



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Vilius Palubinskas

WMM (802.11E) PASLAUGŲ KOKYBĖS REALIOMIS
SĄLYGOMIS TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. dr. Tomas Adomkus

KAUNAS, 2015

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
TELEKOMUNIKACIJŲ KATEDRA

WMM (802.11E) PASLAUGŲ KOKYBĖS REALIOMIS
SĄLYGOMIS TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Išmaniosios telekomunikacijų technologijos (621H64001)

Vadovas

Doc. dr. Tomas Adomkus

Recenzentas

Prof. dr. Dangirutis Navikas

Projektą atliko

Vilius Palubinskas

KAUNAS, 2015



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

(Fakultetas)

(Studento vardas, pavardė)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Pavadinimas“ AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Viliaus Palubinsko** baigiamasis projektas tema „WMM (802.11e) paslaugų kokybės realiomis sąlygomis tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Palubinskas, V. WMM (802.11e) paslaugų kokybės realiomis sąlygomis tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Tomas Adomkus; Kauno technologijos universitetas, elektros ir elektronikos fakultetas, telekomunikacijų katedra.

Kaunas, 2015. 49 psl.

SANTRAUKA

Darbe nagrinėjama 802.11n standarte naudojama WMM (802.11e) prieigos kategorijas naudojanti funkcija. Atliekama prieigos kategorijų analizė. Eksperimentiškai nustatoma prieigos kategorijų daroma įtaka kiekybiniais ir kokybiniais parametrai tiriant VoIP ir TCP duomenų perdavimo paslaugas. Šios paslaugos tiriamos su skirtingomis prieigos kategorijomis ir paslaugos vartotojų kiekiu. Remiantis tyrimo rezultatais pasiūlomi WMM protokolo parametrų pakeitimai

WMM, 802.11e, EDCA, QoS

Palubinskas, Vilius. WMM (802.11e) Quality of Service Research in Real Environment. Final project of master / supervisor doc. dr. Tomas Adomkus; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of . Telecommunications.

Kaunas, 2015. 49 psl.

SUMMARY

In research is analyzed WMM (802.11e) distributed channel access function which is used in 802.11n standard. Access categories research is performed. Real time VoIP and TCP data transfers services quality is experimentally measured Access categories impact to real time VoIP and TCP data transfers services quality are experimentally measured. Research are performed on different access categories and clients number. After analyzing research results are made suggestion for WMM's protocol's parameters changes.

WMM, 802.11e, EDCA, QoS

Turinys

Sutrumpinimų sąrašas	6
Įvadas	8
1. Problematikos analizė	9
2. Pagrindiniai realaus laiko ir nerealaus laiko paslaugų kokybiniai parametrai	12
3. Belaidžio 802.11 specifika	15
3.1. 802.11 MAC polygmenio funkcijos	16
3.2. WMM (802.11e) veikimo principai	18
3.3. 802.11 tinkluose pasireiškianti interferencija	20
3.4. 802.11 tinklų interferencijos mažinimas	22
4. Tinklo, naudojančio WMM protokolą, tyrimas	23
4.1. WMM protokolo tyrimo schema ir įranga	23
4.2. Realios aplinkos įtaka tyrimo rezultatams	26
4.3. WMM prieigos kategorijų srautų tyrimo rezultatai	29
4.4. Siūlomi WMM protokolo parametų pakeitimai	34
Išvados	46
Literatūros sąrašas	47

Sutrumpinimų sąrašas

AC_BE	WMM geriausių pastangų prieigos kategorija
AC_BK	WMM foninė prieigos kategorija
AC_VI	WMM IPTV prieigos kategorija
AC_VO	WMM VoIP prieigos kategorija
ACK	patvirtinimo pranešimas (angl. <i>Acknowledgment</i>)
AIFS	sutartinio vidinio kadro laiko tarpas (angl. <i>Arbitrary Inter-Frame Space</i>)
AIFSN	sutartinio vidinio kadro laiko tarpo numeris (angl. <i>Arbitrary Inter-Frame Space Number</i>)
APU	spartintas skaičiavimo procesorius (angl. <i>Accelerated Processing Unit</i>)
BlueTooth	belaidžio ryšio technologija veikianti mažais atstumais
BPSK	dvejetainė fazės manipuliacija (angl. <i>Binary Phase Shift Keying</i>)
CSMA/CA	nešlio aptikimas daugybinėje prieigoje su kolizijos išvengimu (angl. <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>)
CTS	„laisva“ siųsti (angl. <i>Clear To Send</i>)
DCF	paskirstytasis režimas (angl. <i>Distributed Coordination Function</i>)
DIFS	paskirstytas vidinio kadro laiko tarpas (angl. <i>Distributed Inter-Frame Space</i>)
DSCP	IP paketo antraštės laukas nurodantis QoS klasę
DSSS	tiesioginės sekos spektro plėtimas (angl. <i>Direct-Sequence Spread Spectrum</i>)
EDCA	patobulinta paskirstyto koordinavimo funkcija (angl. <i>Enhanced distributed channel access</i>)
G.711	garso suspaudimo metodika naudojama VoIP
HCCA	hibridinio koordinavimo kanalo prieiga (angl. <i>Hybrid Coordination Controlled Channel Access</i>)
IPTV	telekomunikacinė sistema skirta transliuoti ir priimti televizinius signalus IP tinkluose (angl. <i>Internet Protocol Television</i>)
ITU-T	tarptautinės telekomunikacijų unijos standartizavimo sektorius (angl. <i>ITU Telecommunication Standardization Sector</i>)
LLC	loginio sujungimo kontrolės posluoksnis (angl. <i>Logical Link Control</i>)
MAC	terpės prieigos kontrolė (angl. <i>Media Access Control</i>)
MIMO	kelių įėjimų, kelių išėjimų (angl. <i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>)

NAV	tinklo paskyrimo skaitliukas (angl. <i>Network Allocation Vector</i>)
NS	tinklo simulatorius (angl. <i>Network Simulator</i>)
OFDM	ortogonalaus dažnio tankinimas (angl. <i>Orthogonal frequency-division multiplexing</i>)
OSI	atvirasis sistemų tarpusavio sąsajų modelis (angl. <i>Open Systems Interconnection model</i>)
PCF	centralizuotos funkcijos režimas (angl. <i>Point Coordination Function</i>)
PLCP	fizinio lygmens konvergencijos procedūra (angl. <i>Physical Layer Convergence Procedure</i>)
QoS	Paslaugų (aptarnavimo) kokybė (angl. <i>Quality of Service</i>)
QPSK	kvadratūriškai manipuluojamoji fazė (angl. <i>Quadrature phase-shift keying</i>)
RTS	prašymas perduoti (angl. <i>Request To Send</i>)
SIFS	trumpo vidinio kadro laiko tarpas (angl. <i>Short Inter-frame Space</i>)
SISO	vieno įėjimo, vieno išėjimo (angl. <i>Single-input single-output</i>)
SNR	signalas triukšmas santykis (angl. <i>Signal-to-noise ratio</i>)
TCP	perdavimo kontrolės protokolas (angl. <i>Transmission Control Protocol</i>)
TXOP	perdavimo galimybė (angl. <i>Transmission Opportunity</i>)
UDP	naudotojo deitagramų protokolas (angl. <i>User Datagram Protocol</i>)
UDP	naudotojo deitagramų protokolas (angl. <i>User Datagram Protocol</i>)
VCS	virtualus nešlys (angl. <i>Virtual Carrier Sensing</i>)
VoIP	telefonija per IP tinklą (angl. <i>Voice over IP</i>)
WiMAX	pasaulinė mikrobangų prieigos sąveika (angl. <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>)
WMM	WiFi multimedia (angl. <i>Wi-Fi Multimedia</i>)

Įvadas

Didėjant mobilių įrenginių kiekiui, kartu didėja poreikis tuos įrenginius prijungti prie duomenų perdavimo tinklų. Šiuo metu dažniausiai prieigos tinkluose naudojama belaidžio ryšio WiFi infrastruktūra. WiFi tinklas naudoja nelicencijuotus dažnius, kurių naudojimas yra prieinamas kiekvienam turinčiam WiFi stotelę ir mobilius įrenginius. Kol stotelių aplinkoje yra keletas tinklas veikia kaip iš jo tikimasi, tačiau jeigu aplinkoje atsiranda ne keletas WiFi stotelių, o žymiai daugiau galima pasiekti tokia situacija, jog tinklas veiks prastai. Todėl WiFi technologijos tobulinimas yra nuolatinis procesas. Pirmiesiems standartams iššūkis buvo didinti perdavimo spartas, vėliau imta didinti pačio tinklo kokybinius parametrus. Šiuo metu 802.11n ir tolimesni WiFi standartai naudoja WMM protokolą, kurio pagalba siekiama pagerinti QoS veikimą WiFi tinkle.

Dažniausiai sutinkami autorių darbai buvo susiję su QoS paslaugų tyrimu laboratorijose. Autorių [1-5] darbuose tiriami senesni 802.11 standartą naudojantys WiFi tinklai. Svarbu paminėti jog dažniausiai tyrimai atliekami laboratorijos sąlygose, kurios retai atitinka realias. Tyrimuose naudojamos įvairios realaus laiko paslaugos kaip VoIP, IPTV. Todėl tyrimas atliekamas sąlygose kuo artimesnėmis, kurias galima sutikti besinaudojant aplinkoje su dideliu kiekiu WiFi stotelių ir mobilių įrenginių. Tyrimo metu norima nustatyti WMM prieigos kategorijų veikimą su įvairiomis paslaugomis esant realiai aplinkai. Išsikeltas **darbo tikslas** - pagerinti 802.11n standarto QoS valdymą pasitelkiant 802.11e modifikacijas.

1. Problematikos analizė

Vis labiau populiarėjant belaidžiams įrenginiams, dirbantiems 802.11 standartu, atsiranda problemų naudojant realaus laiko ir duomenų perdavimo paslaugas. Ši problema egzistuoja kiekviename tinkle, tačiau dėl WiFi standarte naudojamo prieigos mechanizmo prie fizinio lygmens iškyla nauji iššūkiai. WiFi tinklas visiems vartotojams, nepriklausomai nuo jų siunčiamų srautų, suteikia lygias galimybes tinkle, kas sutrikdo realaus laiko paslaugų veikimą, pvz., bylos siuntimas reikalauja iš tinklo didelio pralaidumo, tačiau nekelia reikalavimo vėlinimui, kitaip nei VoIP skambutis, kuris nereikalauja didelės spartos, tačiau imlus vėlinimui ir jo fluktuacijoms. Taigi pagrindinės paslaugos kokybės problemos atsiranda [1] dėl mažo duomenų pralaidumo, srautų klasifikacijos nebuvimo ir bendros ryšio terpės panaudojimo. 2005 metais WiFi aljansas patvirtino paslaugos kokybės valdymo 802.11e standartą [2], kuriame patvirtina naujo tipo funkcija, atsakinga už prieigą prie fizinio kanalo. Naujoji EDCA (angl. *Enhanced Distributed Channel Access*) funkcija aprašo keturias srautų klases, kurias turi skirtingus prioritetus. Prioritetizavimas įgalina realaus laiko paslaugų kokybės valdymą ir leidžia išvengti ankstesnių problemų. Kiekviena srautų klasė turi tik jai būdingas parametrų reikšmes, kurių pagalba ir yra atliekamas prioritetizavimas. Suteikiant skirtingas parametrų reikšmes kinta paties tinklo veikimo charakteristikos. WMM yra 802.11n standarto dalis. Darbe pasirinktas tyrimo objektas yra tinklas, dirbantis 802.11n standartu, kuriame teikiamos duomenų perdavimo ir VoIP paslaugos, bei pats tiriamas tinklas yra veikiamas aplinkoje veikiančių kitų WiFi tinklų.

Autoriai [3-5], tirdami 802.11e prioritetizavimo srautų parametrų analizę, savo darbuose naudojo 802.11b fizinio lygmens standartą. Dažniausiai naudojami modeliavimo įrankiai OPNET, NS2 ir NS3. [5-7] Šių modeliavimo įrankių pagalba autoriai galėjo modeliuoti tinklus, keisti 802.11e standarte aprašytus parametrus ir tirti jų įtaką tinklo veikimui.

Atlikdami eksperimentus [8] autoriai naudojo vienodos konfigūracijos įrangą, tačiau gaudavo skirtingus matavimų rezultatus ir, kaip patys autoriai teigia, yra sudėtinga nustatyti ir išmatuoti vienodus pralaidumus, esant tokioms pat sąlygoms. Todėl atlikti eksperimentus tikslinga kelis kartus ir naudotis vidutinėmis reikšmėmis. Atliekamuose eksperimentuose [3, 8] naudojamos MadWiFi aparatinės įrangos tvarkyklės, kurių pagalba galima keisti 802.11e protokolo parametrus ir taip atlikti tyrimus. Tai apsunkina eksperimentus, nes reikia naudoti įrangą, kurioje veiktų minėtos tvarkyklės, kurios nepalaiko naujos aparatinės įrangos, dirbančios 802.11n standartu.

Iš šaltinio [8] autorių atliktų eksperimentų rezultatų matyti, jog siunčiant iš vartotojų stotelių į prieigos tašką UDP transportinio protokolo srautus visų vartotojų greitaveikos pasiskirstę beveik tolygiai, tačiau naudojant TCP protokolą vartotojų greitaveikos išsiskyrė, t.y., buvo nevienodos. Tačiau panaudojus 802.11e protokolą ir naudojant TCP transportinį protokolą buvo

panaikintas vartotojų gaunamos greیتaveikos netolygumas – visi vartotojai gavo apytiksliai po vienodą pralaidumą, nes buvo pagerintas TCP ACK paketų perdavimas tinkle. Todėl svarbu atkreipti dėmesį į naudojamų protokolų specifiką, nes tai gali turėti didelę įtaką eksperimento metu gautiems rezultatams ir tolesnėms išvadoms. Keisdami 802.11e parametrus tokius, kaip TXOP, CWmin ir AIFS, tarp vartotojų gaunamų greیتaveikų žymaus skirtumo naudojant standartines parametrų reikšmes, nepastebėta.

Autoriaus [9] darbe nagrinėjama situacija, esant „nematomos stotelės“ problemai (persidengia ryšio kanalai), kuriai esant 802.11e protokolas veikia neefektyviai. Taip pat autorius nustatė, jog didėjant prioritetui didėja kolizijos tikimybė. Sprendimui siūlo naudoti „RTS/CTS“ mechanizmą, tačiau taip padidinamas kontrolinių kadru kiekis tinkle, o dėl to nukenčia suminis prieigos taško pralaidumas. Kiti autoriai [5] kaip tik prieštarauja, jog „RTS/CTS“ mechanizmo naudojimas turint aukščiausių prioritetų srautus (Vo ir Vi) nepagerina QoS sąlygų, o esant išjungtam mechanizmui pagerina BE ir BK srautų pralaidumus, nepadarant aukštesnių prioritetų srautams įtakos. Sprendžiant iš šių autorių darbų, „RTS/CTS“ mechanizmas nėra esminis kai naudojame 802.11e protokolą.

Autoriai [4] siūlo sprendimą, kuris leidžia sumažinti „nematomos stotelės“ įtaką tinklui, panaudojant 802.11e protokolą, įvedant papildomą apklausimo schemą, kurios pagalba prieigos taškas skirsto prieigą prie kanalo. Taip sumažindamas arba visiškai panaikindamas "nematomos stotelės" problemą. Pritaikant autoriaus sprendimą gaunama iki 40% didesnė greیتaveika WiFi tinkle nei naudojant įprastą 802.11e, tačiau įvedami papildomi valdymo pranešimai. Dėl šių papildomų valdymo pranešimų atsiradimo reikia padaryti pakeitimus įrangoje.

Kiti autoriai [10] problemą sprendžia įvesdami dinامينius 802.11e parametrų pakeitimus, kurie būna esant kritinei situacijai, pvz. esant per didėliam vienos realaus laiko paslaugos prioriteto srautui, taip padidinant kitų prioritetų srautų parametrų reikšmes. Modeliavimo metu nustatė, jog šis metodas efektyviai sumažina realaus laiko paslaugų vėlinimą ir padidina pralaidumą.

Autoriai [6] persidengiančių prieigos taškų problemą sprendžia įvesdami koordinavimą tarp aplinkui esančių persidengiančių prieigos taškų. Taip kontroliuojamame tinkle yra sumažinama "nematomos stotelės" problema, ir pagerinamas QoS valdymas. Tačiau toks valdymas įmanomas tik turint homogenišką tinklą, be kitų nekontroliuojamų prieigos taškų.

Galimybė teikti QoS valdymą tinkle, kuris dirba persidengdamas su kitu, yra analizuojamas [11] autorių darbe. Jie pateikia 802.11e HCCA mechanizmo patobulinimą, kuriame įdiegiamas papildomas deterministinis laukimo intervalas, leidžiantis sumažinti "nematomos stotelės" įtaką tinklui. Vėlgi reikalingi pakeitimai aparatinėje įrangoje.

Apibendrinant, 802.11e protokolas su įprastomis parametru reikšmėmis negarantuoja QoS valdymo, esant persidengiančioms stotelėms ir „nematomoms stotelėms“. QoS suvaldyti reikalingi ne tik parametru pakeitimai, bet ir reikalaujama papildomų funkcijų ir parametru įdiegimo. Taigi reikalingas kompleksinis sprendimas, kuris tenkintų realaus laiko paslaugų valdymą, esant realioms sąlygoms.

Darbo tikslas - pagerinti 802.11n standarto QoS valdymą pasitelkiant 802.11e modifikacijas.

