% simuliramo kod WLAN onda je pozeljno da se stavi 312.5kHz ili 78.125kHz, dok
% kod WiMAX može biti i do 10.96kHz. To je veoma važno da se ima u vidu zbog
% korišćenja praktičnih prednosti ortogonalnih nosilaca jer inace dolazi do teskih greski!
% Takođe, treba imati u vidu koji podnosioci su pilot, a koji podnosioci za prenos podataka...
%%
clear all
close all
f=2400000000:10000:2483500000;% ISM opseg 2.4GHz, korak 10kHz - WiMax ili
% 312.5/78.125kHz WLAN

theta1=1/20000000;
fc1=2412000000;fc2=2417000000;fc3=2422000000;fc4=2427000000;
fc5=2432000000;fc6=2437000000;fc7=2442000000;fc8=2447000000;
fc9=2452000000;fc10=2457000000;fc11=2462000000;fc12=2467000000;
fc13=2472000000;fc14=2477000000;
CH_C6=20.*(abs(sinc(theta1.*(f-fc7)))); % 20=20dBmr, ove vrijednosti mjerenja bi
% trebala primati kao argumente modifikacija u cilju kreiranja pomenute funkcije
figure;
theta2=1/(10^7);
CH_etfbl_n=15.*(abs(sinc(theta2.*(f-fc6)))); % 15=15dBmr
plot(f,CH_etfbl_n,'r');
hold on;
plot(f,CH_C6,'b');
theta3=theta2;
CH_etfbl_lj=15.*(abs(sinc(theta3.*(f-fc11))));% 15=15dBmr je RSSI izmjeren pik
hold on; plot(f,CH_etfbl_lj,'y');
theta4=theta3;
CH_etfbl_roz=2.*(abs(sinc(theta4.*(f-fc7))));%
hold on
plot(f,CH_etfbl_roz,'g');
DCA7=xcorr(CH_etfbl_roz,CH_C6)+xcorr(CH_etfbl_lj,CH_C6)+xcorr(CH_etfbl_n,CH_C6);
figure;
numFreq=1:length(DCA7);
plot(numFreq,DCA7);
IndMiddle=floor(length(DCA7)/2);
VazanDCA7=DCA7(IndMiddle:length(DCA7));
freqAxix=IndMiddle:length(DCA7);
for j=(IndMiddle:length(DCA7))
freqAxix(j-IndMiddle+1)=fc7+10^4.*(j-IndMiddle);
end
figure;
plot(freqAxix,VazanDCA7);
xlabel('Frequency ISM band [Hz]');
ylabel('Value of cross-correlation');
title('DCA if finding minimal value from 6th to 11th ISM channel');
fc7toC11=fc7:10000:fc11;
DCA_C7toC11=VazanDCA7(1:length(fc7toC11));
hold on
plot(fc7toC11,DCA_C7toC11,'r+');
[findValueminDCA,IndOfMinDCAchannel]=min(DCA_C7toC11)
% odrediti koja je to frekvencija nosioca
F_carrierDCA=fc7toC11(1)+(IndOfMinDCAchannel-1)*10000;% koji je to najblizi kanal
od mogucih: fc1, fc2, fc3, fc4, fc5, ..., fc14
FREQ=[fc1 fc2 fc3 fc4 fc5 fc6 fc7 fc8 fc9 fc10 fc11 fc12 fc13 fc14];
```

```

indChannel=7;
minDistance(7)=abs(F_carrierDCA-fc7);
for j=8:11
if abs(F_carrierDCA-FREQ(j))<minDistance(j-1)
indChannel=j;
minDistance(j)=abs(F_carrierDCA-FREQ(j));
end
end
indChannel
% Posto C6 kanal treba biti sirine 40MHz, onda moramo izabrati 9-ti
% kanal po redu u ISM opsegu, jer je tu distanca 3950000% tj. najmanja od mogucih
minDistance_7=abs(F_carrierDCA-fc7);
minDistance_8=abs(F_carrierDCA-fc8)
minDistance_7=abs(F_carrierDCA-fc7)
minDistance_9=abs(F_carrierDCA-fc9)
minDistance_10=abs(F_carrierDCA-fc10)
minDistance_11=abs(F_carrierDCA-fc11)
%deseti kanal u ISM opsegu je najblizi
% ali nama treba da kanal C6 ima opseg od 40MHz pa zato uzimamo da
% deveti kanal treba sa 7-og kanala precu na 9-ti Wi-Fi kanal,
figure(1)
xlabel('Frequency[Hz] band of WLAN ISM 2.4GHz');
ylabel('RSSI[dBm] of different WAPs on WLAN at ETFBL');
title('We want to minimize inter-channel interference using our DCA based on
cross-correlation')
figure(2);
xlabel('Ordering number of frequency sample, DELTAsample=10kHz');
ylabel('xcorr(CH_etfbl_roz,
CH_C6)+xcorr(CH_etfbl_lj,CH_C6)+xcorr(CH_etfbl_n,CH_C6)');
title('Inter-Channel Interference is minimum when Cross-Correlation is
minimized');

end

```

Листинг функције (процедуре): LocationInWiFi.m

```

function LocationInWiFi
clear all; close all; Rf_mapa=imread('Rfmapa_WAP_RTRK_institut.bmp');
figure; UlazRSSI=Rf_mapa;
imshow(Rf_mapa); [A,B,C,D]=Oblast_RSSI_QoS(UlazRSSI);
figure; imshow(A); figure; imshow(B); figure; imshow(C); figure; imshow(D);
SE=strel('square',60);D_c=imclose(D,SE);figure;imshow(D_c);BW=im2bw(D_c);
figure;imshow(BW);WAP=[661 225];hold on; plot(661,225,'r+');
hold on; plot(393,371,'b*',429,391,'b*',358,403,'b*',410,415,'b*');
KL1=[393 371]; KL2=[429 391]; KL3=[358 403]; KL4=[410 415];
KLIJENTI=[KL1 KL2 KL3 KL4];
[alfa,P_loss,X_koor,Y_koor,R_D,r_c]=usmjeriZracenje(KLIJENTI, WAP,2.4,50);
theta = linspace(0,2*pi); DegAlfa=alfa*180/pi;R_D_in_pixels=R_D*50;
R_Dpx=ceil(R_D_in_pixels);xWAP=WAP(1); yWAP=WAP(2);
x = r_c*cos(theta) + X_koor; y = r_c*sin(theta) + Y_koor;
hold on; plot(x,y,'r-.'); hold on; plot(X_koor,Y_koor,'y+');
xc = R_Dpx*cos(theta) + xWAP; yc = R_Dpx*sin(theta) + yWAP;
hold on; plot(xc,yc,'r. '); z_osa=1:xWAP; y_osa=zeros(1,length(xWAP));
for i=1:length(xWAP)
y_osa(i)=yWAP;
end
hold on; plot(z_osa,y_osa,'g<'); Bx=[X_koor xWAP]; By=[Y_koor yWAP];
hold on; plot(Bx,By,'m-');

```

III ПРИЈЕДЛОГ ИЗВОЂЕЊА ИЗРАЗА ЗА EVM

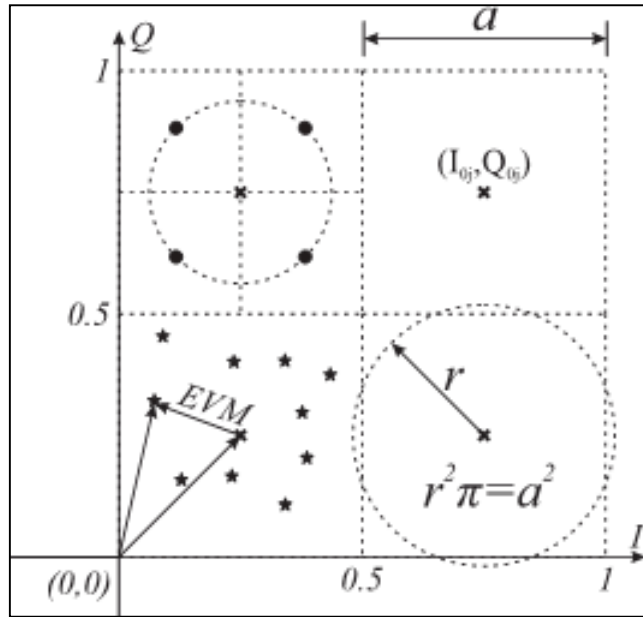
У циљу разумијевања значаја примјене паметних WLAN антена, на смањење EVM при пријему, у наставку ћемо изложити наш приједлог анализе промјене EVM с промјеном примјењене M-QAM. Послије извршених симулација у 4. поглављу, извршили смо додатне симулације за различита растојања клијената од WAP, тј. за: **tgac.TransmitReceiveDistance** = 1, 5, 10, 15, 25, 50, 100 метара. Извршене симулације су показале да укључени Matlab-ов модел преноса не узима у обзир утицај промјене растојања на EVM (*при промјени наведених растојања, на мјесту пријема EVM се мјењао случајним законом за око 0,1-0,2% - односно као да се није мјењао када само мјењамо растојање*). Пошто тако добијени подаци немају практичног значаја, одлучили смо да предложимо побољшање математичког модела у Matlab-у који би показивао утицај промјене растојања на EVM, а што је од великог код DCA и TCRFFA.