Darbo uždaviniai:

1. pateikti pagrindinius paslaugų kokybės parametrus, remiantis moksliniais straipsniais ir publikacijomis;
2. išnagrinėti 802.11e standarto kokybės prioritetizavimo metodiką ir parametru įtaką įvairioms paslaugoms;
3. ištirti duomenų perdavimo ir VoIP paslaugų kokybės veikimą esant persidengiantiems kanalams 802.11n standarto ir veikiant 802.11e protokolo eilėms;
4. pasiūlyti 802.11e protokolo prieigos kategorijų pakeitimus, kurie pagerintų 802.11n veikimą.

2. Pagrindiniai realaus laiko ir nerealaus laiko paslaugų kokybiniai parametrai

Norint tirti ir nustatyti WMM standarto veikimą tinkle, reikia išskirti svarbiausius paslaugos kokybės aspektus ir tinkle dažniausiai naudojamas paslaugas, kurioms būtų nustatoma įtaka. IP tinkluose perduodami duomenys, kuriuose gali būti saugoma realaus laiko garsinė ir vaizdinė informacija. Kiekvienai duomenų rūšiai yra keliami skirtingi reikalavimai tinklo parametrams. Pagrindiniai tinklo našumo parametrai išskiriami šie: tinklo duomenų pralaidumas, paketų vėlinimas ir paketų vėlinimo fluktuacijos bei paketų praradimas tinkle. Tam, kad nereiktų papildomai nustatinėti šių parametru pasinaudojama ITU-T Rec. G.1010 (11/2001) rekomendacijos siūlomais parametrais ir jų reikšmėmis. 2.1 lentelėje pateikiami paslaugų teikiamų paketiniais tinklais, pagrindinių tinklo našumo parametru duomenys pagal rekomendaciją.

2.1 lentelė. Realaus laiko paslaugų kokybiniai parametrai pagal ITU-T Rec. G.1010 (11/2001) rekomendaciją [12]

	Paslauga	Dialogo reikalavimas	Tipinė duomenų perdavimo sparta, kb/s	Pagrindiniai našumo parametrai ir jų vertės			
				Vienkryptis vėlinimas	Vėlinimo fluktuacijos, ms	Paketų praradimas, %	Kiti
Balsas	Pokalbis	dvikryptis	4—64	< 150 ms, galimas iki 400 ms	< 1	< 3	
Balsas	Balso pranešimai	Dažniausiai vienkryptis	4-32	< 1s išklausymui, < 2s įrašymui	< 1	< 3	
Balsas	Aukštos kokybės garso transliacija	Dažniausiai vienkryptis	16-128	< 10 s	<< 1ms	< 1	

2.1 lentelė. (tęsinys) Realaus laiko paslaugų kokybiniai parametrai pagal ITU-T Rec. G.1010 (11/2001) rekomendaciją [12]

	Paslauga	Dialogo reikalavimas	Tipinė duomenų perdavimo sparta, kb/s	Pagrindiniai našumo parametrai ir jų vertės			
				Vienkryptis vėlinimas	Vėlinimo fluktuacijos, ms	Paketų praradimas, %	Kiti
Vaizdas	Vaizdo telefonas	Dvikryptis	16-384	< 150 ms, galimas iki < 400 ms		< 1	Lupų sinchronizacija su garsu < 80 ms
Vaizdas	Vienkryptis	Vienkryptis	16-384	< 10 s		< 1	

Toje pačioje rekomendacijoje pateikiami nerealaus laiko parametrai – 2.2 lentelė.

2.2 lentelė. Nerealaus laiko paslaugų kokybiniai parametrai pagal ITU-T Rec. G.1010 (11/2001) rekomendaciją [12]

Paslauga	Dialogo reikalavimas	Tipinis duomenų kiekis	Pagrindiniai našumo parametrai ir jų vertės	
			Vėlinimas	Duomenų praradimas
Tinklapių naršymas-HTML	Vienkryptis	~ 10 kB	< 2 s – pageidautinas, < 4 s - priimtinas	neleistinas
Įprastas duomenų perdavimas	Vienkryptis	10 kB-10 MB	< 15 s – pageidautinas, < 60 s - leistinas	neleistinas
Transakcijos	Dvikryptis	< 10 kB	< 2 s – pageidaujamas, < 4 s priimtinas	neleistinas

2.2 lentelė. (tęsinys) Nerealus laiko paslaugų kokybiniai parametrai pagal ITU-T Rec. G.1010 (11/2001) rekomendaciją [12]

Paslauga	Dialogo reikalavimas	Tipinis duomenų kiekis	Pagrindiniai našumo parametrai ir jų vertės	
			Vėlinimas	Duomenų praradimas
Nuotraukos peržiūra	Vienkryptis	< 100 kB	< 15 s – pageidautinas, < 60 s priimtinas	neleistinas
Valdymo komandos	Dvikryptis	~ 1 kB	< 250 ms	neleistinas
Interaktyvus žaidimas	Dvikryptis	< 1 kB	< 200 ms	neleistinas
Telnet	Dvikryptis (asimetrinis)	< 1 kB	< 200 ms	neleistinas
El. paštas (serverio prieiga)	Vienkryptis	< 10 kB	< 2 s – pageidautinas, < 4 s priimtinas	neleistinas
El. paštas (tarp serverių)	Vienkryptis	< 10 kB	Iki kelių minučių	neleistinas
Faksas (realiame laike)	Vienkryptis	~ 10 kB	< 30 s/lapui	< 10 ⁻⁶ BER
Faksas (priimti ir persiųsti)	Vienkryptis	~ 10 kB	Iki kelių minučių	< 10 ⁻⁶ BER
Žemo prioriteto transakcijos	Vienkryptis	< 10 kB	< 30 s	neleistinas

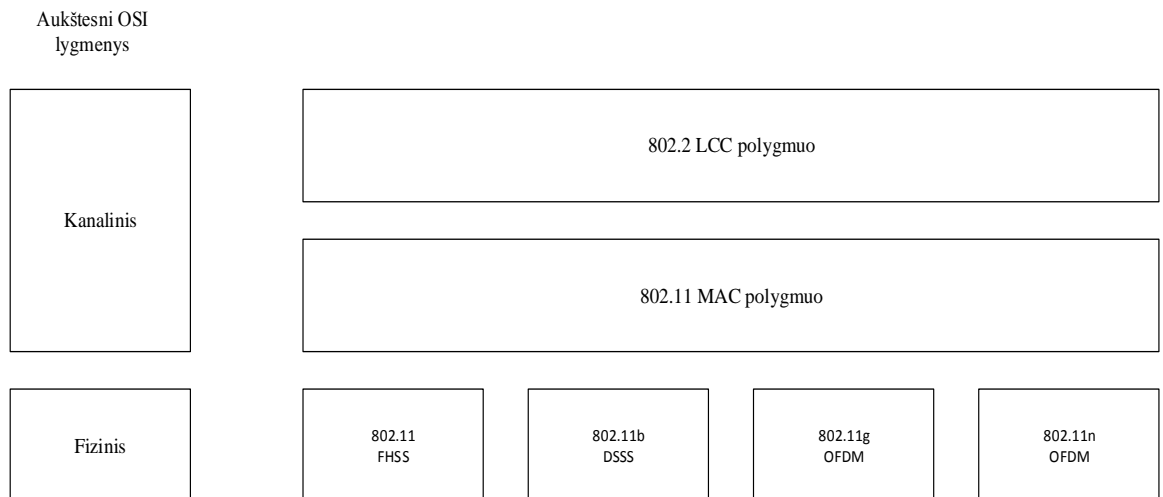
Kaip matyti iš 2.1 ir 2.2 lentelių realaus laiko paslaugoms yra leistini maži duomenų paketų praradimai, tačiau esant nerealus laiko paslaugoms duomenų paketų praradimai yra neleistini. Pastebėtina, jog realaus laiko paslaugų duomenų perdavimo tipinės spartos nėra didelės, tačiau reikalauja stabilaus ir garantuoto tinklo srauto. Rekomendacijose apibrėžtų paslaugų tipiniai duomenų kiekiai yra mažesni nei šiuo metu naudojami, nes pavyzdžiui atsisiunčiant naujienu

portalą jis užima kelis megabaitus. Todėl iš rekomendacijų toliau bus remiamasi tik pagrindinių našumo parametrų reikšmėmis, kurios yra universalios duomenų kiekio atžvilgiu. Toliau tinkle bus tiriamos šios paslaugos:

- realaus laiko – VoIP skambučiai;
- nerealaus laiko – duomenų perdavimas TCP protokolu.

3. Belaidžio 802.11 specifika

WiFi standartas apima du OSI sluoksnius: fizinį ir kanalinį. Fiziniame lygmenyje IEEE 802.11 standartai (3.1 pav.) skiriasi perdavimo spartomis, spektro išplėtimo metodais ir naudojamais dažnių ruožais. Kanalinius lygmuo sudarytas iš 802.11 MAC posluoksnio ir 802.2 loginio sujungimo kontrolės posluoksnio (angl. *Logical Link Control (LLC)*), kuris analogiškas Etherneto atveju. 2.1 paveikslėlyje pateikiamas 802.11 standartų grupės protokolų rinkinys.



3.1 pav. 802.11 standartų grupės protokolų rinkinys [13]

Pati 802.11 darbo grupė buvo įkurta 1990 metais, pirmasis 802.11 standartas išleistas 1997 metais ir turėjo 1 ir 2 Mb/s perdavimo spartas, sistemos dirbo 2,4 GHz dažnių ruože, ir infraraudonųjų spindulių ruože. Tačiau tokios spartos netenkino komercinių vartotojų. 1999 metais pateiktas 802.11 (802.11b) standarto patobulinimas, kuris įgalino didesnę perdavimo spartą: 5,5 ir 11 Mb/s. [13] Toliau trumpai bus apžvelgiami pagrindiniai 802.11 grupės standartai.

802.11b fiziniame sluoksnyje naudoja DSSS (tiesioginės sekos spektro plėtimą), palaiko iki 11 Mb/s duomenų perdavimo greitį, dirba 2,4-2,4835 GHz dažnių juostoje, naudoja 22 MHz kanalo plotį, kuris leidžia panaudoti 3 nepersidengiančius kanalus, galimos greitaveikos: 1Mb/s, 5,5 Mb/s, 2 Mb/s, 11 Mb/s. Fiziniame sluoksnyje DSSS plėtimui naudojami Walsh 11 Mčipų/s (angl. *chip*) greičio kodai. Norint pasiekti didesnes greitaveikas, naudojama komplementaraus

kodo raktų (CCK) moduliacija ir taip yra pasiekama 11 Mb/s greitaveika. Naudojamos moduliacijos QPSK ir diferencialinė QPSK. Tipinis veikimo atstumas iki 100 m. [13]

802.11g naudoja OFDM moduliacijos schemą, kuri 20 MHz kanalą suskaido į 52 ortogonalius dalinius nešlius. Standartas užtikrina maksimalią perdavimo spartą iki 54 Mb/s. Šis standartas suderinamas su 802.11b ir 802.11n standartais, dirbančiais 2,4 GHz dažnių ruože. [13]

Naudojamos moduliacijos: BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM. Panaudojami tik 3 nepersidengiantys kanalai. Tipinis veikimo atstumas – iki 100 m. [14]

802.11n dirba 2,4 GHz arba 5 GHz dažnių ruože, naudoja OFDM moduliacijos schemą, maksimali greitaveika iki 600 Mb/s, naudojant 4 erdvinis srautus, 40 MHz kanalo plotį ir sumažintą apsauginį intervalą. Naudojami kanalų pločiai 20 ir 40 MHz, 3 nepersidengiantys kanalai 2,4 GHz ruože ir 53 kanalai 5 GHz dažnių ruože. Atsiranda nauja technologija – MIMO, leidžianti panaudoti iki 4 erdvinių srautų, išvengti daugiaspindulinio efekto ir padidinti greitaveiką. Kitaip nei ankstesni 802.11 grupės standartai, n standartas perteklinių duomenų sumažinimui naudoja kadru surinkimo metodus, kurių pagalba surenkami du ar daugiau kadru į MSDU arba MPDU kadra. Tipinis veikimo atstumas iki 150 m. [15-17]

3.1. 802.11 MAC polygmenio funkcijos

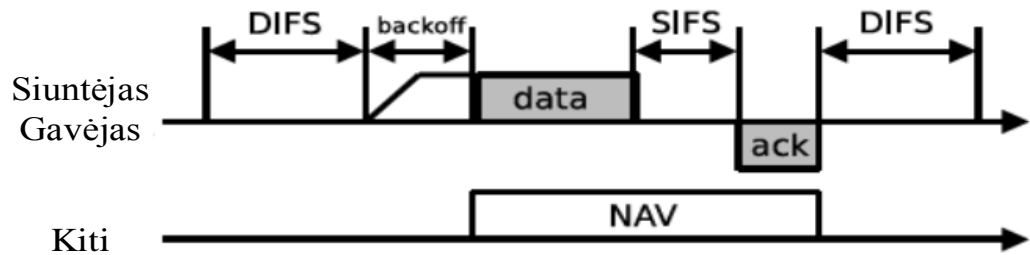
802.11 standartu dirbanti įranga dalinasi radijo dažniniu resursu. MAC polygmuo užtikrina prieigą prie fizinio lygmens dviem būdais [13]:

- paskirstytuju režimu DCF (angl. *Distributed Coordination Function*). DCF režimo atveju yra užtikrinama daugkartinė prieiga prie fizinio lygmens su nešlio kontrole ir kolizijų eliminavimu pagal CSMA/CA.
- centralizuotu režimu PCF (angl. *Point Coordination Function*). PCF režimas naudojamas, kai prieigos įrenginiui (stočiai) suteikiama koordinatoriaus funkcija. Tuo atveju įrenginys atlieka koordinatoriaus vaidmenį ir valdo terpėje siunčiamą kadru srautą.

Darbe toliau bus nagrinėjamas DCF režimas, nes WiFi įranga dirba šiuo režimu ir nagrinėti kartu ir PCF režimą būtų netikslinga.

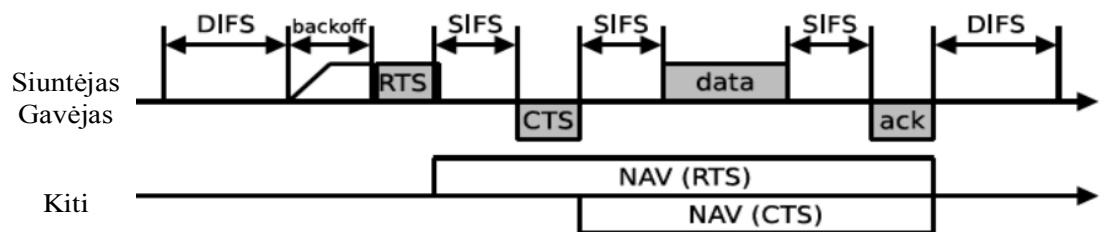
802.11 standarte yra aprašyti fizinio nešlio aptikimo (angl. *Physical Carrier Sensing* (PCS)) ir virtualaus nešlio (angl. *Virtual Carrier Sensing* (VCS)) metodai. PCS metodas naudoja koherentinį arba nekoherentinį metodą signalo preambulės aptikimui fiziniame lygmenyje. VCS naudoja tinklo paskyrimo (angl. *Network Allocation Vector* (NAV)) skaitliuką, kurio reikšmę nustato pagal MAC antraštės trukmės lauko parametrą. Naudodamiesi NAV tinklo įrenginiai tikrina kanalą, o pasiekus nulio reikšmę įrenginys perduoda duomenis. [18]

802.11 tinkle dirbantys įrenginiai gali naudoti įprastą arba RTS/CTS perdavimo metodą, jų laikinės diagramos pateikiamos 3.2 ir 3.3 paveikslėliuose.



3.2 pav. DCF įprasto perdavimo laikinė diagrama [18]

Naudojant įprastą perdavimo metodą įrenginys prieš siųsdamas kadą, tikrina kanalą laiko tarpą, kuris vadinamas paskirstyto vidinio kadro laiko tarpu (angl. *Distributed Inter-Frame Space* (DIFS)). Jei šį laiko tarpą įrenginys neužfiksavo kitų perdavimų, siųs kadą. Jei kanalas užimtas perdavimas nukeliamas kol kanalas taps laisvu, bus praėję DIFS ir laukimo (kuris skaičiuojamas kai kanale nėra perduodami duomenys) (angl. *Backoff*) intervalai. Po sėkmingo kadro priėmimo ir po trumpo vidinio kadro laiko tarpo (angl. *Short Inter-frame Space* (SIFS)) gavėjas išsiunčia patvirtinimo pranešimą – ACK. [13, 18, 19]



3.3 pav. DCF RTS/CTS perdavimo laikinė diagrama [18]

CSMA/CA naudojant RTS/CTS leidžia žymiai sumažinti kolizijas tinkle. Tokiame tinkle siunčiami kontroliniai paketai: prašymas perduoti (angl. *Request To Send* (RTS)) ir „laisva“ siųsti (angl. *Clear To Send* (CTS)). Išlaukęs kada kanalas tampa laisvas siuntėjas siunčia RTS kadą ir laukia kol po SIFS laiko gavėjas išsiųs CTS pranešimą. Toliau siuntėjas po SIFS laiko perduoda duomenų kadą. Kiti priėmę RTS ir CTS kadrus nustato NAV skaitliukus ir laukia. Po sėkmingo duomenų kadro priėmimo ir SIFS laiko tarpo gavėjas išsiunčia ACK patvirtinimo pranešimą apie sėkmingai priimtą kadą. [13, 18, 19]

Laikiniai parametrai SIFS ir DIFS priklauso nuo fizinio lygmens ir apskaičiuojami pagal 1 ir 2 formules [18]:

$$SIFS = RxRFDelay + RxPLCPDelay + MacProcessingDelay + RxTxTurnaroundTime, \quad (1)$$

$$DIFS = SIFS + 2 \cdot aSlotTime, \quad (2)$$

$$aSlotTime = CCATime + RxTxTurnaroundTime + AirPropagationTime + MacProcessingDelay, \quad (3)$$

čia $RxRFDelay$ – laikas skirtas perduoti simbolį iš fizinio lygmens į PLCP; $RxPLCPDelay$ – laiko tarpas perduoti simbolį iš PLCP į MAC lygmenį; $MacProcessingDelay$ – MAC lygmens kadro apdorojimo laiko tarpas; $AirPropagationTime$ – sklidimo radijo kanale trukmė; $CCATime$ – minimalus laiko tarpas skirtas fizinio lygmens kanalo užimtumo patikrinimui; $RxTxTurnaroundTime$ – maksimalus laiko tarpas, kuriam reikalingas fizinio lygmens perjungimas tarp siuntimo ir gavimo režimų; SIFS - trumpas vidinio kadro laiko tarpas; $aSlotTime$ – laiko intervalas, μs ; DIFS - paskirstytas vidinio kadro laiko tarpas, μs .

Tinkle atsitikus kolizijai, t.y. kai du įrenginiai tinkle po DIFS laiko intervalo pradeda perdavimą arba kadras buvo priimtas iškraipytas, kadras yra kartojamas. Kolizijų išvengimui yra taikomas atsitiktinio laukimo intervalų algoritmas. Įrenginiai po kolizijos laukia atsitiktinį laiko intervalą ir išlaukę DIFS intervalą perduoda kadra, tačiau šis atsitiktinis laiko intervalas yra dekrementuojamas tik tada kai nėra fiksuojamas perdavimas tinkle. Atsitiktinio laukimo intervalas susideda iš tam tikrų laiko intervalų kiekio kuris aprašomas dvejetainine eksponentine funkcija (4 formulė) [18]:

$$laukimo_intervalas = [CW \cdot U(0,1)] \cdot aSlotTime, \quad (4)$$

čia $U(0,1)$ yra tolydus atsitiktinis skaičius iš intervalo $[0;1]$; $aSlotTime$ – laiko intervalas. CW dydžio reikšmė priklauso nuo anksčiau įvykusių kolizijų ir sėkmingų perdavimų. Varžymosi lango dydis CW įvykus i -tajam nesėkmingam perdavimui apskaičiuojamas pagal (5) formulę:

$$CW_i = 2^i \cdot (CW_{min} + 1) - 1, \quad 0 \leq i \leq m, \quad (5)$$

čia CW_i – i -tosios retransmisijos perdavimo lango dydis, CW_{min} - pirmojo perdavimo lango dydis, $CW_{max} = 2^m \cdot (CW_{min} + 1) - 1$, $m = \log_2 (CW_{max} / CW_{min})$.

Po sėkmingo perdavimo CW_i nustatomas į CW_{min} .

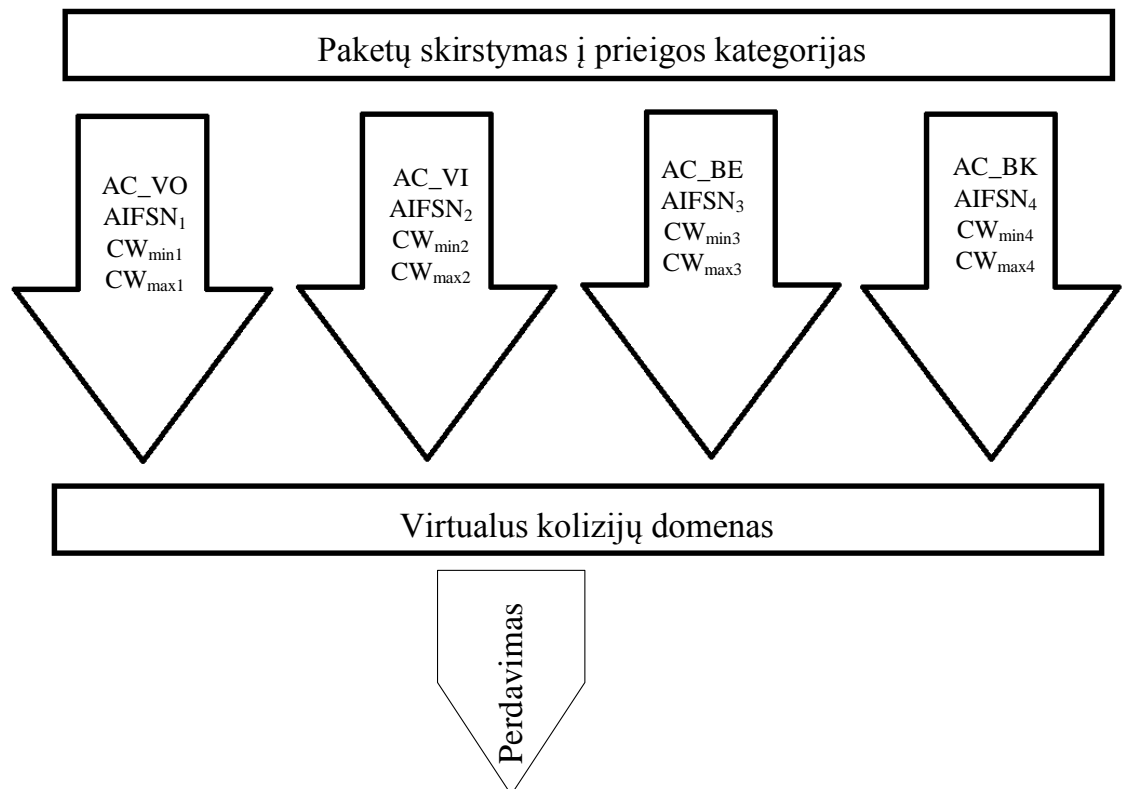
3.2. WMM (802.11e) veikimo principai

WMM yra paremtas 802.11e standarto aprašymo juodraščiu ir naudoja EDCA - tolimesnį DCF funkcijos patobulinimą, suteikiantį geriausių pastangų kadro perdavimą. Ji naudoja prioritizavimą, kuris suteikia skirtingus koordinavimo funkcijos parametrus: nešlio aptikimo periodą, perdavimo lango dydį ir laiko tarpą per kurį nuosekliai galima perduoti kadrus belaidžio ryšio kanale. Duomenų paketų prioritizavimo galimybės panaudojant DSCP arba IEEE 802.1d antraštes. WMM veikimui būtina sąlyga, kad tiek prieigos taškas, tiek klientas būtų sertifikuoti WMM įrenginiai. [18, 20]

EDCA funkcija naudoja keturias srautų kategorijas. Kiekviena kategorija turi savo atskirą eilę ir prioritetą prie fizinio lygmens (3.4 paveikslėlis). Kategorijų suskirstymas pateikiamas 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. EDCA prieigos kategorijų suskirstymas ir prioritetai [20]

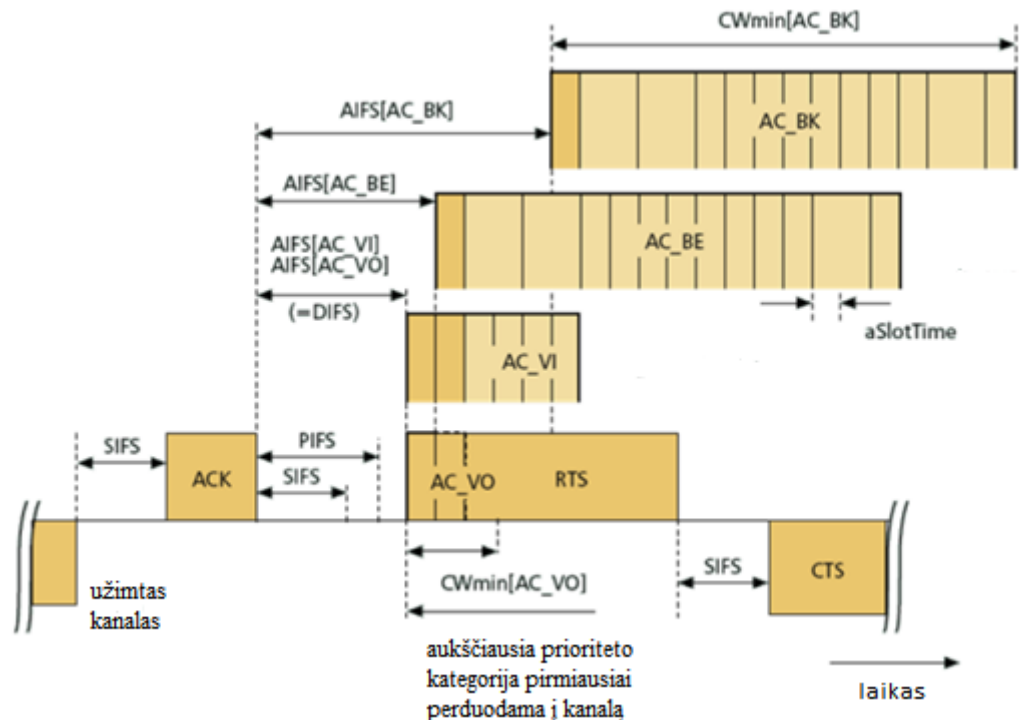
Prieigos kategorija	Aprašymas	802.1d antraštė
WMM balso prioritetas (AC_VO)	Aukščiausias prioritetas. Leidžia kelis konkurencingus VoIP skambučius, su mažu vėlinimu ir aukšta skambučio garso kokybe	7, 6
WMM vaizdo prioritetas (AC_VI)	Prioritetizuoja vaizdo srautus aukščiau kitų duomenų srautų. Vienas 802.11g arba 802.11a kanalas gali perduoti 3-4 SDTV arba 1 HDTV srautus	5, 4
WMM geriausių pastangų prioritetas (AC_BE)	Srautas iš nepalaikančių įrenginių arba srautas iš aplikacijų ar įrenginių kurie nepalaiko QoS galimybių	0, 3
WMM foninis prioritetas (AC_BK)	Žemiausio prioriteto srautas (bylų siuntimas, spausdinimo užduotys) kuris nereikalauja griežtų vėlinimo ir duomenų pralaidumo reikalavimų	2, 1



3.4 pav. EDCA veikimas [21]

Srauto prioritizavimas paremtas dviem laikiniais parametrais, kurie skiriasi kiekvienai prieigos kategorijai (3.5 paveikslėlis):

- Minimalus vidinio kadro laiko tarpas (angl. *Inter-frame Space*) arba sutartinio vidinio kadro laiko tarpo numeris (angl. *Arbitrary Inter-Frame Space Number (AIFSN)*), kurį sudaro SIFS ir tam tikras kadro skaičius.
- Varžymosi lango (angl. *Contention Window (CW)*), kartais dar vadinamo atsitiktiniu atsitraukimo laukimu (angl. *Random Backoff Wait*). [20]



3.5 pav. EDCA kategorijų laikinės diagramos esant RTS/CTS mechanizmui [22]

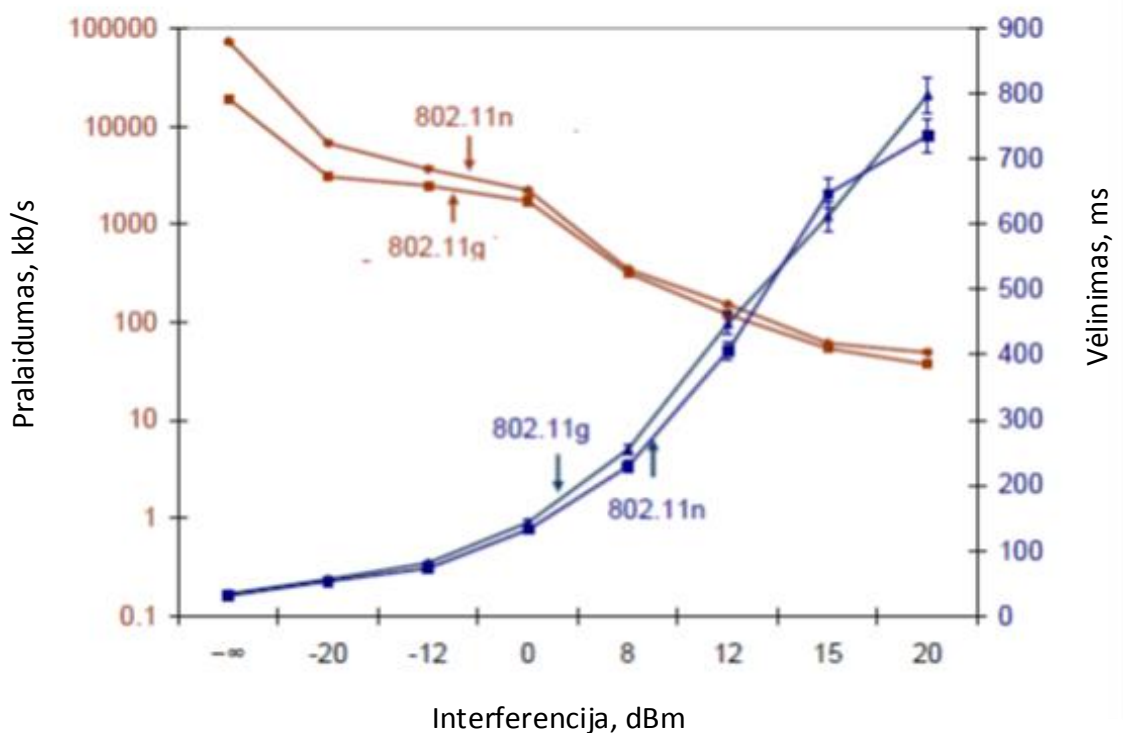
Šių laikinių parametų reikšmės būna mažesnės esant didesnio prioriteto srautui. Kiekvienai prieigos kategorijai laukimo reikšmė prieš perdavimą yra suskaičiuojama kaip suma AIFS ir atsitiktinio skaičiaus iš intervalo $[0; CW]$. Šio parametro reikšmė yra kintanti laike, tačiau pradinė reikšmė priklauso nuo prieigos kategorijos. Po kiekvienos kolizijos CW didėja, kol pasiekama maksimali reikšmė, kuri taip pat priklauso nuo prieigos kategorijos. Po sėkmingo perdavimo CW grąžinamas į pradinę reikšmę, priklausančią atitinkamai prieigos kategorijai. Prieigos kategorija su žemiausiu atsitraukimo laiku gauna laiko intervalą, per kurį gali atlikti siuntimą - TXOP (angl. *Transmission Opportunity*). Šis intervalas taip pat priklauso nuo prieigos kategorijos ir fizinio lygmens perdavimo spartos. Pvz, TXOP kinta nuo 0,2 ms BK prieigos kategorijai, iki 3 ms VI - 802.11a/g tinkle ir nuo 1,2 ms iki 6 ms 802.11b tinkle. [20]

3.3. 802.11 tinkluose pasireiškianti interferencija

802.11 tinklus nuolatos veikia įvairios aplinkos sąlygos: tai aplinkiniai daiktai, sienos,

aplinkinis elektromagnetinių bangų foninis triukšmas ir net judantys žmonės veikimo zonoje. Tačiau labiausiai tinklo kokybinius parametrus veikia ir mažina kitų įrenginių sukeliama interferencija. Ši reiškinį dažniausiai sukelia aplink veikiantys 802.11 tinklai, kurių veikimo kanalai persidengia. Ši interferencija yra aptinkama ir sumažinama CSMA/CA protokolo pagalba, tačiau tinklo sparta ir kokybiniai parametrai sumažėja. Didžiausią problemą kelia įrenginiai, dirbantys tokiu pat dažniu kaip ir 802.11 įrenginiai, bet dirbantys kita technologija. Tokiu atveju CSMA/CA protokolas negali aptikti kitu standartu dirbančio įrenginio perduodamų duomenų. Dėl nesugebėjimo aptikti kitomis technologijomis dirbančių įrenginių signalų, 802.11 įrenginiai bando perduoti kartodami kadrus, bet nesėkmingai, todėl tinklo sparta ir kokybiniai parametrai gali sumažėti iki tokių, dėl kurių tinkle dirbantys įrenginiai gali nustoti dirbti. [23]

Dažniausiai WiFi įrenginiai gauna interferencinius signalus iš BlueTooth įrenginių, belaidžių telefono ragelių, mikrobangų krosnelių, belaidžių vaizdo stebėjimo kamerų, Zigbee įrenginių, fluorescencinių lempų, WiMAX įrenginių, racijų ir kitų elektromagnetines bangas skleidžiančių įrenginių. [23]



3.6 pav. 802.11 g ir n standartų kokybinių parametrų priklausomybė nuo interferencinio signalo galios [24]

3.6 paveikslėlyje matyti 802.11 g ir n standartu veikiančio tinklo pralaidumo kitimas esant 22MHz dažnio pločio interferenciniam signalui. Ši priklausomybė nustatyta [24] autorių eksperimento metu. Kaip matyti, didėjant interferencinio signalo galiai tinklo pralaidumas mažėja, o vėlinimas išauga. Taip yra, nes prarandami kadrai ir atliekamas pakartotinis siuntimas, tačiau

esant didesniam interferenciniam signalui mažėja SNR santykis, ko pasekoje turi būti naudojamos žemesnės perdavimo spartos. [24]

3.4. 802.11 tinklų interferencijos mažinimas

Su skirtingais interferenciniais šaltiniais galima kovoti įvairiai. Išskiriant 802.11 standartu nedirbančios įrangos keliamus interferencinius trikdžius, galima kovoti su jais įrangą naudojant skirtingose vietose, kur tarpusavio interferencija būtų minimali. Galima pereiti į kitą diapazoną ir ten kurti 802.11 tinklus, pvz., iš 2,4GHz juostos migruoti į 5GHz dažnių ruožą, kur galimų panaudoti kanalų skaičius yra didesnis, tačiau tai tik laikinas sprendimas, nes greit bus įsisavintas ir šis dažnių ruožas. Taip pat galimas sprendimas - tai interferuojančios įrangos keitimas į kitą, kuri jau naudotų kitą dažnių ruožą. [23, 25]