У ту сврху посматрајмо Сliku 8.3 на којој је визуелно приказана комплексна I/Q - раван и учртан нормализовани констелациони дијаграм који ћемо користити за извођење израза и зависности EVM у функцији промјене SNR. На основу (3.1) видимо да се дупло повећање растојања клијента од WAP изражава као слабљење корисне пријемне снаге на мјесту клијента за 6dB (*у слободном простору*), а у практичним околности је још веће слабљење.

На основу дефиниције ефективне вриједности вектора грешке [32] и на основу ознака са Сlike 8.3, дошли смо на идеју да изведемо зависност EVM у односу на SNR у случају униформне расподеле бијелог шума, а која ће проузроковати и униформну расподелу примљеног сигнала. У ту сврху, дефинишимо ефективну вриједност вектора грешке при преносу као:

$$EVM_{RMS} = \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} \sqrt{\frac{1}{L \cdot M \cdot N} \cdot \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \{ [I(l, m, n, k) - I_{0j}]^2 + [Q(l, m, n, k) - Q_{0j}]^2 \} / P_{0j}^2} \quad (1)$$

гдје су: M – укупан број OFDM који се пренесу у току симулације преноса (*односно стварног преноса*) са укупним бројем (N_p) пакета који се пренесу, L – је укупан број подносилаца који се користе за пренос података у OFDM сигналу, N – је број просторних (MIMO) стримова преко којих се врши пренос. I_{0j}, Q_{0j} – су констелационе тачке које одговарају идеалном ($EVM_{RMS}=0$) M-QAM преносу и P_{0j} - је снага носиоца у j -том квадранту констелационог дијаграма.



Слика 8.3 - Први квадрант констелационог дијаграма

На Слици 8.3, идеални пријем означавају тачке \times када је ријеч о 16-QAM ($j=1,2,3,\dots,16$), односно тачке \bullet када је ријеч о 64-QAM ($j=1,2,\dots,64$) преносу података. Са \star су означене произвољне тачке које можемо примити при преносу, а када се тачка \star не поклапа са одговарајућом тачком \times , тада долази до конкретног **EVM** интензитета (8.2):

$$EVM = \{[I(l, m, n) - I_{0j}]^2 + [Q(l, m, n) - Q_{0j}]^2\}^{1/2}, \quad (2)$$

гдје су:

l - редни број подносиоца примљеног OFDM сигнала и m - редни број OFDM симбола у n -том пакету.

Уколико пређемо са преноса 16-QAM на 64-QAM, на основу једнакости (*површине одговарајућих кругова и квадрата*) површина у простору одлучивања, тада се смањује око 2-пута ефективна вриједност напона шума.

Без умањења општости израза (1), можемо извршити поједностављење да се врши пренос само једног пакета, преко једног просторног стрима и само једног подносиоца код OFDM. У том случају, израз (1), ако је ријеч о M-QAM можемо записати као (3):

$$EVM_{RMS}^{M-QAM} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M EVM_{RMS(j)}^2} = \sqrt{\frac{1}{M/4} \sum_{j=1}^{M/4} EVM_{RMS(j)}^2}, \quad (3)$$

гдје су: M - редни број примјењене M-QAM, $EVM_{RMS(j)}^2$ - квадрат ефективне вриједности вектора грешке у j -том квадранту и искористили смо особину симетрије констелационог дијаграма тако да је довољно извршити сумирање у само једном квадранту ($M/4$). Пошто је EVM посљедица шума, када нема шума (у наставку под шумом подразумевамо и утицај интерференције и свих других непожељних сигнала, али да функција расподеле амплитуда шума остаје униформна у читавој области констелационог дијаграма примјеног сигнала) увијек ће бити $I(l, m, n) = I_{0j}$ и $Q(l, m, n) = Q_{0j}$.

Надаље, сматрамо да су сви симболи подједнако вјероватни на пријему, односно да у преносном систему дјелује адитивни бијели шум нулте средње вриједности и униформне расподеле амплитуда. Закључујемо да се тада површина једног квадрата $P_{square} = a \cdot a = a^2$ (Слика 8.3) може сматрати као област простора у пријемном сигналу када се може примити сигнал $*$, а да се исправно детектује као симбол \times ако је ријеч о 16-QAM. Односно, што је год већа површина тог правоугаоника имамо могућност да дјелује снажнији шум при истој снази P_{0j} , а да при томе остане иста вриједност BER -а. Запазимо, да је та површина квадрата једнака површини круга полупречника $r = \frac{a}{\sqrt{\pi}}$, а што нам је важно јер апроксимативно можемо рећи

да је дозвољена снага шума код j -тог квадранта ($j=1,2,\dots,16$) једнака $N_j = r^2 = \frac{\sigma_n^2}{R} = \frac{V_n^2}{1\Omega}$, за: $R=1\Omega$, и $r = \sigma_n = V_n$ представља ефективну вриједност напона шума на отпорности пријемника R .

Пошто сматрамо да дјелује шум униформне²² расподеле и нулте средње вриједности (односно подједнако дјелује на сваку идеалну констелациону тачку при пријему, тј. сваки j -ти квадрант), те узимајући у обзир израз (1), закључујемо да је $EVM_{RMS(j)}^2 = N_j / P_{0j} = \frac{1}{SNR_j}$, при чему сматрамо да су варијације у снази носилаца занемарљиве (у односу на варијације у снази шума) у посматраном j -том квадранту, а што се практично може и сматрати (Слика 8.3).

²² Овдје предложен поступак можемо искористити за извођење односа $EVM=f(SNR)$ код произвољне расподеле шума, али се тада математички опис знатно компликује.

С обзиром да се у конкретном телекомуникационом систему могу изабрати одређени нивои сигнала за пренос и снаге изабраних носилаца не можемо произвољно повећавати, требале би се смањити снаге шума како би остала иста вриједност EVM_{RMS} при пријему (*што је логично јер је униформна расподела густине снаге шума, па да би запремина која представља снагу шума остала иста као код 4-QAM*) имамо:

$$N_j^{16-QAM} = r_1^2 = \frac{a^2}{\pi}, \quad N_j^{64-QAM} = r_2^2 = \frac{\left(\frac{a}{2}\right)^2}{\pi} = \frac{a^2}{4\pi} \Rightarrow N_j^{64-QAM} = \frac{N_j^{16-QAM}}{4}.$$

Пошто у преносу не можемо утицати на снагу шума у j -том констелационом квадранту, усљед повећања са 16-QAM на 64-QAM долази до: $SNR_{RMS(j)}^{64-QAM} = \frac{SNR_{RMS(j)}^{16-QAM}}{4}$. То

значи да треба бити $EVM_{RMS(j)}^{64-QAM} = \frac{EVM_{RMS(j)}^{16-QAM}}{2}$ да би симболска грешка остала иста. Међутим,

не можемо утицати на снагу шума у преносном каналу и не можемо додатно појачати корисну снагу носиоца (*нпр. у уређајима су дигитална кола изабрана да раде са нивоима до 5 волта*), одакле закључујемо да ће са повећањем реда модулације за 4-пута долазити до повећања EVM_{RMS} за око 3dB, односно до смањења SNR за око 6dB. Изведимо одговарајући израз за конкретан случај 16-QAM. Нека је прво коришћена 4-QAM код које је при преносу сигнала била вриједност EVM_{RMS}^{4-QAM} (*можемо претпоставити да је ова вриједност 1 јер ћемо је користити за референтну вриједност*), са нпр. идеалним пријемним тачкама у констелационом дијаграму.