Esant 802.11 tinklų, dirbančių persidengiančiais kanalais interferencijai, patariama parinkti skirtingus įrangos kanalus, kad tarpusavio interferencija būtų minimali, tačiau esant dideliame kiekiui tinklų tai neįmanoma. Tokiu atveju, norint sumažinti interferenciją reikėtų parinkti kanalus taip, jog kanalai persidengtų pilnai, o ne dalinai, nes tokiu atveju galės korektiškai veikti CSMA/CA protokolas. Taip pat mažinant 802.11 įrangos siųstuvų galią galima sumažinti interferenciją, tačiau sumažėja tinklo aprėptis. [23, 25]

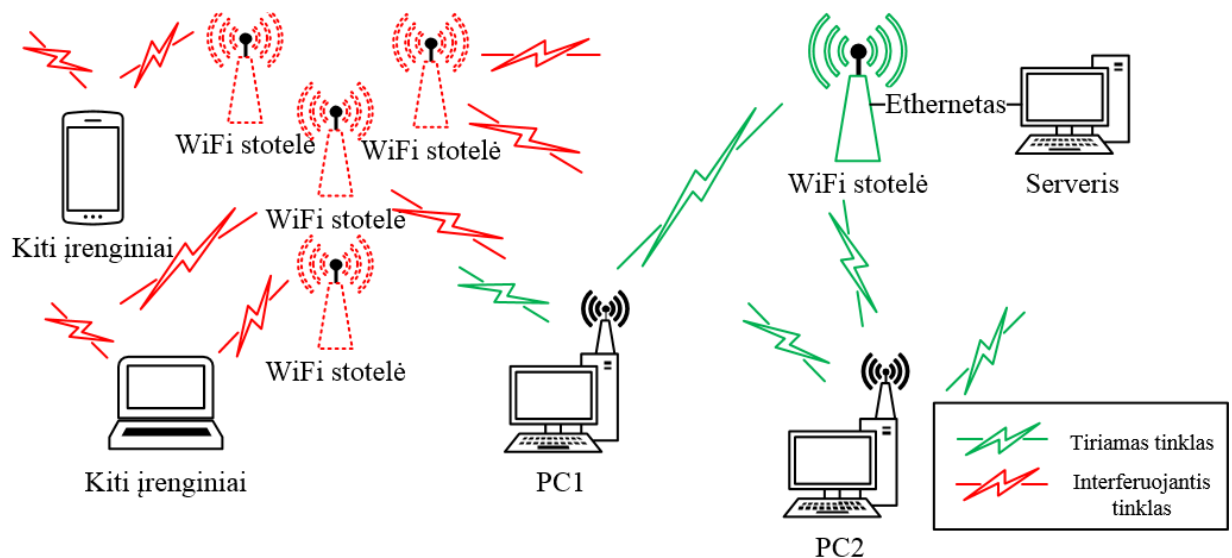
Naudojant MIMO technologiją, galima pasiekti ne tik didesnes spartas, bet ir kovoti su interferencija. Naudojant vieną anteną, siųstuvą ir imtuvą patalpose galima stebėti daugiaspindulinio efekto sukeltą signalo interferenciją. Daugiaspindulinis efektas atsiranda dėl skirtingais keliais atkeliavusio pasiūsto signalo, kurio atspindžiai imtuve atkeliavo skirtingomis fazėmis ir amplitudėmis. Todėl galima tokia situacija, jog signalas dėl daugiaspindulinio efekto gali būti nuslopintas iki nedektuojamo imtuve. Daugiaspindulinio efekto mažinimui naudojamas antenų atskyrimas. Tada naudojama antena kurios SNR yra didžiausias. Taikant MIMO technologiją naudojamos kelios antenos ir keli imtuvai/siųstuvai. Taip galima gauti stiprinimą dėl kelių priimtų signalų erdvinio-laikinio apdorojimo. Skiriami du MIMO technologijos panaudojimai - erdvinis išskyrimas ir erdvinis multiplikavimas. Erdvinio išskyrimo atveju siekiama pagerinti signalas-triukšmas santykį, taip pagerinant sistemos perdavimo charakteristikas, esant įvairiems daugiaspinduliniams efektams ir slopinimams. Erdvinis multiplikavimas leidžia padidinti sistemos pralaidumą, išnaudojant kelių krypčių perdavimą, kuriuo perduodami erdviniai srautai (angl. *spatial stream*). Kiekvienas erdvinis srautas naudoja atskirą anteną ir siųstuvą. [26, 27]

4. Tinklo, naudojančio WMM protokolą, tyrimas

Darbe eksperimentiškai nustatomi skirtumai tarp skirtingų WiFi WMM (802.11e) prieigos kategorijų pagal paslaugų kokybinius parametrus. Pasirenkamos dvi tinkle galimos teikti paslaugos: duomenų perdavimas TCP protokolu ir VoIP skambučių srauto generavimas.

4.1. WMM protokolo tyrimo schema ir įranga

Tyrimo naudojamas ADBB maršrutizatorius, vartotojo įrangai Buffalo USB 802.11n adapteriai. Tyrimo naudojama Iperf programinė įranga, kurios pagalba yra atliekamas duomenų perdavimo TCP protokolu tyrimas, žemynkryptis ir aukštynkryptis, o VoIP skambučiams – D-ITG. Apie juos išsamiau rašoma toliau. Pateikiama tinklo schema ir algoritmas (4.1 ir 4.2 pav.). Tiriamas WiFi tinklas yra nuolatos veikiamas kitų WiFi tinklų ir kitų interferencijos šaltinių, kaip pvz., belaidžių telefonų, elektrinių prietaisų ir kt. veiksmių.



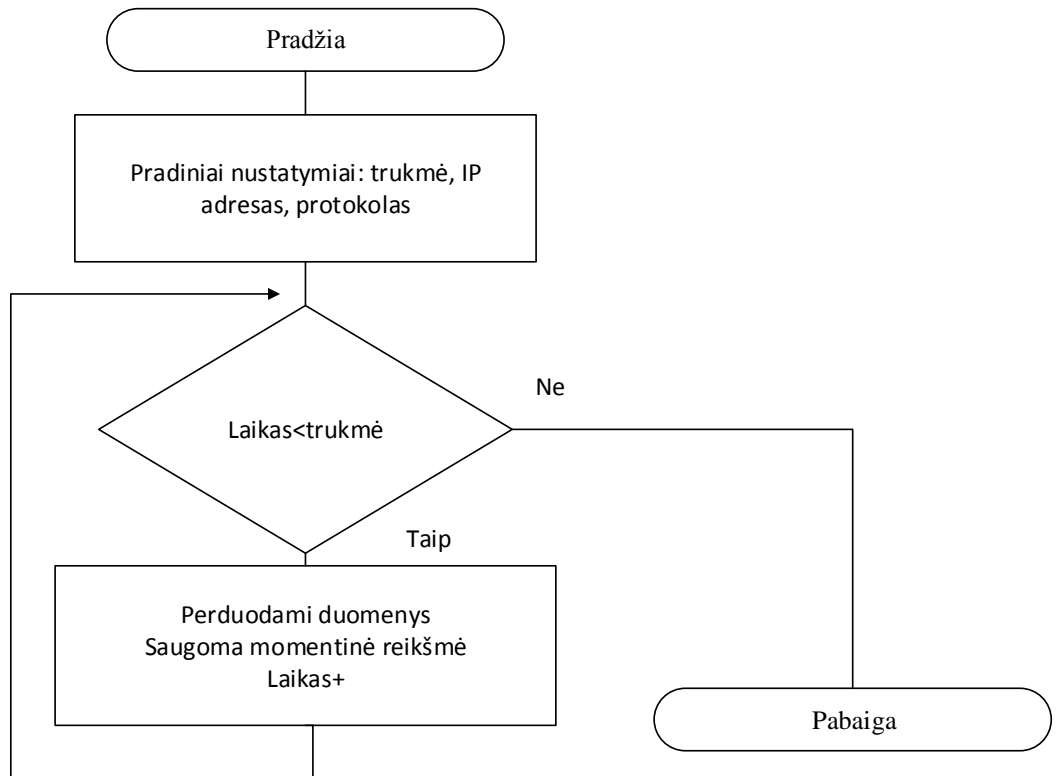
4.1 pav. WMM protokolo tyrimo tinklo schema

Eksperimentiškai nustatomi 802.11n standarto kokybiniai parametrai nenaudojant ir naudojant DSCP paketų markiravimą, taip keičiant atitinkamas WMM prieigos kategorijas. Matavimai atliekami žemynkrypčiam ir aukštynkrypčiam srautams. Tiriamas pralaidumas esant vienam klientui ir esant dviem klientams. Išmatuotų reikšmių sklaida yra didelė, todėl analizuojamas vidurkis. Prieš matavimą išanalizuojama aplinka, parenkamas laisvesnis kanalas (tyrimo metu parinktas 11 kanalas), kuriame dirba mažiausiai prieigos taškų. Atliekama kiekvienam atvejui po 15 matavimų, jie atliekami paeiliui.

Atlikus WiFi maršrutizatoriaus nustatymus buvo nustatoma matavimų trukmė. Ją nustatinėjant buvo stebimas rezultatų vidurkio kitimas. Užtektina trukmė laikomas toks laiko tarpas, po kurio vidurkis reikšmingai nebekinta. Tokia trukmė buvo nustatyta 720s duomenų

perdavimui TCP protokolu.

VoIP skambučiai imituojami generuojant G.711 kodeko perdavimą UDP protokolu: perduodami 134 B dydžio Ethernet kadrais, kurių sparta 100 paketų/s. Prieš renkant rezultatus buvo atlikti bandymai matavimo trukmei nustatyti – kai matuojamų dydžių vidurkis reikšmingai nebekinta. Matavimo trukmė nustatyta 900s VoIP skambučių paketų srauto tyrimui. Atliekama paeiliui 15 matavimų kiekvienam atvejui.



4.2 pav. Tyrimo veiksmų algoritmas

Toliau detaliau apžvelgiami tyrimo metu naudoti programinių įrankių paketai: Iperf, D-ITG ir Horst.

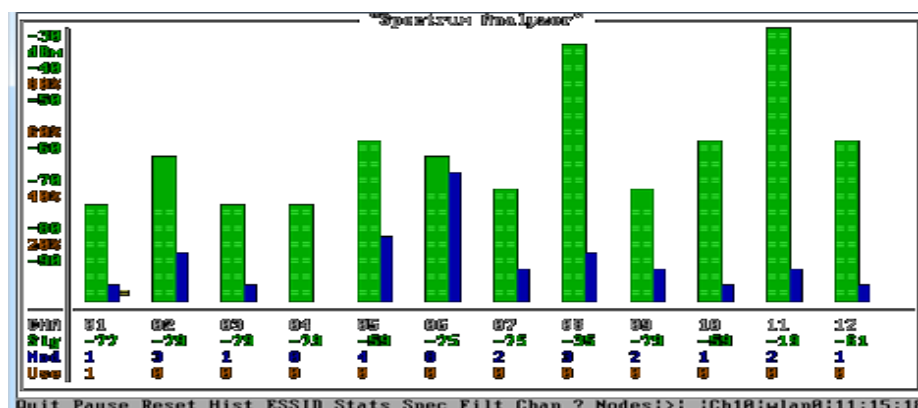
Iperf programinis įrankis buvo naudojamas tinklo našumo nustatymams TCP transportiniu protokolu. Įrankis pasirinktas dėl paprastumo naudojantis, atvirojo kodo. Tyrimo metu buvo naudojamos standartinės Iperf programinio paketo nustatymų reikšmės. Pagrindinės jo savybės [28]:

- TCP srauto matavimas;
- TCP lango ir buferio keitimas;
- UDP srauto nustatymas;
- UDP paketų praradimo, vėlinimo fluktuacijų nustatymas;

- darbo režimas serveris-klientas;
- daugiaplatformis: Windows ir įvairios Linux distribucijos;
- tyrimui naudojamo duomenų kiekio arba trukmės nustatymas.

VoIP srauto generatoriumi buvo pasirinktas D-ITG generatorius, kurio pagalba buvo generuojamas G.711 garso suspaudimo kodeko paketų srautas. Šio paketų srauto generatoriaus architektūra susideda iš kelių modulių, kurių pagalba galima priimti, siųsti, valdyti ir analizuoti srautą. Generatorius naudoja atskirą sesiją tyrimo signalizacijai (galima perduoti per kitą netiriamą tinklą), taip įgalindamas tyrimo valdymą iš išorinio tinklo ir automatizavimą, nes nereikia kiekviename įrenginyje keisti parametrų pagal atliekamą tyrimą. Programinis įrankis yra atvirojo kodo ir palaiko Windows ir įvairias Linux pagrindo operacines sistemas įvairiose platformose. Integruoti srautų šablonai: VoIP (G.711, G.729, G.723), DNS, Telnet, internetinių žaidimų (Quake3, Counter-Strike). Galimybė generuoti srautus pagal įvairius pasiskirstymus (uniforminis, eksponentinis, Pareto, konstantinis, normalusis, Gamos ir kiti). Statistinių kokybinių duomenų, tokių kaip paketų vėlinimas (vienkryptis arba dvikryptis), paketų vėlinimo fluktuacijos, paketų praradimas, perduotų duomenų kiekis, pralaidumas, rinkimas ir analizė. Tokiu būdu supaprastinama gautų rezultatų analizė, nes dauguma užduočių atliekama vieno įrankio pagalba. [29]

Aplinkoje esančių kitų WiFi įrenginių trukdžių nustatymui naudotas atvirojo kodo belaidžio WiFi analizatorius „Horst“. Jo pagalba, naudojantis Linux tipo operacine sistema ir belaidžio WiFi adapterio pagalba, galima skanuoti ir analizuoti aplinkoje veikiančių WiFi įrenginių įtaką tyrimui (4.3 paveikslėlis). Pagrindinės jo savybės: kiekvienos WiFi stotelės signalo lygio nustatymas, WiFi kanalo užimtumo skaičiavimas (remiasi priimtų iš eterio 802.11 kadru intensyvumu), WiFi spektro analizatorius (pateikia kiekvieno kanalo pikinius signalo lygius), grafinis duomenų atvaizdavimas ir kiti. [30]



4.3 pav. „Horst“ spektro analizatoriaus langas

teikiamas kartu su TEO, AB paslaugomis. Kaip vartotojo įranga pasirinktas Buffalo 802.11n standarto WiFi adapteris. Tokia įranga pasirinkta norint atlikti matavimus su įranga artimesne dažniausiai naudojamai vartotojų segmente, nes dažniausiai vartotojai renkasi pigius produktus, neskirdami didelio dėmesio įrenginio specifikacijoms ir galimybėms. Pagrindinės įrangos specifikacijos pateikiamos 4.1 lentelėje.

4.1 lentelė. Naudota tyrime 802.11 įranga [31, 32]

Įrenginys	Buffalo Wireless N150 Ultra Compact USB 2.0 Adapter	ADBB P.RG EA4201N
Mikroschemų rinkinys (angl. chipset)	RA2870	BCM6362
Palaikomi 802.11 standartai	b/g/n	b/g/n
Sąsajos	USB	5x10/100/1000, USB, RJ-11 ADSL
Antenų konfigūracija	1x1 SISO	2x2 MIMO

Darbe buvo naudojami trys kompiuteriai: serveris ir du klientai.

Visuose kompiuteriuose įdiegta Windows 7 SP1 x64 operacinė sistema. Kompiuterių aparatinės įrangos specifikacija pateikiama 4.2 lentelėje.

4.2 lentelė. Kompiuterių aparatinės įrangos specifikacija

CPU	AMD APU A4-3300
RAM	4GB DDR3
HDD	500GB

4.2. Realios aplinkos įtaka tyrimo rezultatams

Atliekant matavimus pastebėta, jog rezultatai priklauso ne tik nuo įrenginių vietos laboratorijoje, tačiau ir nuo paros meto ir savaitės dienos. Todėl atliekant tyrimą svarbu nustatyti kuo daugiau veiksnių, kurie turi neigiamos įtakos tyrime matuojamiems kokybinių parametru rezultatams ir nėra kontroliuojami.

Matavimo metu tyrimą įtakojo 18 WiFi prieigos tinklų, persidengusių su tiriamu tinklu. Šiuos tinklus skleidžiančių prieigos stotelių spinduliavimo galios buvo nuo -81 dBm iki -49 dBm (4.4 ir 4.5 paveikslėliai). Kitų WiFi tinklų apkrovimas nebuvo stebimas, tačiau galima stebėti

rezultatuose atspindinčių kitų WiFi tinklų įtaka: perdavimo spartos, paketų vėlinimų ir paketų vėlinimų fluktuacijų nepastovumas ir nuolatinis kitimas.

Aplinkoje veikiančios kitos WiFi stotelės dirba persidengiančiuose ir nepilnai persidengiančiuose kanaluose (4.4 ir 4.5 paveikslėliai), taip sukeldamos tarpusavio interferenciją ir didindamos WiFi kanalo užimtumą, ir sumažindamos galimybę perduoti sėkmingai kadra.

Norint nustatyti paros laiko įtaką matavimų rezultatams, buvo surinkta informacija apie WiFi mobilius įrenginius. Informacija surinkta „Meraki“ gamintojo prieigos taško pagalba. Mobilus įrenginys įskaičiuojamas, kai išsiunčia prabavimo (angl. *probe*) kadra prieigos taškui, kuris renka duomenis. Tokiu būdu galima išskirti potencialių vartotojų naudojimosi WiFi ryšiu modelį per parą. Tačiau iš 4.6 paveikslėlio galima išskirti galimas didžiausios apkrovos valandas, bet ne vartotojų kiekį. Pastarajam nustatyti reikalingas atskiras tyrimas, kurio metu reikia surinkti didelį kiekį duomenų. Didžiausio naudojimosi WiFi tinklais yra laikotarpis nuo 8h iki 16h, būtent tokiu laiku yra darbo valandos universitete.