Сада на основу претходно изложеног и Сlike 8.3 имамо да дијелењем констелационог дијаграма при преласку са 4-QAM на 16-QAM, одговарајуће ефективне вриједности EVM апроксимативно односе као (4):

$$\begin{aligned} EVM_{RMS}^{16-QAM} &= \frac{EVM_{RMS}^{4-QAM}}{\sqrt{\frac{1}{4}\left(\frac{N_1}{P_{01}} + \frac{N_2}{P_{02}} + \frac{N_3}{P_{03}} + \frac{N_4}{P_{04}}\right)}} = \frac{1}{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{a^2/\pi}{a^2/2} + \frac{a^2/\pi}{10a^2/4} + \frac{a^2/\pi}{10a^2/2} + \frac{a^2/\pi}{9a^2/2}}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{146}{45\pi}}} \approx 1,9685 \approx 2. \end{aligned}$$

Еквивалентно, код 64-QAM преноса смо одредили снаге носилаца као у (5):

$$\begin{aligned}
P_{01} &= f\left(I_{01} = \frac{a}{4}, Q_{01} = \frac{a}{4}\right) = I_{01}^2 + Q_{01}^2 = \frac{a^2}{8}, \\
P_{02} &= f\left(I_{02} = \frac{a}{4}, Q_{02} = \frac{3a}{4}\right) = I_{02}^2 + Q_{02}^2 = P_{01} + \Delta P_{1,3} = P_{01} + \frac{a^2}{2}, \\
P_{03} &= f\left(I_{03} = \frac{a}{4}, Q_{03} = \frac{5a}{4}\right) = I_{03}^2 + Q_{03}^2 = P_{02} + \Delta P_{3,5} = P_{01} + \frac{a^2}{2} + a^2, \\
P_{04} &= f\left(I_{04} = \frac{a}{4}, Q_{04} = \frac{7a}{4}\right) = I_{04}^2 + Q_{04}^2 = P_{03} + \Delta P_{5,7} = P_{03} + \frac{3a^2}{2} = \frac{25a^2}{8}, \\
P_{05} &= f\left(I_{05} = \frac{3a}{4}, Q_{05} = \frac{a}{4}\right) = I_{05}^2 + Q_{05}^2 = P_{02} = \frac{5a^2}{8}, \\
P_{06} &= f\left(I_{06} = \frac{3a}{4}, Q_{06} = \frac{3a}{4}\right) = I_{06}^2 + Q_{06}^2 = P_{05} + \Delta P_{1,3} = P_{01} + \frac{2a^2}{2} = \frac{9a^2}{8}, \\
P_{07} &= f\left(I_{07} = \frac{3a}{4}, Q_{07} = \frac{5a}{4}\right) = I_{07}^2 + Q_{07}^2 = P_{06} + \Delta P_{3,5} = P_{01} + \frac{4a^2}{2} = \frac{17a^2}{8}, \\
P_{08} &= f\left(I_{08} = \frac{3a}{4}, Q_{08} = \frac{7a}{4}\right) = I_{08}^2 + Q_{08}^2 = P_{07} + \Delta P_{5,7} = \frac{29a^2}{8}, \\
P_{09} &= f\left(I_{09} = \frac{5a}{4}, Q_{09} = \frac{a}{4}\right) = I_{09}^2 + Q_{09}^2 = P_{03} = \frac{13a^2}{8}, \\
P_{010} &= f\left(I_{010} = \frac{5a}{4}, Q_{010} = \frac{3a}{4}\right) = I_{010}^2 + Q_{010}^2 = P_{07}, \\
P_{011} &= f\left(I_{011} = \frac{5a}{4}, Q_{011} = \frac{5a}{4}\right) = I_{011}^2 + Q_{011}^2 = P_{07} + \Delta P_{3,5} = \frac{25a^2}{8}, \\
P_{012} &= f\left(I_{012} = \frac{5a}{4}, Q_{012} = \frac{7a}{4}\right) = I_{012}^2 + Q_{012}^2 = P_{011} + \Delta P_{5,7} = \frac{37a^2}{8}, \\
P_{011} &= f\left(I_{011} = \frac{5a}{4}, Q_{011} = \frac{5a}{4}\right) = I_{011}^2 + Q_{011}^2 = P_{07} + \Delta P_{3,5} = \frac{25a^2}{8}, \\
P_{012} &= f\left(I_{012} = \frac{5a}{4}, Q_{012} = \frac{7a}{4}\right) = I_{012}^2 + Q_{012}^2 = P_{011} + \Delta P_{5,7} = \frac{37a^2}{8}, \\
P_{013} &= f\left(I_{013} = \frac{7a}{4}, Q_{013} = \frac{a}{4}\right) = I_{013}^2 + Q_{013}^2 = P_{04} = \frac{25a^2}{8}, \\
P_{014} &= f\left(I_{014} = \frac{7a}{4}, Q_{014} = \frac{3a}{4}\right) = I_{014}^2 + Q_{014}^2 = P_{08} = \frac{29a^2}{8}, \\
P_{015} &= f\left(I_{015} = \frac{7a}{4}, Q_{015} = \frac{5a}{4}\right) = I_{015}^2 + Q_{015}^2 = P_{012} = \frac{37a^2}{8} \text{ и} \\
P_{016} &= f\left(I_{016} = \frac{7a}{4}, Q_{016} = \frac{7a}{4}\right) = I_{016}^2 + Q_{016}^2 = P_{015} + \Delta P_{5,7} = \frac{49a^2}{8}.
\end{aligned} \tag{5}$$

У (5) су: P_{0j} – снаге носилаца (које представљају снагу корисног сигнала) при чему је: $j=1,2,\dots,16$, јер код 64-QAM у једном квадранту укупног констелационог дијаграма имамо $64/4=16$ различитих амплитудско-фазних (I_{0j}, Q_{0j}) тачака. На основу (5) и (3) добијамо (6):

$$\frac{EVM_{RMS}^{4-QAM}}{EVM_{RMS}^{64-QAM}} = \frac{1}{\frac{a}{8\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{a^2}} \sqrt{1 + \frac{2}{5} + \frac{2}{13} + \frac{3}{25} + \frac{1}{9} + \frac{2}{17} + \frac{2}{29} + \frac{2}{37} + \frac{1}{49}}} \approx \frac{1}{1/2\sqrt{\pi}} \approx 3,5. \quad (6)$$

Било је за очекивати да ћемо у изразу (6) добити бројни однос око 4, јер са 4-QAM када прелазимо на 16-QAM се на први поглед ефективна вриједност вектора грешке повећа 2-пута. Надаље, када пређемо са 16-QAM на 64-QAM поново смо сваки квадрант подијелили на нова 4 дијела, па очекујемо поновно повећање EVM_{RMS}^{M-QAM} још око 2 – пута, прецизније укупно $1,9685^2 = 3,875 \approx 4$ пута да се повећа при преласку са 4-QAM на 64-QAM пренос. Поставља се питање зашто смо онда у изразу (6.8) добили да је око 3,5 пута. По личном мишљењу, разлог за то је промјена у снази појединих (I_0, Q_0) носилаца јер када извршимо подјелу првог квадранта констелационог дијаграма на M – тачака које одговарају носиоцима и пустимо да $M \rightarrow \infty$, тада би толико густо (инфинитезимално) те тачке (укупан број носилаца) биле једна до друге и могло би се с правом рећи да је број тих тачака код којих је снага носилаца (овдје корисна снага) сразмјеран са површином $P_{0j} = (a, a) = r_k^2 = 2a^2$. Потом, преласком са 4-QAM на 64-QAM, долази до тога да има носилаца чије су снаге веће, али и мање од снаге носилаца у случају 4-QAM преноса. Ако $M \rightarrow \infty$, односом ефективне површине укупног констелационог дијаграма која се може одредити као површина круга полупречника r_{eff} тако да вриједи: $P_{eff} = r_{eff}^2 \pi = 4a \cdot 4a = 16a^2$. Ову површину требамо подијелити са површином круга гдје су снаге носилаца мање или једнаке снази у случају преноса 4-QAM. Тај круг има површину $P_{0,4-QAM} = (a\sqrt{2})^2 \pi = 2a^2 \pi$. Однос претходних површина је $\frac{16a^2}{2a^2 \pi} = \frac{8}{\pi} \approx 2,54$. То значи да би у граничном случају за $M \rightarrow \infty$ било око 1,54 (тј. $2,54 - 1$) пута више носилаца чија је снага већа у односу на константну снагу носилаца код 4-QAM. На основу израза (3) и претходног излагања, можемо сматрати ако је M – укупан број тачака у констелационом дијаграму (нпр. $M=64$ код 64-QAM).

Тада, тај укупан број носилаца можемо изразити као $M=K+1,54K$, при чему је K -број носилаца чија је средња вриједност снаге носиоца једнака $P_{ok} = \left(\frac{a\sqrt{2}}{2}\right)^2$, а $1,54K$ је број носилаца чија је средња вриједност снаге носиоца једнака $\left(\frac{r_{eff}}{2}\right)^2 = \frac{4a^2}{\pi}$.

Узимајући у обзир израз (3), произлази (7):

$$EVM_{RMS}^{64-QAM} = \sqrt{\frac{1}{2,54K} \left[\frac{K\left(\frac{a}{2}\right)^2 / \pi}{P_{ok}} + \frac{1,54K\left(\frac{a}{2}\right)^2 / \pi}{\left(\frac{r_{eff}}{2}\right)^2} \right]} \approx \frac{1}{\sqrt{10}} \approx \frac{1}{3,16}. \quad (7)$$

У (7) је $2,54K=16$ (64-QAM), одакле је приближно $K=6$. Упоредјујући (6) са (7) уочавамо мало одступање добијених вриједности (*повећање 3,5 или повећање 3,16*) јер у (7) је коначно $M=64$. Израз (7) је веома важан јер на основу њега можемо приближно одредити колико се код M -QAM повећа средњеквадратна вриједност вектора грешке у односу на случај преноса са 4-QAM, а што се послјије краћих извођења покаже као (8).

$$\frac{EVM_{RMS}^{4-QAM}}{EVM_{RMS}^{M-QAM}} = \frac{1}{\frac{2}{\sqrt{\pi} \cdot 2^{-5+\log_2 M}} \sqrt{2,1}}. \quad (8)$$

На основу оvdје изведеног односа датог са изразом (8) можемо узети у обзир утицај промјене растојања на EVM у постојећем моделу за симулацију IEEE 802.11ac у Matlab-у.

Подсјетник: Униформна функција [35] заједничке густине вјероватноће је

$f_{I,Q}^{noisse} = \frac{1}{16a^2}$ и вјероватноћа да тачка (I,Q) буде у интервалу $-2a \leq I, Q \leq 2a$ је

$P = \int_{-2a}^{2a} \int_{-2a}^{2a} f_{I,Q}^{noisse}(I,Q) dIdQ = 1$, а што нам је важно за претходно изложену анализу и извођење

крајњег израза (8). Наравно, пожељно је у будућем истраживању и практично - са детаљним мјерењима, провјерити оправданост наведеног разматрања и крајњих израза.

IV ЕКОНОМСКА ОПРАВДАНОСТ WAPs

Због драстичне разлике у цијени, UniFi UAP-AC-LR (чија је тренутна цијена око 240 KM по једном WAP) - који не подржавају технологију паметних WLAN антена и цијене WAC6503D-S са подржаним паметним антенама (енг. *Zyxel WiFi Access Point Dual Band 802.11ac PoE [3x3] with Smart Antenna for High-Density Environments*) чија је цијена (без урачунате царине и ПДВ-а) око 520\$ по једном WAP, закључујемо да има смисла извршити економску анализу оправданости куповине и уградње оваквих уређаја у смислу CAPEX, OPEX и RoI. Што се тиче инсталације на ЕТФБЛ, одмах је свима јасно да није оправдана таква инвестиција јер и није толико велик број захтјевних клијената који би повећали RoI.

Тренутно су знатно економичнији за набавку UniFi UAP-AC-LR и сва евентуална уштеда енергије и побољшање перформанси и QoS при преносу које нуди технологија „паметних“ антена је тренутно неисплативо у односу на потребне почетне инвестиције у једној таквој WLAN. Али, чим ова технологија постане доступнија (што није за очекивати у периоду до наредних 10 година) у будућности, корисно је додатно унапређење постојеће WLAN у складу са тадашњим потребама и трендовима.

Из каталога је могуће видјети колико износи средње вријеме између отказа (енг. *Mean Time Between Failures-MTBF [h]*) код WAC6503D-S WAPs, а које износи 562,413 сати [33]. То значи да уз: вјероватноћу нерасположивости ових уређаја која обично износи $1-A_s=10^{-5}$ и средње вријеме за поправку ако се деси отказ које је реда 4 сата, те ако се у периоду од 10 година трошкови поправке процјене на средњу вриједност од 30 KM по квару (што је корисно још тачније установити на основу практичног искуства познатијих сервисера) се израчунавају трошкови експлоатације (e) и иницијални трошкови реализације ове мреже у односу на тренутно стање цијена су дати са $C_0 = 6.126,70$ KM. Потом, ако се сматра да је годишња инфлација у Босни и Херцеговини једнака тренутној вриједности инфлације која износи око $i=1,4\%$, тада се годишњи износ амортизације рачуна са (9):

$$a = C_0 \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}. \quad (9)$$

Ефективни годишњи трошкови су једнаки збиру амортизације и трошкова експлоатације, тј. $E_{ef} = a + e$. Капитал који је потребно уложити на почетку од $n=10$ година, а да би се покрили трошкови експлоатације система су:

$$E_0 = e \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \approx 21,50 \text{ KM.}$$

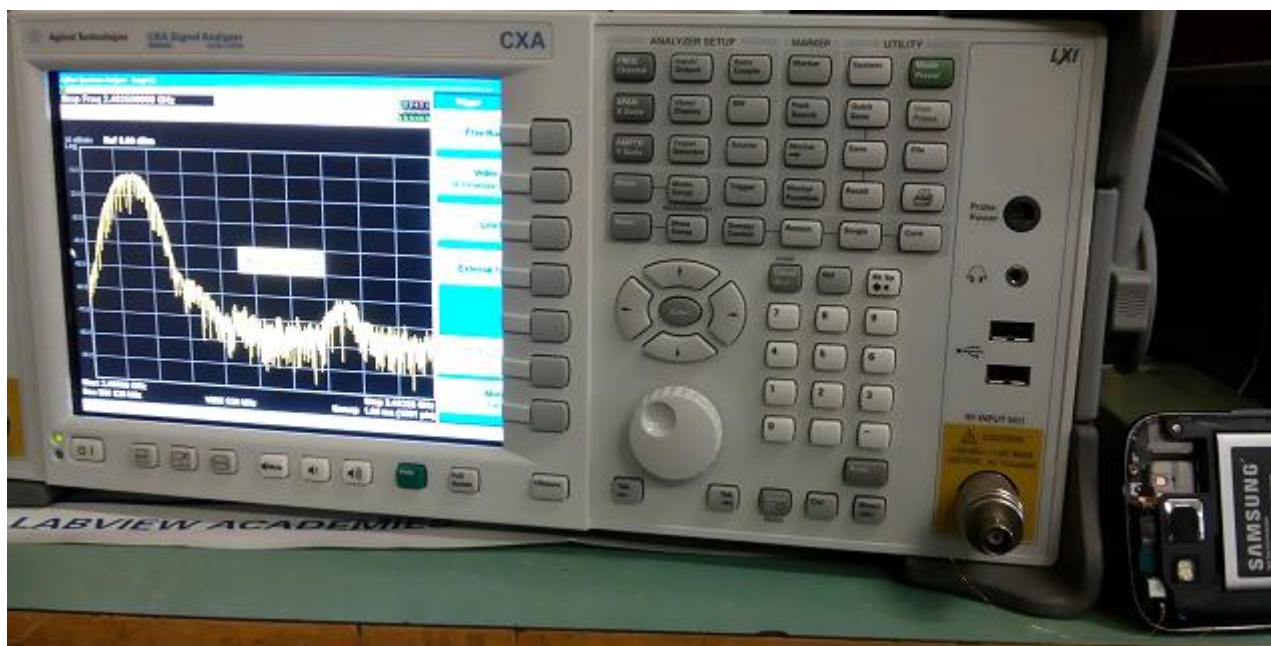
С обзиром да би у посматраној WLAN требало имплементирати минимално 5 ових уређаја, а они су везани у топологији звијезде и међусобно вјероватноћа њиховог отказа је независна, па су ови трошкови реда $5 \times 21,50 \text{ KM} = 107,50 \text{ KM}$. За потребе евентуалне поправке, на основу практичних искустава, добра је пракса планирати исти толики износ. Иначе, укупне ефективне инвестиције система се рачунају као $C_{ef} = C_0 + E_{\text{окупно}}$.