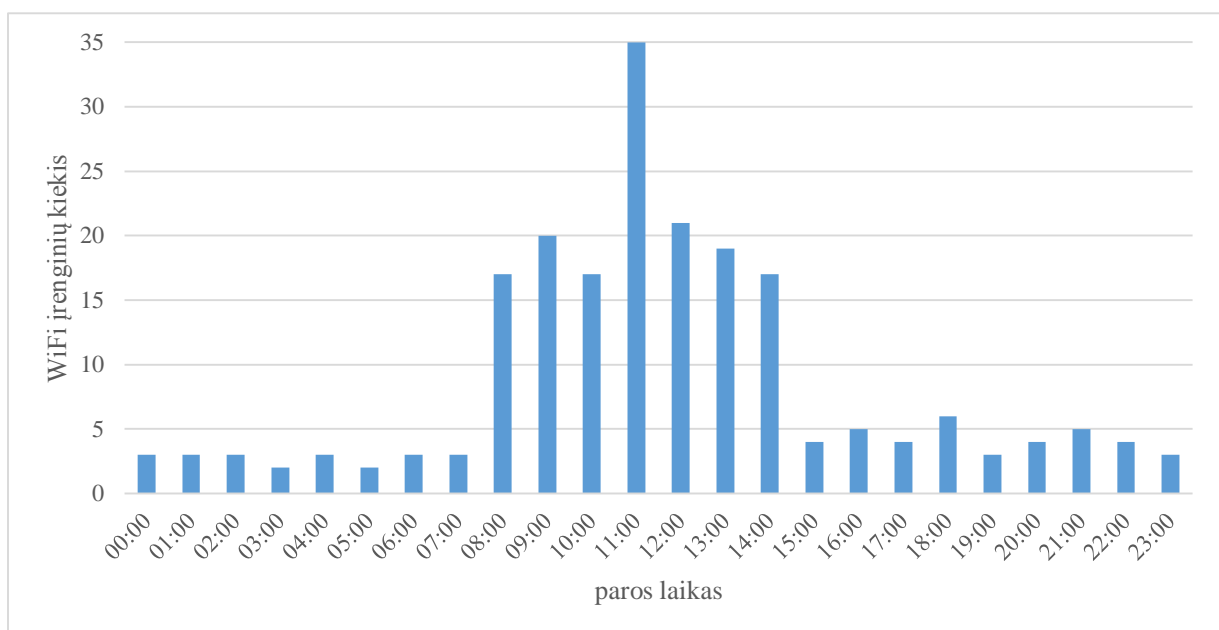
kanalas	Signalio lygis, dBm	SSID
6	-25	440net
6	-69	VSAT
6	-80	Irmanet
6	-84	KoksoNetas
8	-68	KTU
8	-73	eduroam
8	-73	KTU guest
8	-81	KTU
9	-57	KTU
9	-58	eduroam
9	-58	KTU guest
7 + 11	-81	Proginta
11	-51	ZemFor
11	-80	FJ
12	-80	eduroam

4.4 pav. 802.11 interferencijos šaltiniai, persidengiantys su 11 kanalu 2014-12-05 8:00

kanalas	Signalo lygis, dBm	SSID
6	-21	440net
6	-70	VSAT
6	-72	KoksoNetas
6	-82	Irmanet
6	-83	Rysiosiprinimas.lt
7	-74	TEO Wi-Fi
8	-73	eduroam
8	-73	KTU guest
8	-75	KTU
9	-58	KTU guest
9	-58	eduroam
9	-59	KTU
11	-49	ZemFor
11	-75	KTU gimnazija
11	-80	FJ
13	-72	KTU guest
13	-74	KTU
13	-74	eduroam
13	-78	KTU
13	-79	eduroam
13	-79	KTU guest

4.5 pav. 802.11 interferencijos šaltiniai, persidengiantys su 11 kanalu 2014-12-05 12:00

Nuo 11 iki 13 valandos vartotojų kiekis padidėjo, taip dar labiau padidėja 802.11 įrenginių interferencija ir jų įtaka gaunamiems tyrimo rezultatams.



4.6 pav. 802.11 įrenginių kiekio pasiskirstymas paros laike 2015 sausio 18 dieną

Apibendrinant, realių sąlygų aplinka galima vadinti tokią aplinką, kurios parametrai, tokie kaip esantis vartotojų ir WiFi stotelių kiekis, nuolatosis kinta laike. Tyrimas tokioje aplinkoje komplikuoja gautų rezultatų interpretavimą, tačiau suteikia galimybę surinkti informaciją apie

realų tinklo veikimą, nekuriant papildomų veiksmų laboratorijoje.

4.3. WMM prieigos kategorijų srautų tyrimo rezultatai

Šiame skyriuje pateikiami surinkti rezultatai ir jų apibendrinimas. Grafikuose pateikiami duomenų perdavimo (TCP protokolu) srautų rezultatai: žemynkrypčio ir aukštynkrypčio TCP protokolo perdavimo spartos, VoIP skambučių paketų vėlinimas, paketų vėlinimo fluktuacijos ir paketų praradimas, esant vieno vartotojo srautui ir esant dviejų vartotojų srautams. Apibendrinami gauti rezultatai, nustatant ir ieškant pagrindinių veiksnių.

Surenkant ir apdorojant rezultatus buvo panaudotos elementarios statistinės funkcijos, tokios kaip - vidurkis ir standartinis nuokrypis. Rezultatai pateikiami sekančiuose 4.7-4.12 paveikslėliuose ir 4.3-4.5 lentelėse. Atliekant rezultatų analizę matyti, jog jie yra išsibarstę ir skiriasi nuo naudojamos prieigos kategorijos ir matavimo scenarijaus. Rezultatai kinta priklausomai ne tik nuo prieigos kategorijos, bet ir nuo paros laiko, mėnesio dienos ir kitų neįvardintų faktorių, kurie aprašyti ankstesniuose skyriuose.

Tiriant duomenų perdavimą TCP (4.7 ir 4.8 paveikslėliai) protokolu BE kategorijos vidutinė žemynkryptė sparta gaunama didžiausia – 28,99 Mb/s, lyginant su kitais prieigos kategorijos srautais. Mažiausia žemynkryptė sparta buvo gauta Vo prieigos kategorijai. Didžiausios vidutinės spartos reikšmės gautos aukštynkrypčiame perdavime: BE ir Vo – 32,4 Mb/s. Didėjant vartotojų skaičiui visų prieigos kategorijų spartos – tiek žemynkryptė, tiek aukštynkryptė – mažėjo. BE prieigos kategorijos žemynkryptė sparta, įsijungus antram vartotojui, sumažėjo 50 %, BK – 37,87 %, Vi – 51 %, o Vo – 1 %. Aukštynkrypčių prieigos kategorijų spartos, prisijungus antram vartotojui, sumažėjo: BK – 55,4 %, BE – 58,5 %, Vi – 23 %, o Vo – 61,3 %. BE ir BK, sparta žemynkryptėje ir aukštynkryptėje prieigos kategorijose sumažėjo proporcingai, tačiau Vi ir Vo prieigos kategorijoms sparta sumažėja neproporcingai: lyginant tarp perdavimo krypčių pralaidumai sumažėja kelis kartus.

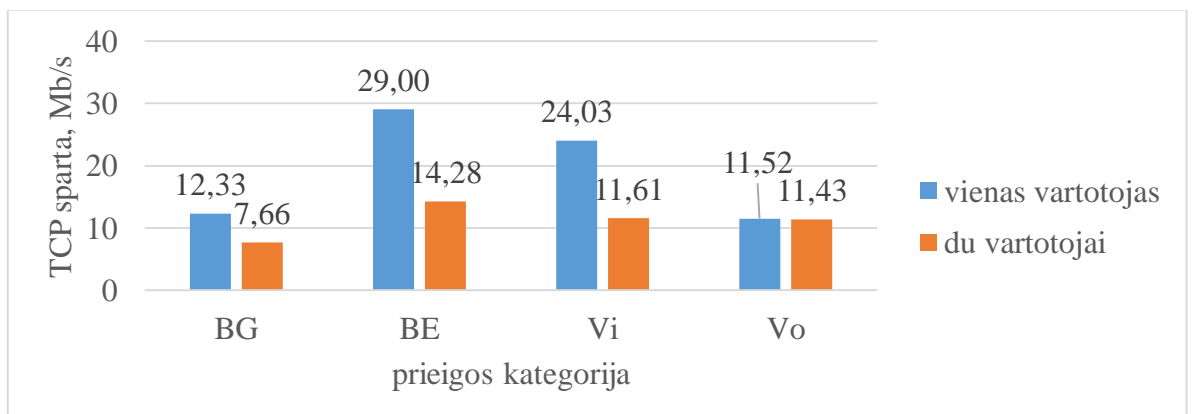
Aukštynkrypčiai spartai įtakos turėjo prieigos stotelės siųstuvai-įmtuvai, kuris yra jautresnis ir palaiko MIMO technologiją (vartotojo įranga naudoja SISO). MIMO pagalba galima sumažinti daugiaspindulinį efektą, kuris neigiamai įtakoja perduodamą signalą. Žymaus skirtumo tarp išmatuotų prieigos kategorijų aukštynkrypčių srautų vidutinių spartų nematyti, todėl daroma prielaida, jog vartotojo įranga neveikia korektiškai pagal WMM protokolą, lyginant su žemynkrypte sparta, kuriame prieigos kategorijų spartos išsiskyrė. Taip pat šį rezultatų išsiskyrimą galėjo įtakoti skirtingų gamintojų aparatinės ir programinės įrangos specifikacijų skirtumai. Perdavimo spartai įtakos turi suveikiantis TCP protokolo mechanizmas, kuris pakartotinai siunčia prarastus paketus ir sumažina perdavimo spartą, taip stengdamas išvengti tinklo perkrovos. Tokiu

atveju ne tik sumažėja perdavimo sparta, bet ir padidėja eterio užimtumas, nes paketai vėl yra perduodami eteriu tik šį kartą mažesne perdavimo sparta. Prieigos kategorijos, turinčios mažą CWmax parametro reikšmę, dėl kurios didėja kolizijų tikimybė, perdavimo spartos gautos mažesnės nei kitų turinčių didesnes CWmax reikšmes (pvz., BE prieigos kategorijos srautas).

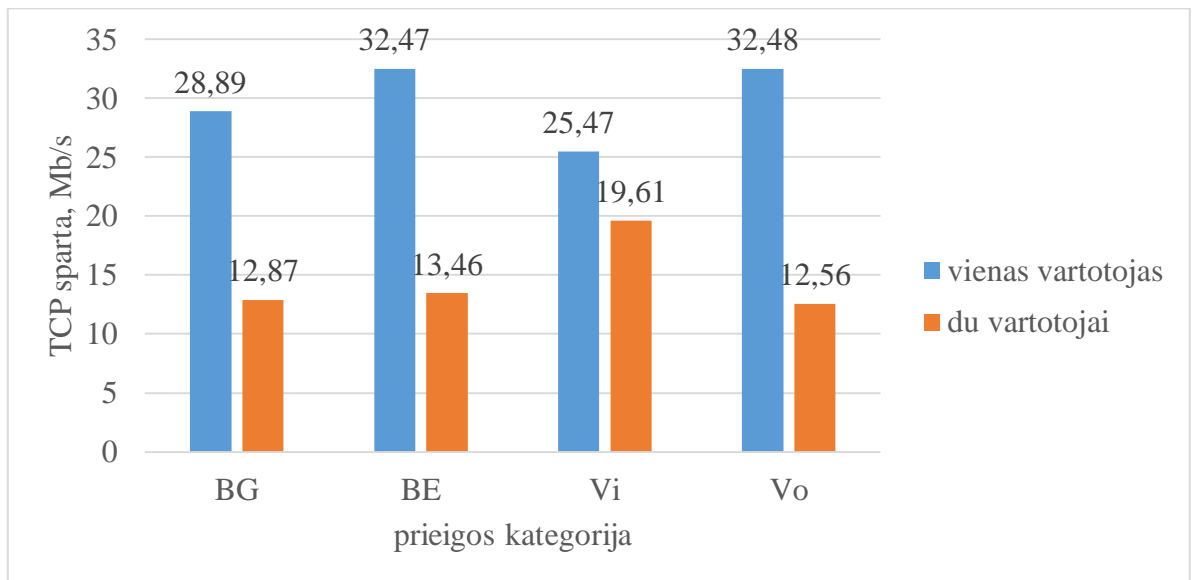
Apskaičiavus TCP protokolu perduodamų duomenų spartos standartinį nuokrypį (4.3 lentelė) matyti, jog kiekvienai prieigos kategorijos tyrimo scenarijui gaunamos skirtingos TCP protokolu perduodamų duomenų spartos standartinio nuokrypio reikšmės. Mažiausias standartinio nuokrypio reikšmės turėjo Vi prieigos kategoriją naudojantis TCP srautas – stabiliausia perdavimo sparta, nors vidutinė sparta, lyginant su kitomis prieigos kategorijomis, nėra didžiausia. Didžiausią standartinį nuokrypį turėjo BE prieigos kategorijos TCP srautas, tačiau jis turėjo ir didžiausią perdavimo spartą. Todėl daroma išvada, jog esant didesniam vidutiniam pralaidumui yra didesnis momentinių pralaidumo reikšmių išsibarstymas – srautas yra labiau kintantis ir nestabilus. Siejant standartinį nuokrypį su prieigos kategorija galima išskirti, jog prieigos kategorijų CWmax parametras yra tiesiogiai susijęs su standartinio nuokrypio reikšme.

4.3 lentelė. TCP protokolu perduodamų srautų spartų standartiniai nuokrypiai nuo prieigos kategorijos ir vartotojų kiekio

	žemynkryptis		aukštynkryptis	
	Vienas vartotojas	Du vartotojai	Vienas vartotojas	Du vartotojai
BK	3,48	2,95	8,26	1,99
BE	7,44	8,72	3,63	3,21
Vi	2,55	3,77	3,83	2,77
Vo	7,31	4,94	5,18	2,64



4.7 pav. Žemynkrypčio duomenų perdavimo TCP protokolu spartos priklausomybė nuo prieigos kategorijos ir vartotojų kiekio



4.8 pav. Aukštynkrypčio duomenų perdavimo TCP protokolu spartos priklausomybė nuo prieigos kategorijos ir vartotojų kiekio

Apibendrinant, duomenų perdavimo paslaugoms, naudojančioms TCP protokolą, svarbu, jog duomenų paketai būtų perduodami su kuo mažesniais nuostoliais žemesniuose OSI lygmenyse (šiuo atveju pirmame ir antrame lygmenyse). Pagal gautus rezultatus efektyviausiai, t.y. turi didžiausią perdavimo spartą, dirba BE prieigos kategorijos srautai.

Atliekant tyrimą VoIP paslaugai (4.9-4.12 paveikslėliai ir 4.4-4.5 lentelės) skirtingų prieigos kategorijų srautams vidutinis dvikryptis VoIP paketų vėlinimas priklausomai nuo prieigos kategorijos kito 1,9 – 3,9 ms intervale, esant vienam vartotojui, o esant dviem vartotojams kito 3,8 – 5,4 ms intervale. Prieigos kategorijų dvikryptis VoIP paketų vidutinis vėlinimas: BK - 3,7ms, BE – 3,4 ms, Vi – 1,9 ms, Vo – 3,9 ms. Didėjant vartotojų kiekiui VoIP paketų vėlinimas didėjo: BK – 14 %, BE – 9 %, Vi – 116 %, Vo – 38 %. Dvikrypčio VoIP paketų vėlinimo standartinis nuokrypis didėja didėjant VoIP paslaugos vartotojų skaičiui. Nors VoIP paketų vėlinimai ir padidėjo, įsijungus antram VoIP paslaugos vartotojui, tačiau jie neviršija QoS rekomendacijose nurodyto parametro VoIP paketų vėlinimui (< 150 ms). Mažiausias VoIP paketų vėlinimo standartinis nuokrypis gautas Vi prieigos kategorijos srautui - 0,23, o didžiausias esant BK ir BE prieigos kategorijos srautui - 1,9 esant vienam vartotojui. Esant dviem VoIP paslaugos vartotojams VoIP paketų vėlinimo standartinis nuokrypis didėjo visoms prieigos kategorijoms, išskyrus BE, kurios vėlinimo standartinis nuokrypis sumažėjo. Iš gautų standartinio nuokrypio reikšmių daroma prielaida, jog stabiliausias dvikryptis vėlinimas yra srautui, kuris naudoja Vi prieigos kategoriją.

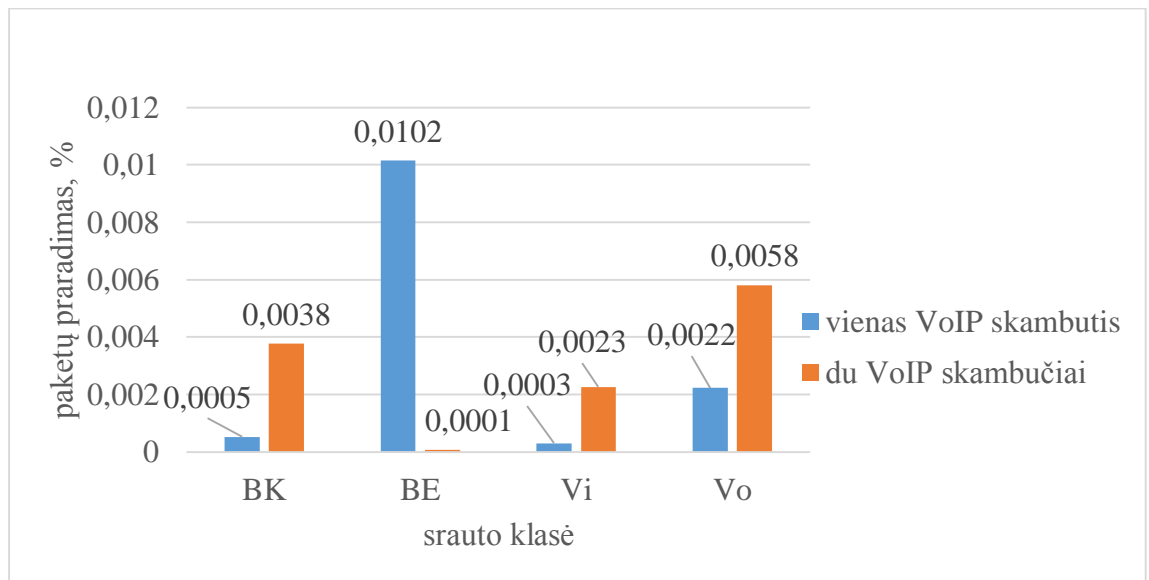
VoIP paketų vėlinimo fluktuacijos (4.10 paveikslėlis) BE ir Vo prieigos kategorijoms kito priešingai nei BK ir Vi, t.y. mažėjo didėjant VoIP vartotojų kiekiui. Mažiausios VoIP paketų vėlinimo fluktuacijos buvo Vi prieigos kategorijai 0,87 ms, o didžiausios 2,48 ms BE prieigos

kategorijai, kai tinkle buvo vienas VoIP skambutis. Esant dviem viena laikams VoIP skambučiams, lyginant su vienu VoIP skambučiu, vėlinimo fluktuacijos prieigos kategorijoms: BK – 11,9 %, BE – -33 %, Vi – 62 % ir Vo – -29 %. QoS rekomendacijoje nurodyta < 1 ms VoIP paketų vėlinimo fluktuacijų sąlyga nėra išpildoma, išskyrus Vi prieigos kategorijos srautui. VoIP paketų vėlinimo fluktuacijos yra kintantis dydis laike (ką ir rodo atlikto tyrimo rezultatai) ir gali būti siejamos tik su konkrečiomis perdavimo sąlygomis, kurios tyrimo metu buvo nepastovios. Daroma prielaida, jog WiFi tinkle, kuris dirba greta su kitais WiFi tinklais persidengiančiu kanalu, galimi VoIP paslaugos kokybės sumažėjimas ir sutrikimai.

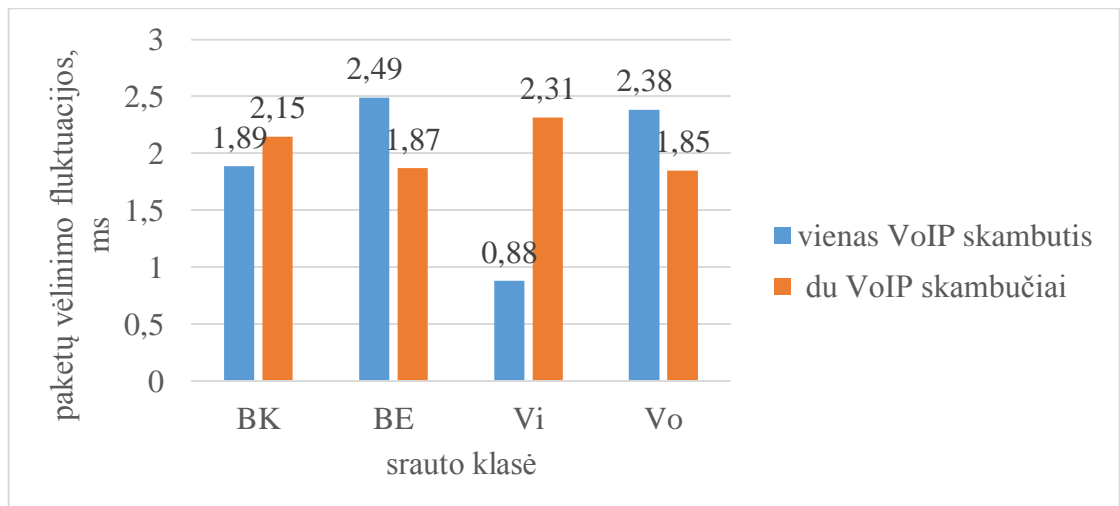
Tyrimo metu surinktuose rezultatuose (4.9 paveikslėlis) užfiksuoti sąlyginai maži VoIP paketų praradimai < 0,01 %, kurie nykstamai mažai įtakoja paslaugos kokybę ir tenkina QoS rekomendacijos sąlygą < 1 % VoIP paketų praradimo. Daroma prielaida, jog tinklas buvo apkraunamas minimaliai, nes perdavimo sparta Ethernete ~214 kb/s, esant dviem konkurencingiems VoIP skambučiams, o vieno VoIP skambučio atveju – 107 kb/s. Mažą paketų praradimą sąlygojo didesnis pakartotinai perduodamų kadru skaičius. 4.12 paveikslėlyje ir 4.5 lentelėje pateikiami surinkti duomenys iš Horst spektro analizatoriaus, atliekant VoIP paslaugos tyrimą. Jame matyti, jog visų kategorijų, išskyrus Vo, pakartotinių kadru perdavimas tiesiogiai priklauso nuo aptiktų įrenginių kiekio ir didėja didėjant įrenginių kiekiui. BG ir Vi prieigos kategorijų pakartotinių kadru perdavimų priklausomybės iš gautų rezultatų nustatyti nepavyko, nes gauti duomenys yra panašūs į atsitiktinius. Dėl laiko stokos nebuvo surinkti duomenys apie BE prieigos kategorijos perduodamų kadru retransmisijas.

4.4 lentelė. VoIP paketų tyrimo rezultatų standartinis nuokrypis

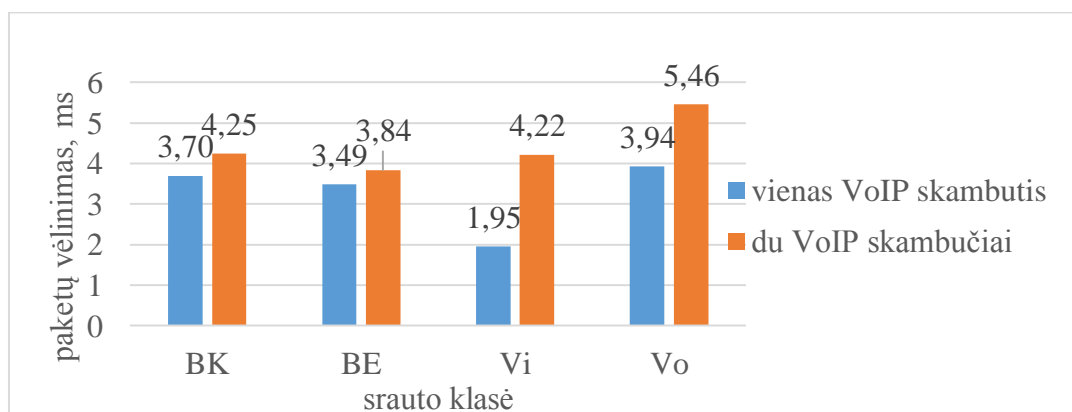
	Vėlinimo		Praradimo		Vėlinimo fluktuacijų	
	Vienas vartotojas	Du vartotojai	Vienas vartotojas	Du vartotojai	Vienas vartotojas	Du vartotojai
BK	1,93	2,04	0,001	0,009	1,444	0,540
BE	1,90	0,85	0,030	0,0001	0,443	0,532
Vi	0,23	1,12	0,0008	0,008	0,223	0,704
Vo	1,73	8,11	0,002	0,013	1,261	1,372



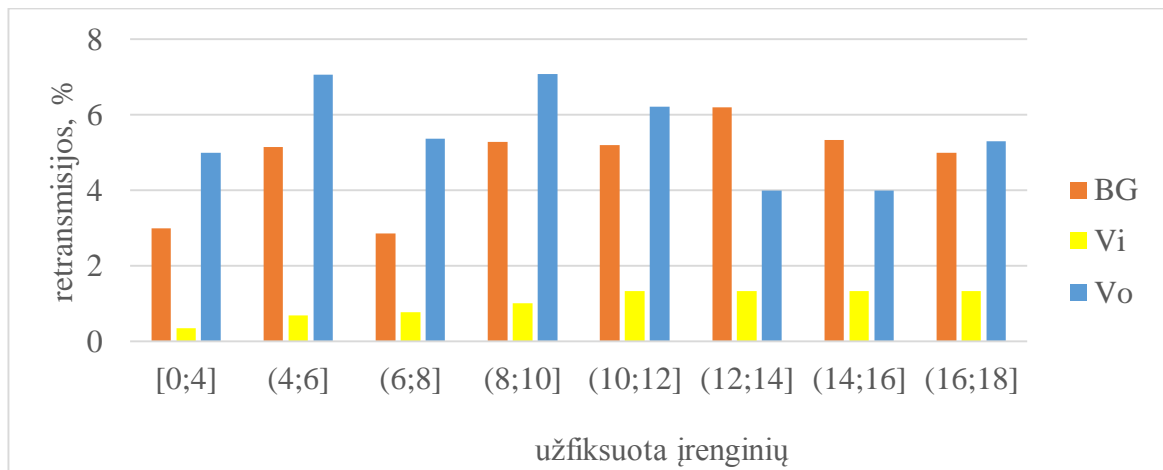
4.9 pav. VoIP paslaugos paketų praradimo priklausomybė nuo prieigos kategorijos ir vartotojų kiekio



4.10 pav. VoIP paslaugos paketų vėlinimo fluktuacijų priklausomybė nuo prieigos kategorijos ir vartotojų kiekio



4.11 pav. VoIP paslaugos paketų dvikrypčio vėlinimo priklausomybė nuo prieigos kategorijos ir vartotojų kiekio



4.12 pav. VoIP paslaugos kadrų retransmisijų prieigos kategorijoms priklausomybė nuo aptiktų įrenginių kiekio

4.5 lentelė. VoIP paslaugos kadrų retransmisijų vidurkiai ir standartiniai nuokrypiai

Užfiksuota įrenginių	BK		Vi		Vo	
	Vidurkis, %	Stand. nuokrypis	Vidurkis, %	Stand. nuokrypis	Vidurkis, %	Stand. nuokrypis
[0;4]	3	0,027	0,35	0,005	5	0,010
(4;6]	5,14	0,024	0,69	0,006	7,07	0,030
(6;8]	2,86	0,022	0,77	0,006	5,36	0,013
(8;10]	5,29	0,014	1	0,007	7,08	0,018
(10;12]	5,2	0,024	1,33	0,007	6,22	0,020
(12;14]	6,2	0,007	1,33	0,005	4	0,012
(14;16]	5,33	0,026	1,33	0,009	4	0,010
(16;18]	5	0,000	1,33	0,009	5,3	0,012

4.4. Siūlomi WMM protokolo parametrų pakeitimai

Eksperimentinius matavimų rezultatus tikslinga susieti su analitinėmis reikšmėmis. Taip galima palyginti rezultatus, atkreipti dėmesį į rezultatų nuokrypius ir nustatyti veiksnius, kurie turi didžiausią įtaką eksperimento rezultatams. Nustačius pagrindinius veiksnius rekomenduoti tikslingus parametrų pakeitimus. Pakeitimų patikrinimas atliekamas analitiniais skaičiavimais sudarius analitinį modelį, nes WMM parametrų keitimas naudotoje aparatinėje įrangoje nėra leidžiamas.

Eksperimento metu gauti paketų vėlinimai apskaičiuojami analitiškai, pasinaudojant 802.11n protokolo perdavimo charakteristikomis ir naudojantis 802.11 standarto aprašymu ir eksperimente naudotos įrangos konfigūracijos parametrais (4.1 lentelė ir 4.13 paveikslėlis).

Pradiniai duomenys imami iš WiFi stotelės švyturio (angl. *beacon*) kadro, kuriame yra nurodomi WMM parametrai (4.14 paveikslėlis) eksponentinėmis formomis. AIFSN, ECWmin, ECWmax ir TXOP parametrai gali būti skirtingi priklausomai nuo WiFi stotelės konfigūracijos. Kaip matyti WMM parametrai iš švyturio kadro (4.13 paveikslėlis) yra tokie patys, kaip ir rekomenduojami WMM (802.11e) protokolo apraše.

```

⊕ WME QoS Info: 0x8c
  Reserved: 00
⊕ AC Parameters ACI 0 (Best Effort), ACM no , AIFSN 3, ECWmin 4 ,ECWmax 10, TXOP 0
⊕ AC Parameters ACI 1 (Background), ACM no , AIFSN 7, ECWmin 4 ,ECWmax 10, TXOP 0
⊕ AC Parameters ACI 2 (Video), ACM no , AIFSN 2, ECWmin 3 ,ECWmax 4, TXOP 94
⊕ AC Parameters ACI 3 (Voice), ACM no , AIFSN 2, ECWmin 2 ,ECWmax 3, TXOP 47
    
```

4.13 pav. WMM parametrai švyturio kadre

Skaičiavimams taip pat reikalingi papildomi duomenys, kurie imami iš 802.11n standarto aprašymo, pateikiami 4.6 lentelėje.

4.6 lentelė. 802.11n fizinio lygmens parametrai [33]

Parametras	Trukmė, μ s
RxRFDelay	3
RxPLCPDelay	3
MacProcessingDelay	2
RxTxTurnaroundTime	2
CCATime	4
AirPropagationTime	< 1

Išsiskaičiuojami SIFS, DIFS ir aSlotTime laikiniai parametrai, naudojantis 1-3 formulėmis ir pateikiami 4.7 lentelėje. [33]

4.7 lentelė. Laikinių SIFS, DIFS ir aSlotTime parametrų reikšmės

Parametras	Trukmė, μ s
SIFS	10
DIFS	28
aSlotTime	9

Tolimesniems skaičiavimams tikslinga persiversti varžymosi lango dydį iš eksponentinės formos į laikinę ir su laikinėmis reikšmėmis atlikti tolimesnius skaičiavimus. [33]

$$CW_{min}[AC]=2^{ECW_{min}[AC]}-1, \quad (6)$$

$$CW_{max}[AC]=2^{ECW_{max}[AC]}-1, \quad (7)$$

$$AIFS[AC]=AIFSN[AC] \cdot aSlotTime + SIFS, \quad (8)$$

čia $CW_{min}[AC]$ – prieigos kategorijos pradinis varžymosi lango dydis laiko tarpais, $CW_{max}[AC]$ – prieigos kategorijos didžiausias varžymosi lango dydis laiko tarpais, $AIFS[AC]$ – prieigos kategorijos sutartinio vidinio kadro tarpo trukmė, $AIFSN[AC]$ – prieigos kategorijos sutartinis vidinio kadro laiko tarpo numeris, $ECW_{max}[AC]$ – eksponentinė CW_{max} forma, $ECW_{min}[AC]$ – eksponentinė CW_{min} forma; $SIFS$ - trumpas vidinio kadro laiko tarpas.

Pagal 6 ir 7 formules apskaičiuojami varžymosi lango parametrai kiekvienai prieigos kategorijai. Rezultatai pateikiami 4.8 lentelėje.

4.8 lentelė. Varžymosi langų parametrai kiekvienai kategorijai

CW_{max}[BK]	1023	CW_{min}[BK]	15
CW_{max}[BE]	1023	CW_{min}[BE]	15
CW_{max}[Vi]	15	CW_{min}[Vi]	7
CW_{max}[Vo]	7	CW_{min}[Vo]	3

Pagal 5 formulę suskaičiuojami kiekvienos prieigos kategorijos varžymosi lango dydžiai, rezultatai pateikiami 4.9 lentelėje. Retransmisijų kiekis pasirenkamas apibrėžtas pagal 802.11n standarto aprašą ir naudotą įrangą yra 7. [33]

4.9 lentelė. Varžymosi lango dydžiai pagal kategoriją, laiko intervalais

i	CW[BK, BE]	CW[Vi]	CW[Vo]
0	15	3	7
1	31	7	15
2	63	7	15
3	127	7	15
4	255	7	15
5	511	7	15
6	1023	7	15
7	2047	7	15

$$CW[AC]_{\mu s} = CW[AC]_{aSlotTime} \cdot aSlotTime \quad (9)$$

čia $CW[AC]_{\mu s}$ - varžymosi lango dydis μs ; $CW[AC]_{aSlotTime}$ - varžymosi lango dydis laiko intervalais; $aSlotTime$ – laiko intervalas, lygus 9 μs .

Perskaičiuojame varžymosi langus mikro sekundėmis pagal 9 formulę ir gauti rezultatai pateikiami 4.10 lentelėje.

4.10 lentelė. Varžymosi lango dydžiai pagal kategoriją, μs

i	CW[BK, BE]	CW[Vi]	CW[Vo]
0	135	27	63
1	279	63	135
2	567	63	135
3	1143	63	135
4	2295	63	135
5	4599	63	135
6	9207	63	135
7	18423	63	135

Kaip matyti, BK ir BE prieigos kategorijos turi didesnio dydžio varžymosi langus retransmisijoms. Vi ir Vo prieigos kategorijos turi mažo dydžio varžymosi langus ir yra skirtos realaus laiko paslaugoms, kurioms svarbiausia mažas vėlinimas ir mažos vėlinimo fluktuacijos. Būtent pastarosiomis, perduodant duomenis TCP protokolu, buvo gautos mažiausios vidutinės spartos reikšmės.

Naudojant Vi ir Vo prieigos kategorijas duomenų perdavimo srautams (nerealus laiko paslaugoms) ir esant apkrautam kanalui (vykstant kolizijoms) tikslinga būtų padidinti varžymosi lango dydį ir naudoti daugiau skirtingų dydžių varžymosi langų. Tokiu atveju padidinti vienos iš Vi ar Vo prieigos kategorijos varžymosi lango $CW_{max}[AC]$ parametą. Tokiu būdu padidinant spartą, lyginant su BE ir BK prieigos kategorijomis. Langų dydžiai apskaičiuojami taikant 5 ir 9 formules, Vi ir Vo prieigos kategorijoms padidinant didžiausio lango dydį taip, jog jis per visas retransmisijas didėtų. Rezultatai pateikiami 4.11 – 4.12 lentelėse.