На основу претходно изложеног, закључује се да су тренутни захтјеви код ЕТФБЛ WLAN у довољној мјери задовољени са UniFi UAP-AC-LR и да примјена паметних антена није економски оправдана у овом објекту, већ у ситуацијама веома густих WLAN мрежа са великим бројем корисника по јединици површине - односно у економски развијенијим земљама свијета.

Реализацијом другог предложеног рјешења (*када се не употребљавају WAPs који подржавају smart-beamforming*) остварује се уштеда у набавци (CAPEX) по једном WAP у износу од 735,14 KM. Што значи да је тада цијена (у односу на тренутне цијене на тржишту) имплементације цијеле WLAN која садржи 5 WAPs, умањена за 3. 675,70 KM и умјесто 6.125,70 KM, укупна цијена је тада 2.450,00 KM. Произлази закључак да су сада знатно мањи CAPEX, а пошто су ови WAPs једноставнији у односу на оне који подржавају паметне антене, у овом случају ће и UniFi UAP AC LR бити поузданији (*а због једноставности и јефтинији за поправку уколико дође до евентуалног квара*). Пошто немамо новчано изражене **RoI**, јер се не врши наплата клијентима за коришћење услуга у ЕТФБЛ WLAN, онда се закључује ту да нема потребе за сложеним и скупим **WAC6503D-S** али је њихова примјена од великог значаја за будуће 5G мреже [36].

V ОПРАВДАНОСТ МАТЕМАТИЧКОГ МОДЕЛА СПЕКТРАЛНЕ ГУСТИНЕ СНАГЕ Wi-Fi КАНАЛА

У циљу провјере математичког модела спектралне густине снаге појединих Wi-Fi канала су прво провјерене спецификације у одговарајућим стандардима [32]. Потом, ради и практичне провјере, помоћу мјерене опреме у лабораторији за телекомуникације на ЕТФБЛ је извршено експериментално мјерење као на Слици 8.4.

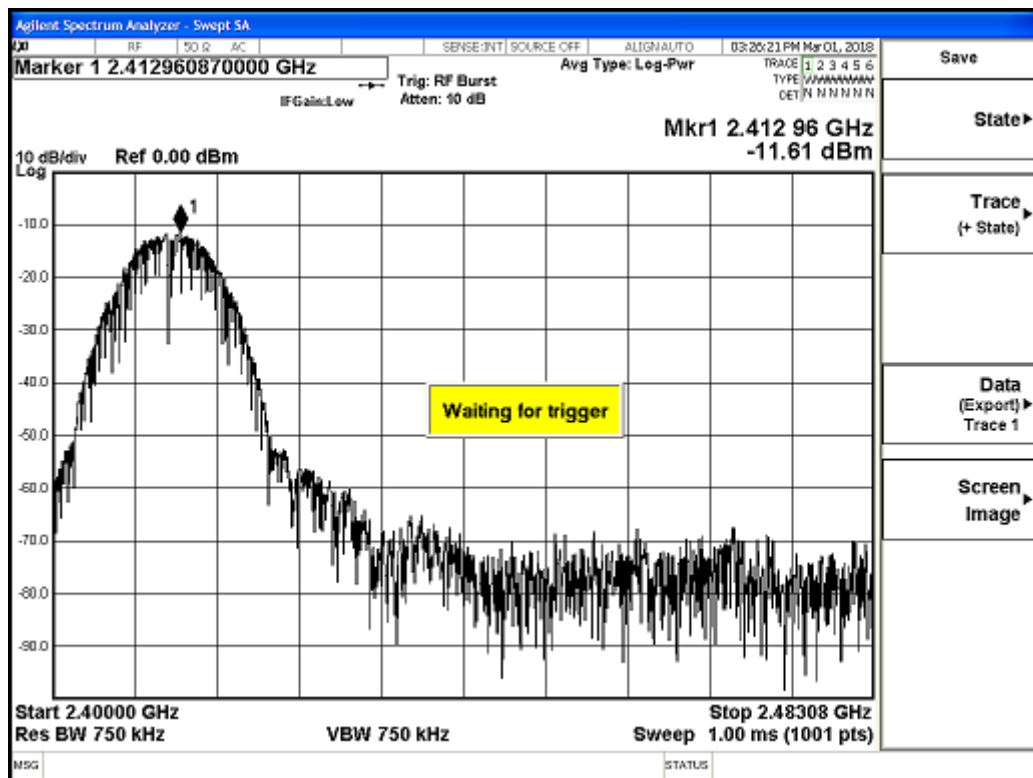


Слика 8.4 - Експеримент мјерења спектралне густине снаге

На Слици 8.4 је сигнал са Wi-Fi антенског порта (од мобилног телефона *Samsung Galaxy S3 Neo*) прикључен као улазни сигнал на РФ порт мјерног инструмента Agilent CXA Signal Analyzer N9000A.

На дисплеју мјерног инструмента је лијево (енг. *left hand side*) приказан график измјерене вриједности спектралне густине РФ снаге у предајном смјеру од мобилног телефона према WAP (енг. *uplink*), а на истом дисплеју је десно видљив спектар снаге у пријемном режиму (енг. *downstream*) који се прима на антени мобилног телефона и који је посљедица предајне снаге од неког другог WAP који врши предају РФ сигнала на 11. Wi-Fi каналу ($2.462GHz$) чији је измјерени максимум $RSSI = -60dBm$. Што се тиче претходно споменутог измјереног максимума предајне снаге код првог Wi-Fi канала, извршено је поново мјерење и максимум са дисплеја инструмента је увеличано графички приказан на Слици 8.5.

Измјерени максимум у upstream-у је износио -1.6 dBm (на Слици 8.5 је приказана вриједност -11.6 dBm јер је укључено додатно слађење од 10 dB код улазног сигнала са РФ – порта). Наравно, с обзиром да се у IEEE 802.11 WLAN користи TDD, мјерење је активирано опцијом тригерања са налетним РФ – сигналом (енг. *Trigger using RF burst*).