4.11 lentelė. Varžymosi lango dydžiai pagal kategoriją, pakeitus CWmax parametą Vi ir Vo prieigos kategorijoms, laiko intervalais

i	CW[BK, BE]	CW[Vi]	CW[Vo]
0	135	7	3
1	279	15	7
2	567	31	15
3	1143	63	31
4	2295	127	63
5	4599	255	127
6	9207	511	255
7	18423	1023	511

4.12 lentelė. Varžymosi lango dydžiai pagal kategoriją, pakeitus CWmax parametą Vi ir Vo prieigos kategorijoms, μs

i	CW[BK, BE]	CW[Vi]	CW[Vo]
0	135	63	27
1	279	135	63
2	567	279	135
3	1143	567	279
4	2295	1143	567
5	4599	2295	1143
6	9207	4599	2295
7	18423	9207	4599

Lyginant su BK ir BE prieigos kategorijų varžymosi langais Vi ir Vo prieigos kategorijų langai yra apie du kartus mažesni.

Sudaromas analitinis skaičiavimo modelis, kuriuo apibrėžiamas duomenų kadro perdavimas 802.11n tinklu, kurio pagalba galima įvertinti paketo vėlinimą po i-tosios retransmisijos, išlaikus maksimalius varžymosi langus. Modelio parametrai: eksperimentiškai arba analitiškai nustatyta NAV skaitliuko reikšmė iš RTS kadro, AIFS[AC], CWmin[AC], CWmax[AC], retransmisijų kiekis. Modelis neįvertina: tikimybių perduoti sėkmingai paketą WiFi tinklu, vėlinimų, atsirandančių aukštesniuose lygmenyse ir įrangoje, tinkle dirbančių įrenginių kiekio.

Eksperimentiškai nustatoma NAV skaitliuko reikšmė, pridėjus RTS kadro trukmę, (3.5 paveikslėlis) (SIFS+CTS+SIFS+DATA+SIFS+ACK) yra 198 μ s, gauta iš RTS kadro, perduodant VoIP paketą (3.3 paveikslėlis) su tyrime naudota įranga. Eksperimento metu sujungimo sparta tarp vartotojo įrangos ir WiFi stotelės buvo 65 Mb/s. Analitinio modelio pagalba lyginami WMM standartiniais parametrais gautas paketų vėlinimas su modifikuotais WMM parametrais gautų paketų vėlinimu. Tokiu būdu galima įvertinti WMM parametrų pakeitimo įtaką paslaugos QoS.

Pagal 8 formulę apskaičiuojami AIFS[AC] parametrai kiekvienai prieigos kategorijai pateikiami 4.13 lentelėje.

4.13 lentelė. AIFS laikinių parametrų reikšmės pagal prieigos kategoriją

Parametras	Trukmė, μ s
AIFS[BE]	37
AIFS[BK]	73
AIFS[Vi]	28
AIFS[Vo]	37

$$RTS=3 \cdot SIFS, \quad (10)$$

čia RTS - prašymas perduoti kadra trukmė, μ s; SIFS - trumpo vidinio kadro laiko tarpo trukmė, μ s.

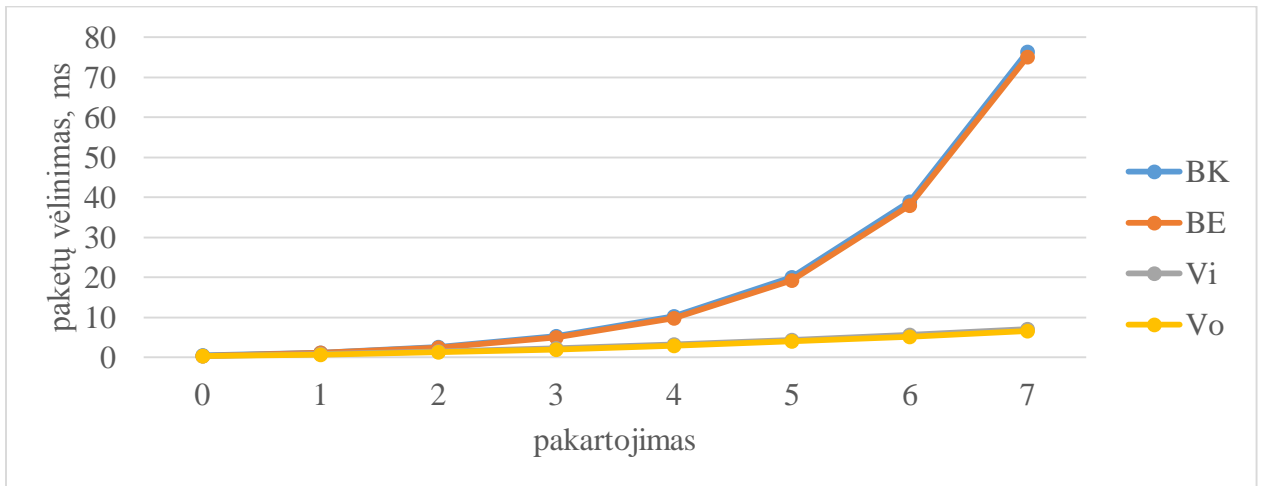
Prieš perdavimą yra laukiama AIFS[AC] laiko tarpo trukmė, po kurio yra i-tosios retransmisijos varžymosi langas $CW_i[AC]$, kurį pralaukus yra atliekamas perdavimas (2.5 paveikslėlis).

$$D(i) = CW_i[AC] + NAV + AIFS[AC] + RTS, \quad (11)$$

$$Dsum(i) = \sum_i D(i), \quad (12)$$

čia $D(i)$ – i-tosios retransmisijos vėlinimas μ s, $Dsum(i)$ – paketo vėlinimas po i-tųjų retransmisijų μ s; RTS - prašymo perduoti kadra trukmė, μ s; NAV - tinklo paskyrimo skaitliukas, μ s; $CW_i[AC]$ – prieigos kategorijos i-tojo perdavimo didžiausias varžymosi lango dydis, μ s; $AIFS[AC]$ - sutartinio vidinio kadro laiko tarpo trukmė, μ s.

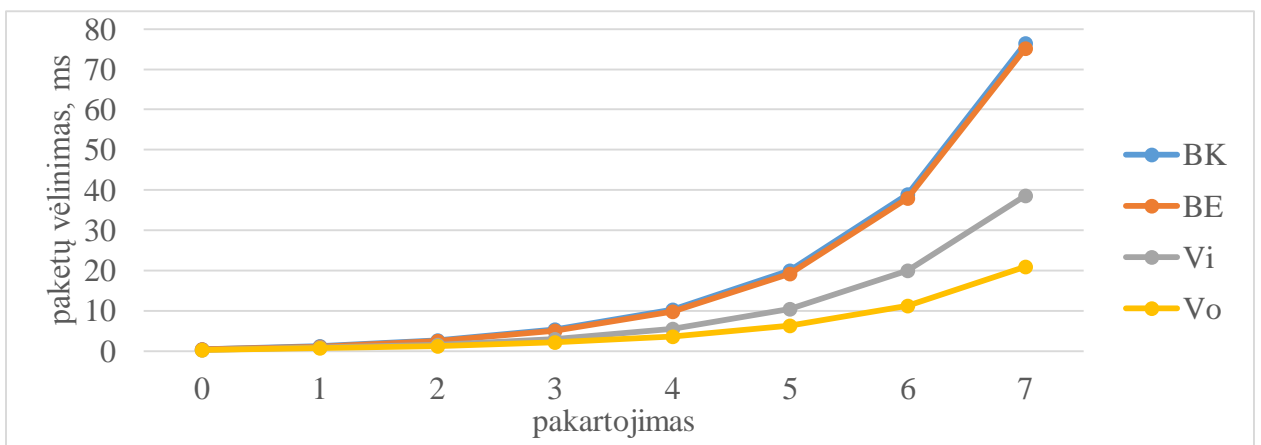
Pagal 12 formulę apskaičiuojamas paketų vėlinimas VoIP paketams, esant standartiniams WMM parametrams, rezultatai pateikiami 4.14 paveikslėlyje ir 4.14 lentelėje. Įvedami $CW_{max}[Vo]$ ir $CW[Vi]$ parametrų pakeitimus Vi ir Vo prieigos kategorijoms, jog varžymosi langas su kiekvienu pakartojimu didėtų. Paketų vėlinimas įvertinimas naudojant 12 formulę, rezultatai pateikiami 4.15 paveikslėlyje ir 4.15 lentelėje.



4.14 pav. Prieigos kategorijos paketų vėlinimo priklausomybė nuo pakartotinio VoIP paketo perdavimo naudojant standartinius WMM parametrus.

4.14 lentelė. Prieigos kategorijos paketų vėlinimo priklausomybė nuo pakartotinio VoIP paketo perdavimo, naudojant standartinius WMM parametrus, ms

i	BK	BE	Vi	Vo
0	0,436	0,4	0,319	0,292
1	1,224	1,116	0,801	0,684
2	2,652	2,436	1,446	1,248
3	5,296	4,936	2,254	1,984
4	10,308	9,768	3,225	2,892
5	19,992	19,236	4,359	3,972
6	38,956	37,948	5,656	5,224
7	76,416	75,12	7,116	6,648



4.15 pav. Prieigos kategorijos paketų vėlinimo priklausomybė nuo pakartotinio VoIP paketo perdavimo, naudojant nestandartinius WMM parametrus.

4.15 lentelė. Prieigos kategorijos paketų vėlinimo priklausomybė nuo pakartotinio VoIP paketo perdavimo, naudojant nestandartinius WMM parametrus, ms

i	BK	BE	Vi	Vo
0	0,436	0,4	0,319	0,292
1	1,224	1,116	0,801	0,684
2	2,652	2,436	1,59	1,248
3	5,296	4,936	2,974	2,128
4	10,308	9,768	5,529	3,612
5	19,992	19,236	10,407	6,276
6	38,956	37,948	19,912	11,272
7	76,416	75,12	38,652	20,904

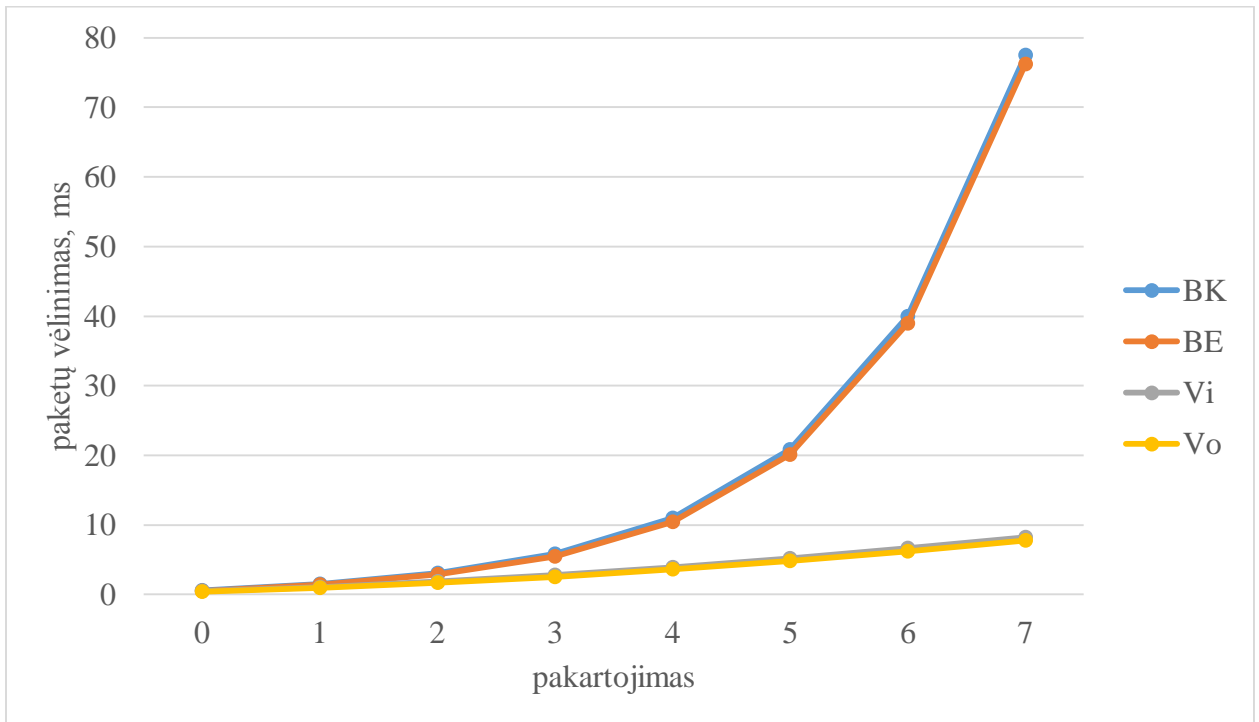
Kaip matyti iš 4.14 paveikslėlio, didėjant pakartojimų kiekiui kadro vėlinimas didėja dvigubai, lyginant su ankstesniu perdavimu. Skirtingų retransmisijų kiekiai kiekvienam kadru gali sukelti neleistinas VoIP paketų vėlinimo fluktuacijas, nors VoIP paketų vėlinimas ir VoIP paketų praradimas neviršytų QoS užsiduotų didžiausių verčių. Kai retransmisijų kiekis yra ne didesnis nei du, yra tenkinami QoS reikalavimai realaus laiko paslaugoms. Padidinus $CW_{max}[Vo]=511$ ir $CW_{max}[Vi]=1023$ nėra viršijama rekomenduojama VoIP paketų vėlinimo riba, tačiau kintant retransmisijų kiekiui galimos paketų vėlinimo fluktuacijos, dėl kurių būtų viršijama rekomendacijose nurodyta < 1 ms paketų vėlinimo fluktuacijų reikšmė. Todėl didėjant CW_{max} parametrai ir atliekant VoIP skambučius tinkle galimi QoS sutrikimai. Paketų vėlinimo fluktuacijų išvengimui paketų vėlinimo kreivė turi didėti kuo mažiau, ką ir matome 4.14 paveikslėlyje naudojant standartinę CW_{max} reikšmę.

TCP protokolo atveju vėlinimas yra tiesiogiai susijęs su perdavimo sparta ir paketų praradimu. Didinant CW_{max} parametrai galima sumažinti kolizijų kiekį Vi ir Vo prieigos kategorijoms, tačiau didėja paketų vėlinimas. Bet lyginant su BK ir BE prieigos kategorijų vėlinimus su Vi ir Vo prieigos kategorijomis vėlinimas yra mažesnis. Sumažinant perduodamų duomenų paketų vėlinimą, taip vadinamą „pralaidumo-vėlinimo produktą“ (angl. *bandwidth-delay product*), kuris naudojamas TCP lango dydžiui apskaičiuoti ir tiesiogiai nusako perdavimo spartą, apskaičiuojamas pagal (13) formulę. [34]

$$Teorinis_TCP_pralaidumas = TCP_lango_dydis * 8 / dvikryptis_vėlinimas \quad (13)$$

Pirmiausiai atliekami skaičiavimai įvertinant duomenų perduodamų TCP paketų vėlinimą, naudojant 12 formulę. Eksperimentiškai nustatyta NAV skaitliuko reikšmė perduodant TCP

duomenų paketus yra 338 μ s. Rezultatai pateikiami 4.16 paveikslyje ir 4.16 lentelėje naudojant standartinius WMM parametrus.



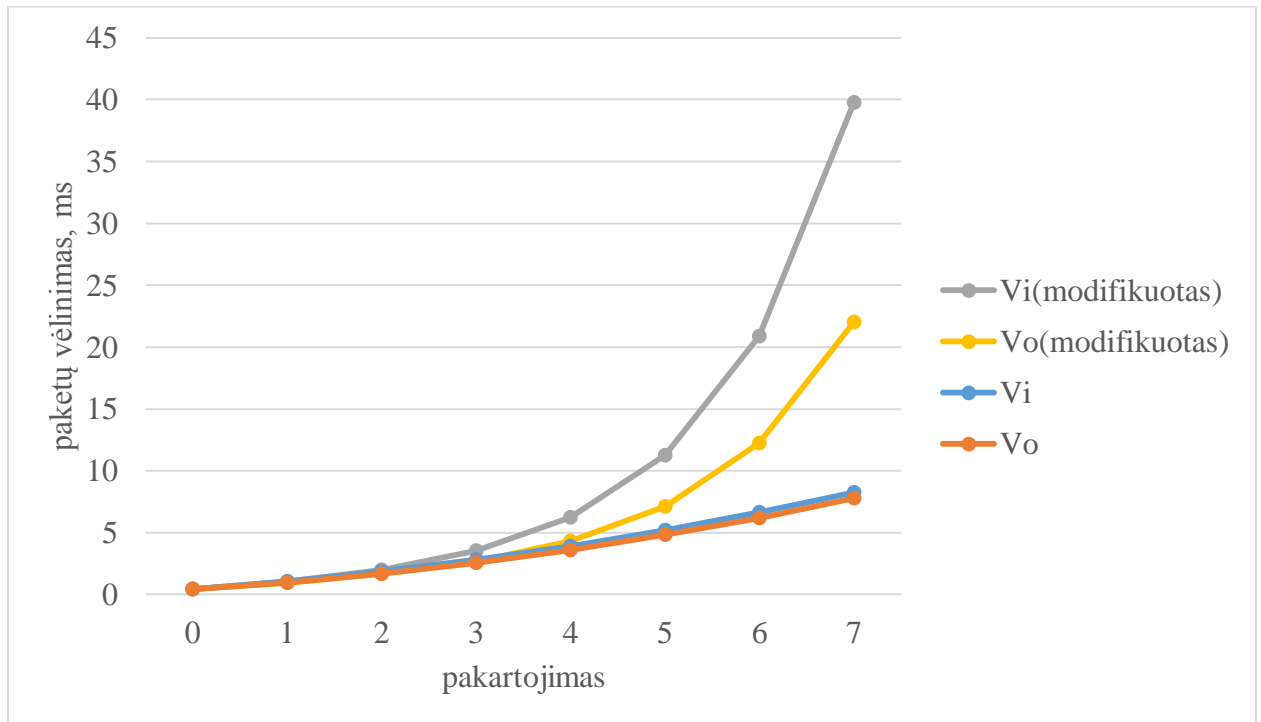
4.16 pav. Prieigos kategorijos paketų vėlinimo priklausomybė nuo pakartotinio TCP srauto perdavimui naudojant standartinius WMM parametrus.

4.16 lentelė. Prieigos kategorijos paketų vėlinimo priklausomybė nuo pakartotinio TCP srauto perdavimui naudojant standartinius WMM parametrus, ms.

i	BK	BE	Vi	Vo
0	0,576	0,54	0,459	0,432
1	1,504	1,396	1,081	0,964
2	3,072	2,856	1,866	1,668
3	5,856	5,496	2,814	2,544
4	11,008	10,468	3,925	3,592
5	20,832	20,076	5,199	4,812
6	39,936	38,928	6,636	6,204
7	77,536	76,24	8,236	7,768

Atsižvelgus į tyrime gautas TCP protokolu perduodamų duomenų spartas, didinami varžymosi langai Vi ir Vo prieigos kategorijoms, taip jog varžymosi langas po kiekvieno pakartojimo didėtų. Vėlinimo įvertinimui naudojami anksčiau suskaičiuoti nauji Vi ir Vo prieigos

kategorijų varžymosi langų dydžiai (4.12 lentelė). Rezultatai, apie Vi ir Vo prieigos kategorijas, pateikiami sekančiuose 4.17 paveikslėlyje ir 4.17 lentelėje.



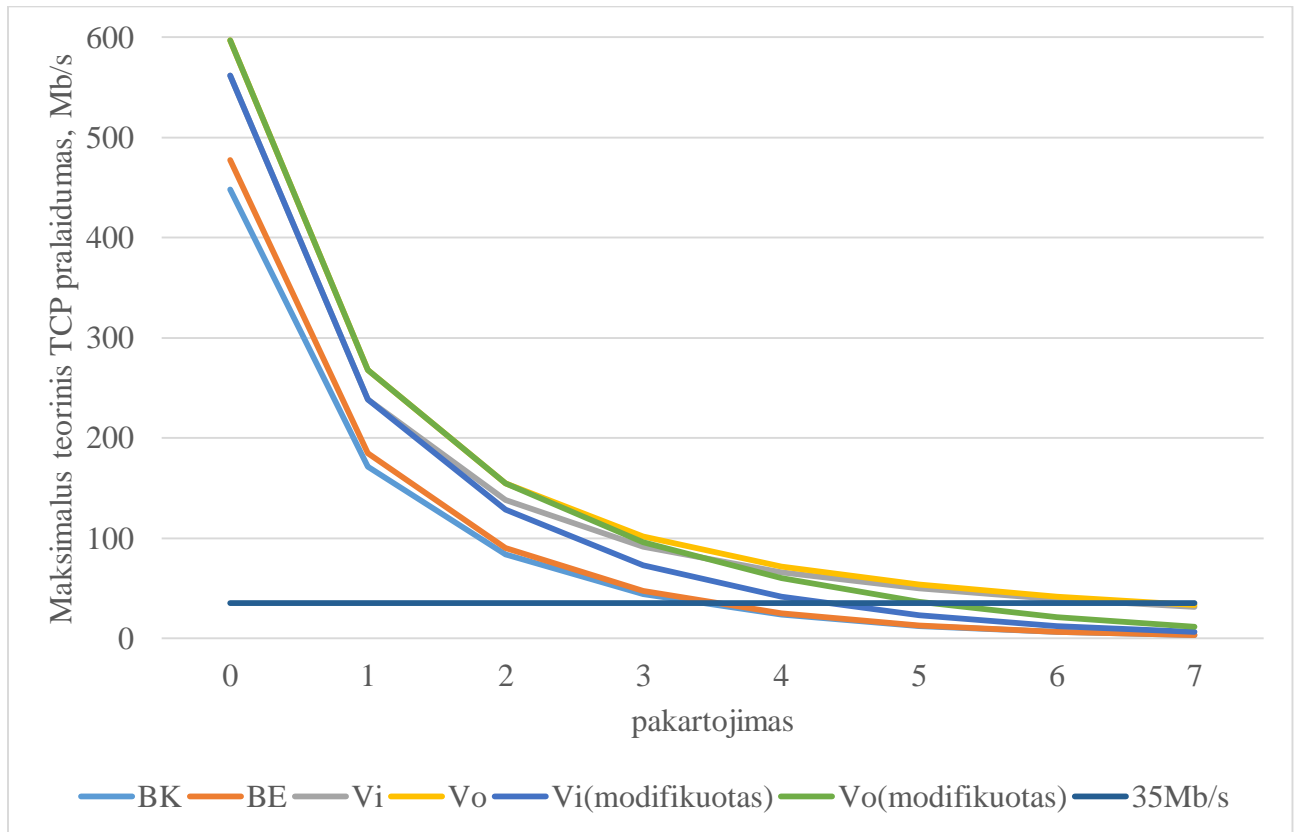
4.17 pav. Vi ir Vo prieigos kategorijų TCP duomenų paketų vėlinimai, esant modifikuotiems ir nemodifikuotiems WMM parametrus

Kaip matyti iš 4.17 paveikslėlio modifikuotų prieigos kategorijų vėlinimas didėja eksponentiškai. Sparčiausiai iš modifikuotų prieigos kategorijų didėja Vi prieigos kategorijos srautas. Tuo pačiu šios prieigos kategorijos varžymosi langas greičiausiai didėja lyginant su Vo prieigos kategorijos varžymosi langu. Todėl daroma prielaida jog taip galima išvengti kolizijų.

4.17 lentelė. Prieigos kategorijos paketų vėlinimo priklausomybė nuo pakartotinio TCP srauto perdavimui naudojant ne standartinius WMM parametrus, ms.

i	BK	BE	Vi	Vo
0	0,576	0,54	0,459	0,432
1	1,504	1,396	1,081	0,964
2	3,072	2,856	2,01	1,668
3	5,856	5,496	3,534	2,688
4	11,008	10,468	6,229	4,312
5	20,832	20,076	11,247	7,116
6	39,936	38,928	20,892	12,252
7	77,536	76,24	39,772	22,024

Atliekamas TCP teorinio pralaidumo įvertinimas naudojant 13 formulę. TCP lango dydis yra nustatomas operacinės sistemos parametras. Tyrime naudotuose kompiuteriuose įdiegta Windows 7 operacinė sistema, kurios standartinis lango dydis yra 64KB. Skaičiavimams imamas dvigubas dvikryptis TCP duomenų paketų vėlinimas. Apskaičiuojama su kiekvienos prieigos kategorijos pakartojimo vėlinimu (4.17 lentelė).



4.18 pav. Teorinė maksimali TCP pralaidumo priklausomybė nuo pakartotinio perdavimo

Kaip matyti (4.18 pav.) po antrojo pakartotinio perdavimo BK ir BE prieigos kategorijų srautų teoriniai TCP pralaidumai susilygina. TCP maksimalus teorinis pralaidumas visoms prieigos kategorijoms mažėja eksponentiškai. Praktinis TCP srauto pralaidumas visada yra mažesnis už teoriškai apskaičiuotąjį. TCP pralaidumo sparta tyrimo metu neviršydavo ~35 Mb/s, todėl teoriškai gali vykti iki 4 kolizijų naudojant BE ir BK prieigos kategorijas. Taip pat analizuojant 4.18 paveikslėlį galima matyti jog teorinis TCP pralaidumo skaičiavimas neatitinka tyrimo metu išmatuotų Vi ir Vo kategorijų pralaidumo. Tačiau iš tyrimo rezultatų matyti, jog CWmax parametro dydis turėjo įtakos pralaidumui ir didesnės jo reikšmės lėmė didesnę TCP perdavimo spartą. Balansavimui tarp didelės spartos ir mažo vėlinimo siūloma naudoti $CW_{max}[Vi]=1023$ reikšmę taip sumažinant duomenų vėlinimą, padidinant spartą (4.18 lentelė) ir tuo pačiu sumažinant tikėtiną kolizijų kiekį belaidžiamame WiFi tinkle veikiant aplinkoje, kurioje yra aplinkui veikiančių kitų tinklų.

4.18 lentelė. Modifikuotos Vo prieigos kategorijos TCP pralaidumo padidėjimas lyginant su BE prieigos kategorijos teoriniu TCP pralaidumu, %

i	Vo(modifikuotas)/BE, %
0	25
1	44,8133
2	71,223
3	104,464
4	142,764
5	182,125
6	217,728
7	246,168

Likusių prieigos kategorijų parametrus siūloma palikti standartinius, kad būtų pavyzdžiui, išlaikomas VoIP srautams mažas paketų vėlinimas ir mažas paketų vėlinimo fluktuacijos. Apibendrinant TCP protokolas nustato ir padeda išvengti tinklo perkrovų, tačiau tik jei paketas yra prarandamas ne dėl tinklo perkrovos, o dėl retransmisijų kiekio. Tokiu būdu sumažinamas pralaidumas TCP srauto sparta. Todėl geriau belaidžiame WiFi tinkle naudoti metodikas, kurias žemesniuose OSI lygmenyse atliktų kadro pakartojimą.

Išvados.

1. Tyrimo metu nustatyti realioje aplinkoje veikiantys 802.11 įrenginiai, kurių kanalai persidengia su eksperimente naudoto prieigos taško kanalu – 18 taškų. Nustatytas didžiausio naudojimosi WiFi tinklais laikotarpis yra nuo 8h iki 16h, t.y., universiteto darbo valandomis.
2. Atlikus tyrimą nustatyta didžiausia vidutinė duomenų perdavimo TCP protokolu žemynkryptėje sparta yra 28,99 Mb/s naudojant BE prieigos kategoriją, aukštynkryptėje - 32,4Mb/s naudojant Vo prieigos kategoriją. Žemynkryptei duomenų perdavimo spartai TCP protokolu sparta tiesiogiai priklauso nuo prieigos kategorijos parametro CWmax, nurodančio didžiausio varžymosi lango dydį. Pagal gautus aukštynkryptio perdavimo rezultatus nėra akivaizdaus rezultatų išsiskyrimo pagal prieigos kategorijas, todėl daroma prielaida, jog vartotojo įranga nedirba korektiškai pagal WMM (802.11e) protokolą.
3. Ištyrus VoIP kokybę nustatyta, jog prieigos kategorijai Vi gautos paketų vėlinimo ir paketų vėlinimo fluktuacijos tenkino ITU QoS rekomendacijoje nurodytas reikšmes. Likusios prieigos kategorijos tenkino tik ITU QoS rekomendacijoje pateiktas paketų vėlinimo ir prarastų paketų reikšmes, nes padidėjusios paketų vėlinimo fluktuacijos nebetenkino ITU QoS rekomendacijos.
4. Įvertinus gautus rezultatus siūloma padidinti CWmax[Vi] WMM (802.11e) parametą iki 1023, dėl ko galima padidinti teorinį TCP pralaidumą iki pusantro karto lyginant su BE prieigos kategorijos teoriniu TCP pralaidumu.

Literatūros sąrašas

1. J.K.Choi, J.S.Park, J.H. Lee, K.S. Ryu. Review on QoS issues in IEEE 802.11 W-LAN. 2006m.
2. Wi-Fi Alliance. Wi-Fi CERTIFIED™ for WMM™ - Support for Multimedia Applications with Quality of Service in Wi-Fi® Networks. 2004m.
3. Ian Dangereld, David Malone, Douglas J. Leith. Experimental Evaluation of 802.11e EDCA for Enhanced Voice over WLAN Performance. 2006m.
4. Yue Fang, Daqing Gu, A. Bruce McDonald, Jinyun Zhang. On the Performance Enhancement of Wireless LAN — A Multi-polling Mechanism with Hidden Terminal Solution. 2005m.
5. Katarzyna Kosek, Marek Natkaniec, Luca Vollero, Andrzej R. Pach. An Analysis of Star Topology IEEE 802.11e Networks in the Presence of Hidden Nodes. 2008m.
6. G. G. Md. Nawaz Ali, Rashma Shahin, Nushrika Mowna. Fair Slots Assignment Mechanisms of IEEE 802.11 Networks for Multiple Access Points. 2009m.
7. Dariusz Kościelnik. Simulation Study of the Influence of Hidden Stations for the Quality of Service in the IEEE802.11e WLAN. 2008m.
8. Anthony C.H. Ng, David Malone, Douglas J. Leith. Experimental Evaluation of TCP Performance and Fairness in an 802.11e Test-bed. 2005m.
9. Katarzyna Kosek, Marek Natkaniec, Luca Vollero, Andrzej R. Pach. Performance Analysis of 802.11e Networks with Hidden Nodes in a Star Topology. 2008m.
10. Teerapat Sanguankotchakorn, Aravinthan Gopalasingham, Nibuhiko Sugino. Adaptive Channel Access Mechanism for Real Time Traffic Over IEEE 802.11e Wi-Fi Network. 2013m.
11. Yong He and Xiaojun Ma. Deterministic Backoff: Toward Efficient Polling for IEEE 802.11e HCCA in Wireless Home Networks. 2011m.
12. ITU-T. ITU-T Rec. G.1010 (11/2001): SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA,DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS Quality of service and performance. 2002m.
13. B. H. Walke, S. Mangold, L. Berlemann. IEEE 802 wireless systems: protocols, Multihop Mesh/relaying, performance and spectrum coexistence. Willey & Sons, 2006.
14. M. Souter. Communication systems for the mobile information society. Willey & Sons,

- 2006.
15. FCC. Topic 10: License-Exempt Wireless Applications for Public Safety. Žiūrėta [2014-04-12]. Prieiga per internetą <<http://transition.fcc.gov/pshs/techttopics/techttopics10.html>>
 16. Wi-Fi alliance. Wi-Fi certified n: long-range, faster-throughput, multimedia-grade Wi-Fi networks. 2009.
 17. Cisco. White paper: 802.11n: The Next Generation of Wireless Performance. 2007m.
 18. Alan Holt, Chi-Yu Huang. 802.11 Wireless Networks Security and Analysis. Springer 2010m.
 19. F. Dowla. Handbook of RF and wireless technologies. Elsevier, 2004.
 20. Wi-Fi alliance. Wi-Fi CERTIFIED™ for WMM™ - Support for Multimedia Applications with Quality of Service in Wi-Fi® Networks. 2004m.
 21. Qiang Ni*, Lamia Romdhani, Thierry Turletti. A Survey of QoS Enhancements for IEEE 802.11 Wireless LAN. Wiley. 2004.
 22. S. Mangold, S. Choi, G. R. Hiertx, O. Klein, B. Walke. Analysis of IEEE 802.11e for QoS support inf wireless LANs. IEEE Wireless Communications, 2003. Žiūrėta [2015-03-05]. Prieiga per internetą <<http://morse.colorado.edu/~timxb/5520/ho/Mangold80211e.pdf>>
 23. Cisco. White paper: 20 Myths of Wi-Fi Interference: Dispel Myths to Gain High-Performing and Reliable Wireless. 2007m.
 24. Ramakrishna Gummadi, David Wetherall, Ben Greenstein, Srinivasan Seshan. Understanding and Mitigating the Impact of RF Interference on 802.11 Networks.
 25. Anatolij Zubow, Robert Sombrutzki. Reinvestigating Channel Orthogonality – Adjacent Channel Interference in IEEE 802.11n Networks.
 26. Ian Poole. What is MIMO? Multiple Input Multiple Output Tutorial. Žiūrėta [2014-05-23]. Prieiga per internetą <<http://www.radio-electronics.com/info/antennas/mimo/multiple-input-multiple-output-technology-tutorial.php>>.
 27. Meraki White Paper: 802.11n Technology. Žiūrėta [2014-05-23]. Prieiga per internetą <https://meraki.cisco.com/lib/pdf/meraki_whitepaper_802_11n.pdf>
 28. Iperf programinis paketas. Žiūrėta [2015-01-19]. Prieiga per internetą <<https://iperf.fr/>>
 29. A. Botta, A. Dainotti, A. Pescapè, "A tool for the generation of realistic network workload for emerging networking scenarios", Computer Networks (Elsevier), 2012, Volume 56, Issue 15, pp 3531-3547. Žiūrėta [2014-09-05]. Prieiga per internetą

- <<http://traffic.comics.unina.it/software/ITG/documentation.php>>
30. “Horst” is a small, lightweight IEEE802.11 wireless LAN analyzer. Žiūrėta [2014-11-09]. Prieiga per internetą <<http://br1.einfach.org/tech/horst>>
31. Ubuntu. Hardware Support Components Wireless Network Cards Buffalo. Žiūrėta [2014-10-12]. Prieiga per internetą <<https://help.ubuntu.com/community/HardwareSupportComponentsWirelessNetworkCardsBuffalo>>
32. TEO, AB. Modemo maršrutizatoriaus naudojimo instrukcija. Žiūrėta [2014-10-12]. Prieiga per internetą <http://www.teo.lt/sites/default/files/instrukcijos/PRG_EA4201N-G_ilgoji_instrukcija_new.pdf>
33. IEEE Computer Society. „Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications“, 2012m.
34. NASA research & engineering network. „Customer service: TCP windows sizes“. Žiūrėta [2015-04-10]. Prieiga per internetą ><http://www.nren.nasa.gov/tcpwindows.html>>