Слика 8.5 - PSD код првог Wi-Fi канала у upstream-у

Код Сlike 8.5 је спектрална густина снаге снимана у фреквенцијском опсегу од $2,4\text{GHz}$ до $2,4835\text{GHz}$ (*ISM WLAN 2.4GHz*). За први Wi-Fi канал сматрамо да заузима опсег од 20 (22) MHz јер ниво снаге мањи од -40dBm се сматра шумом и утиче на интерференцију код сусједних Wi-Fi канала. Наравно, облик спектралне густине снаге у downstream-у се исто може апроксимирати са обликом функције $\text{sinc}(f)$, као што је и имплементирано код **ProposeDCA.m**. На крају, извршене су и провјере резултата као у [37] чиме је у потпуности практично потврђена потрошња појединих елемената у WLAN, а што је корисно за реализацију TCRFFA.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] J. Florwick, J. Whiteaker, A.C. Amrod and J. Woodhams, "Wireless LAN Design Guide for High Density Client Environments in Higher Education," CISCO Inc., July, 2017, [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-1250-series/design_guide_c07-693245.pdf, [Accessed Dec. 31, 2017].
- [2] Y. J. Chen, Y. H. Shen and L. C. Wang, "Achieving energy saving with QoS guarantee for WLAN using SDN," in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, pp. 1-7., 2016.
- [3] C. Xu, Z. Han, G. Zhao and S. Yu, "A Sleeping and Offloading Optimization Scheme for Energy-Efficient WLANs," in *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 4, pp. 877-880, April 2017. doi: 10.1109/LCOMM.2016.2642919
- [4] A. P. Jardosh, G. Iannaccone, K. Papagiannaki and B. Vinnakota, "Towards an Energy-Star WLAN Infrastructure," in *Eighth IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, Tucson, AZ, pp. 85-90, 2007. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/4294400_Towards_an_Energy_Star_WLAN_Infrastructure, [Accessed Dec. 09, 2017].
- [5] C. Rossi, C. Casetti, C. F. Chiasserini and C. Borgiattino, "Cooperative Energy-Efficient Management of Federated WiFi Networks," in *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, no. 11, pp. 2201-2215, Nov. 1 2015.
- [6] Jardosh, A.P., Papagiannaki, K., Belding, E.M. et al., *Green WLANs: On-Demand WLAN Infrastructures*, in *Mobile Netw Appl.*, Springer US, 2009.
- [7] F. G. Debele, M. Meo, D. Renga, M. Ricca and Y. Zhang, "Designing Resource-on-Demand Strategies for Dense WLANs," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 33, no. 12, pp. 2494-2509, Dec. 2015.
- [8] Marco Ajmone Marsan, Luca Chiaraviglio, Delia Ciullo, and Michela Meo, "A simple analytical model for the energy-efficient activation of access points in dense WLANs," in *Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking (e-Energy '10)*, ACM, New York, USA, pp. 159-168, 2010.
- [9] Ana Paula Couto da Silva, Michela Meo, Marco Ajmone Marsan, "Energy-performance trade-off in dense WLANs: A queuing study," in *Computer Networks, Elsevier, Volume 56*, Issue 10, pp. 2522-2537, 2012.
- [10] Jorge Ortín, Pablo Serrano, Carlos Donato, "Optimal configuration of a resource-on-demand 802.11 WLAN with non-zero start-up times," in *Computer Communications, Elsevier, Volume 96*, pp. 99-108, 2016.
- [11] F. Li, X. Wang, J. Cao, R. Wang and Y. Bi, "A State Transition-Aware Energy-Saving Mechanism for Dense WLANs in Buildings," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 25671-25681, 2017.
- [12] C. Tudeuce and T. Gross, "A mobility model based on WLAN traces and its validation," in *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, pp. 664-674 vol. 1, 2005.

- [13] J. Lee, S. Kho, U. Jang and Y. Hong, *An Improved Method of Avoiding RF Congestion in Indoor Environments*, in *Procedia Engineering*, pp. 223-228, 2016.
- [14] E. G. Villegas, R. V. Ferre and J. Paradells, *Frequency assignments in IEEE 802.11 WLANs with efficient spectrum sharing*, in *Wireless Communications and Mobile Computing 2009 and in Wiley InterScience 2008.*, [Online]. Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/wcm.670/pdf> , [Accessed: March 1, 2018].
- [15] M. Haidar, R. Ghimire, H. Al-Rizzo, R. Akl and Yupo Chan, "Channel assignment in an IEEE 802.11 WLAN based on Signal-To-Interference Ratio," in *2008th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, Niagara Falls, pp. 1169-1174, 2008.
- [16] National Instruments, *Introduction to 802.11ax High-Efficiency Wireless*, White Paper, Jul. 2017. [Online] Available: <http://www.ni.com/white-paper/53150/en/> , [Accessed: Jan. 3, 2018].
- [17] Korowajczuk, L. *Wireless Network Design, in LTE, WIMAX and WLAN Network Design, Optimization and Performance Analysis*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK., 2011.
- [18] Cisco Inc., *802.11ac: The Fifth Generation of Wi-Fi Technical White Paper*, Nov. 30, 2017. [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/wireless/aironet-3600-series/white_paper_c11-713103.html, [Accessed: Dec. 31, 2017].
- [19] Aruba Networks, Inc, *Aruba 802.11ac Networks Valiteded Reference Design*, 2015. [Online]. Available: <https://community.arubanetworks.com/aruba/attachments/aruba/Aruba-VRDs/61/1/Aruba%20802.11ac%20Networks%20VRD.pdf> , [Accessed: Dec. 31, 2017].
- [20] Elektrokrajina, [Online]. Available: <http://www.elektrokrajina.com/sr/informacije-zakupce/tarife/kalkulator-potro%C5%A1nje> , [Accessed: Sep. 25, 2017].
- [21] B. Malčić, S. Šajjić and G. Gardašević, "A Dynamic Channel Assignment Algorithm for IEEE 802.11 WLAN," accepted for publication in *17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA*, that will be held in *Bosnia and Herzegovina in March 21st - 23rd*, 2018.
- [22] J. A. Freeman, D. M. Sakapura, *Neural Networks: Algorithms, Applications and Programming Techniques*, Addison-Wesley Publishing Co. Inc, CA, USA, 1991.
- [23] I. Goodfellow, Y. Bengio and A. Courville, *Deep Learning*, MIT Press, 2016.
- [24] B. Malčić, G. Gardašević and S. Šajjić, "A New Algorithm for Energy-Efficient IEEE 802.11 Access Points," *25th TELFOR Conference*, Belgrade, November 21st - 22nd, 2017
- [25] Manikanta Kotaru, Kiran Joshi, Dinesh Bharadia, and Sachin Katti, *SpotFi: Decimeter Level Localization Using WiFi*, in *SIGCOMM Comput. Commun.* pp. 269-282 Aug., 2015. [Online]. Available: <https://web.stanford.edu/~skatti/pubs/sigcomm15-spotfi.pdf> , [Accessed: Jan. 14, 2018].
- [26] Milan M. Šunjevarić, *Radio goniometrija*, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd, 1991.
- [27] T. A. Rahman, R. Adbole, *Smart antenna design*, *Fakulti Kejuruteraan Elektrik, Universiti Teknologi Malaysia*, 2008. [Online]. Available: <http://eprints.utm.my/6664/1/79029.pdf> , [Accessed: Dec. 04, 2017].
- [28] A Cobham company, *Development of Smart Antenna Technology*, Final Report, Aug., 2006. [Online]. Available: https://www.ofcom.org.uk/data/assets/pdf_file/0014/36014/smartpres1.pdf, [Accessed: Nov. 28, 2017].

- [29] National Instruments, *AntSyn: Antenna Synthesis Module*, Jan. 10, 2018.[Online]. Available:<http://www.awrcorp.com/products/additional-products/antsyn-antenna-synthesis-module>, [Accessed: Jan. 11, 2018].
- [30] Branko Popović, *Elektromagnetika*, Građevinska knjiga, Beograd, 1980.
- [31] Bassem R. Mahafza and Atef Z. Elsherbeni, *MATLAB Simulations for Radar Systems Design*, CHAPMAN&HALL, New York, 2004.
- [32] The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., *IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements: Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Std 802.11™-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)*, IEEE Computer Society, Printed in USA, 2016.
- [33] A. B. Makhlof and M. Hamdi, "Dynamic multi-user access scheme for IEEE 802.11 WLAN channels," in *International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Nicosia, pp. 18-23, 2014.
- [34] V. Sokolov, A. Carlsson and I. Kuzminykh, "Scheme for dynamic channel allocation with interference reduction in wireless sensor network," in *4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkov, Ukraine, p. 565, 2017.
- [35] P. Hinić, V. Risojević and A. Zagorac, *Procesiranje signala*, Elektrotehnički fakultet, str. 139., Banja Luka, 2000.
- [36] Zyxel Corp., *WAC6500 Series 802.11ac Dual Radio Unified Pro Access Point*, [Online]. Available: ftp://ftp2.zyxel.com/WAC6503D-S/datasheet/WAC6503D-S_12.pdf , [Accessed: Nov. 30, 2017].
- [37] S. Chiaravalloti, F. Idzikowski, Ł. Budzisz, *Power consumption of WLAN network elements*, Technische Universität Berlin - Telecommunication Networks Group, Berlin, 2011.

БИОГРАФИЈА

Борис Малчић је рођен 02.06.1987. године у Бања Луци. Основну и средњу Електротехничку школу „Никола Тесла“ у Бањој Луци је завршио с одличним успјехом. Током основношколског и средњошколског образовања добивао је признања за наставне и ваннаставне активности, представљао школу на такмичењима из математике и физике, био најбољи ученик на смјеру техничар електронике и добио награду за најбољег друга у генерацији. Школске 2006/07. године је уписао Електротехнички факултет у Бањој Луци гдје је у току студија био једну годину и на одсјеку за рачунарство и информатику, а проглашен је на 2. и 3. години студија за најбољег студента на студијском одсјеку за електронику и телекомуникације. У току школовања био је стипендиста фонда Петар Кочић од Града Бања Лука, Министарства просвјете и културе Републике Српске и ЈП Телекомуникације Републике Српске (компанија М:tel).

Завршио је основне студије 2012. године одбраном дипломског рада под називом „Принципи пројектовања оптичких мрежа нове генерације“. Просјечна оцјена на основном циклусу студија је износила 9,02.

На Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци, уписао је 2. циклус студија у фебруару 2014. године. Положио је све предвиђене испите са оцјеном десет, а кандидат посједује и положене стручне испите из области електротехнике и рада наставника у просвјети. Такође, члан је Савеза иноватора Републике Српске и IEEE организације.

За све своје награде, идеје и резултате у досадашњем животу и раду, Борис Малчић дугује од рођења непроцењиву захвалност милости и благослову свемогућег Господа Бога.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је
мастер/магистарски рад

Наслов рада „ПРИЈЕДЛОГ АЛГОРИТМА ЗА ОПТИМИЗАЦИЈУ ПАРАМЕТАРА ПРЕНОСА У IEEE 802.11 МРЕЖАМА“.

Наслов рада на енглеском језику „PROPOSAL OF ALGORITHM FOR OPTIMIZING TRANSMISSION PARAMETERS IN IEEE 802.11 NETWORKS.“.

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да мастер/магистарски рад, у цјелини или у дијеловима, није био предложен за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Бањој Луци, 10.04.2018.

Потпис кандидата

Малчић Борис

Изјава којом се овлашћује ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ факултет/ Академија умјетности
Универзитета у Бањој Луци да мастер/магистарски рад учини јавно доступним

Овлашћујем Електротехнички факултет/ Академију умјетности Универзитета у Бањој
Луци да мој мастер/магистарски рад, под насловом

"Приједлог алгоритма за оптимизацију параметара
преноса у IEEE 802.11 мрежама"

који је моје ауторско дјело, учини јавно доступним.

Мастер/магистарски рад са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату,
погодном за трајно архивирање.

Мој мастер/магистарски рад, похрањен у д и г и т а л н и р е п о з и т о р и ј у м Универзитета
у Бањој Луци, могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце
Креативне заједнице (*Creative Commons*), за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство - некомерцијално - без прераде
4. Ауторство - некомерцијално - дијелити под истим условима
5. Ауторство - без прераде
6. Ауторство - дијелити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је
на полеђини листа).

У Бањој Луци, 10.04.2018.

Потпис кандидата

Малчић Борис

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ПОДАЦИ О АУТОРУ ОДБРАЊЕНОГ МАСТЕР/МАГИСТАРСКОГ РАДА

Име и презиме аутора мастер/магистарског рада: **Борис Малчић**

Датум, мјесто и држава рођења аутора: **02.06.1987. год., Бања Лука, Социјалистичка Федеративна Република Југославија**

Назив завршеног факултета/Академије аутора и година дипломирања:

Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци, 2012. година.

Датум одбране завршног/дипломског рада аутора: **17.04.2012.** (Васкршњи уторак)

Наслов завршног/дипломског рада аутора:

Принципи пројектовања оптичких мрежа нове генерације

Академско звање које је аутор стекао одбраном завршног/дипломског рада:

Дипломирани инжењер електротехнике – 240 ЕЦТС

Академско звање које је аутор стекао одбраном мастер/магистарског рада:

Магистар електронике и телекомуникација

Назив факултета/Академије на коме је мастер/магистарски рад одбрањен:

Електротехнички факултет Универзитета у Бањој Луци

Наслов мастер/магистарског рада и датум одбране

Приједлог алгоритма за оптимизацију параметара преноса у IEEE


802.11 мрежама, 10.04.2018. (Васкршњи уторак)

Научна област мастер/магистарског рада према CERIF шифрарнику: **T 180**

Имена ментора и чланова комисије за одбрану мастер/магистарског рада: **проф. др**

Гордана Гардашевић, доц. др Славко Шајић и доц. др Дино Косић

У Бањој Луци, дана 10.4.2018.

Декан


УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
Патре 5
78000 Бања Лука

УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
БАЊА ЛУКА

Број: 199

Датум: 8.3.2018.

Др Славко Шајић, доцент
Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет

Др Гордана Гардашевић, ванредни професор
Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет

Др Дино Косић, доцент
Универзитет у Бањој Луци, Електротехнички факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВИЈЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БАЊОЈ ЛУЦИ

На основу одлуке Наставно-научног вијећа Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци, број 20/3.1362-1377/17 од 16.11.2017. године, именовани смо за чланове Комисије за завршни рад II циклуса студија кандидата Бориса Малчића, дипл. инж. електротехнике, под називом "Приједлог алгоритма за оптимизацију параметара преноса у IEEE 802.11 мрежама". Након прегледа приложеног рада, подносимо сљедећи

ИЗВЈЕШТАЈ

1. БИОГРАФСКИ ПОДАЦИ КАНДИДАТА

Борис Малчић је рођен 02.06.1987. године у Бањој Луци. Основну школу је завршио 2002. године у Бањој Луци, а 2006. године средњу ЈУ Електротехничку школу „Никола Тесла“, Бања Лука. Школске 2006/07. године је уписао Електротехнички факултет у Бањој Луци. У току студија је учествовао на студентском такмичењу Електријада. Проглашен је за најбољег студента на другој/трећој години студија (школске 2009/10. год.) на Одсеку за Електронику и телекомуникације. У току школовања био је стипендиста фонда Петар Кочић, Министарства просвјете и културе Републике Српске и компаније M:tel.

Студије првог циклуса је завршио 17. априла 2012. године, одбраном дипломског рада под називом „*Принципи пројектовања оптичких мрежа нове генерације*“. Просјечна оцјена у току студија је износила 9,02. Студије 2. циклуса је уписао у фебруару 2014. године. Положио је све испите предвиђене студијским програмом са просјечном оцјеном 10,00. Кандидат посједује положене стручне испите из области електротехнике и рада наставника у просвјети.

Кандидат је до сада објавио сљедеће радове:

- [1] B. Malčić, G. Gardašević and S. Šajić, "A New Algorithm for Energy-Efficient IEEE 802.11 Access Points," 25th TELFOR Conference, Belgrade, November 21st - 22nd, 2017.
- [2] B. Malčić, S. Šajić and G. Gardašević, "A Dynamic Channel Assignment Algorithm for IEEE 802.11 WLAN," accepted for publication in 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, March 21st - 23rd, 2018.

2. ОСНОВНИ ПОДАЦИ О РАДУ

Завршни рад II циклуса студија кандидата Бориса Малчића, дипл. инж. електротехнике, под називом "Приједлог алгорита за оптимизацију параметара преноса у IEEE 802.11 мрежама", садржи 71 нумерисану страницу, са 38 слика и 3 табеле, а организован је у сљедеће цјелине:

Предговор

1. Увод
2. Преглед постојећих рјешења
3. Поступак планирања IEEE 802.11 WLAN
4. Мјерења у WLAN и приједлог DCA
5. TCRFF алгоритам
6. Паметне WLAN антене
7. Закључак

Прилог

Списак коришћене литературе садржи 37 извора. Рад садржи и списак табела и слика, а у прилогу је дат изворни код реализованих функција.

3. АНАЛИЗА РАДА

У предговору и уводном дијелу рада су образложени основни циљеви истраживања који се односе на оптимизацију преноса у условима динамичког окружења, на бази математичког моделовања промјена тока података и просторног распореда клијената у IEEE 802.11 WLAN. Полазећи од основних проблема у раду бежичних телекомуникационих мрежа, посебно узимајући у обзир појаву интерференције, указано је на значај развоја алгоритама за обезбјеђивање оптималних вриједности преносних и мрежних параметара, а посебно: ефективне брзине преноса - протока, минималне вјероватноће битске грешке и енергетских захтјева у раду телекомуникационе мреже. Рјешавање ових проблема представља изазов у којем је побољшање квалитета преноса и перформанси од посебног значаја за функционисање и пружање услуга у IEEE 802.11 мрежи.

У другом поглављу је дат преглед постојећих рјешења и досадашњих остварених резултата у области оптимизације параметара преноса. Наведени су познати алгоритми и стратегије које се користе за повећање енергетске ефикасности и смањење утицаја интерференције при WLAN преносу. Образложен је значај и могућности које пружа техника усмјеравања зрачења антена (енг. beamforming) и примјена паметних антена (енг. smart antennas) у циљу унапређења перформанси коришћених WAP (енг. Wireless Access Point).

Треће поглавље даје преглед значајних корака и активности у планирању IEEE 802.11 WLAN. Детаљно су анализирани поступци који су неопходни за успјешан дизајн IEEE 802.11 мреже, а који подразумијевају сљедеће: планирање (одређивање захтјева апликација и уређаја за пропусним опсегом, подржаним протоколима, фреквенције, уговор о нивоу услуга, итд.), дизајн (одређивање густине и величина ћелија, избора антена, покривености, истраживање локације, итд.), имплементација (инсталирање, мониторинг - контрола важнијих параметара мреже, тестирање, подешавање, итд.), оптимизација (надзор, извјештавање, прилагођење, провјеравање испуњености SLA, итд.), управљање (праћење перформанси, надгледање капацитета саобраћаја и броја корисника, итд.).

У четвртом поглављу су приказани резултати мјерења активности клијената у WLAN на Електротехничком факултету у Бањој Луци, добијена помоћу управљачког софтвера UniFi 5.4.11. Приказани су и резултати мјерења добијени коришћењем мјерног инструмента Narda SRM-3006, те примјеном апликација WiFi Analyzer и Ekahau HeatMapper. На основу извршених мјерења у реалном окружењу, анализиран је утицај сусједне и ко-каналне интерференције. Представљени су резултати примјене предложеног DCA (енг. Dynamic Channel Assignment/Allocation) алгоритама.

У петом поглављу је представљен начин рада предложеног TCRFFA (енг. Traffic Clients Received Signal Strength Indicator Flow Filling Algorithm) алгоритама за повећање енергетске ефикасности у WLAN. Овај алгоритам је заснован на примјени интерполације и математичког моделовања интензитета промјене количине пренесених података у току времена код WLAN. Приказан је дијаграм тока TCRFFA, као и поједини кораци софтверске

имплементације у Matlab-у. Представљен је резултат примјене TCRFFA у смислу процентуалног повећања енергетске ефикасности, за одговарајуће временске периоде.

Шесто поглавље садржи опис предложене хардверске и софтверске имплементације паметне WLAN антене која је погодна за практичну примјену предложених алгоритама за оптимизацију. Тестиран је утицај реда модулације, ширине канала, удаљености клијената, броја предајних и пријемних антена и модела пропагационог канала на вриједност EVM, на бази симулација са модификацијом уграђених параметара и примјера WLAN модела доступних у Matlab-у.

Седмо поглавље даје преглед основних резултата и доприноса рада, као и правац будућих истраживања у овој области.

4. НАЈВАЖНИЈИ ДОПРИНОСИ

Најважнији доприноси овог рада су:

- Приједлог и реализација оригиналних алгоритама за динамичку алокацију Wi-Fi канала (DCA алгоритам) и повећање енергетске ефикасности рада WAPs на основу примјене TCRFFA алгоритма. Предложеним алгоритмима је практично показано да се може смањити утицај сусједне каналне интерференције, уз повећање енергетске ефикасности.
- У циљу оптимизације, предложена је имплементација паметне WLAN антене за коју је изведен математички модел за управљање и извршена додатна анализа у антенском синтетизатору AntSyn.
- Са циљем оптималне примјене beamforming-a, предложена је и софтверски имплементирана поједностављена радио-локација клијената у WLAN која омогућава подршку diffServ QoS (енг. Quality of Service) областима покривања WLAN сигналом. Симулацијом је показано да предложена рјешења значајно смањују EVM (енг. Error Vector Magnitude), односно значајно побољшавају QoS.
- Дата је анализа EVM у зависности од примјењеног реда M-QAM, на основу које је потврђена оправданост примјене beamforming-a и практична употребљивост предложене паметне WLAN антене, неопходне за ефикасну практичну употребу предложених DCA и TCRFFA.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРИЈЕДЛОГ

На основу прегледа и анализе урађеног завршног рада II циклуса студија кандидата Бориса Малчића, дипл. инж. електротехнике, под називом "Приједлог алгоритма за оптимизацију параметара преноса у IEEE 802.11 мрежама", Комисија констатује да рад садржи све потребне елементе и резултате којима су остварени постављени циљеви истраживања.


Кандидат је, на бази теоријске анализе, дефинисао једно од могућих алгоритамских рјешења за смањење Wi-Fi каналне интерференције и повећање енергетске ефикасности рада WAPs. Резултате истраживања кандидат је презентовао у публикованим радовима из дефинисане области. Такође, кандидат је верификовао резултате истраживања поређењем са доступним резултатима у литератури. Понуђено рјешење представља квалитетну основу за даљу надоградњу са циљем реализације комплетне софтверске платформе за подршку функционисању WAPs при динамичким условима рада у WLAN.

На основу укупне оцјене, Комисија предлаже Наставно-научном вијећу Електротехничког факултета у Бањој Луци да усвоји овај Извјештај и одобри кандидату Борису Малчићу, дипл. инж. електротехнике, усмену јавну одбрану завршног рада II циклуса студија под називом "Приједлог алгоритма за оптимизацију параметара преноса у IEEE 802.11 мрежама".

У Бањој Луци, 7. март 2018. године

Комисија:

Доц. др Славко Шајић, предсједник



Проф. др Гордана Гардашевић, ментор



Доц. др Дино Косић, члан