VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS
UNIVERSITETAS

Arūnas Šaltis

RADIJO TECHNOLOGIJOS VARTOTOJŲ PRIEIGŲ TINKLUOSE

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T

Vilnius, 2004

Disertacija rengta 1999 - 2003 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Disertacija ginama eksternu.

Darbo mokslinis vadovas:

prof. habil. dr. Algimantas Kajackas (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija – 01T).

TURINYS

1. ĮVADAS 5
2. BEVIELIAI VIETINĖS KREIPTIES TINKLAI IR JŲ TIPINIS TAIKYMAS 9
2.1 Įvadas 9
2.2 Tipinės bevielio ryšio priemonės ir jų taikymas 10
2.3 WLAN technologijos 14
2.3.1 WLAN topologijos 14
2.3.2 WLAN tinklo standartai 15
2.3.3 IEEE 802.11 standarto WLAN tinklai 15
2.4 WLAN tyrimų santrauka 32
2.5 Skyriaus išvados 32
3. WLAN PAGRINDU VEIKIANČIŲ VARTOTOJŲ PRIEIGŲ TINKLŲ TYRIMAS 34
3.1 Vartotojų prieigos ir tinklai 34
3.2 WLAN parametrai ir charakteristikos 36
3.2.1 Fizinio kanalo sparta 37
3.2.2 WLAN kanalo laidumas 38
3.2.3 WLAN – masinio aptarnavimo sistema 43
3.3 Eksperimentiniai IEEE 802.11b įrenginių tyrimai 45
3.3.1 Eksperimentų metodika 45
3.3.2 Perdavimo sparta 47
3.3.3 WLAN radijo kanalų savitarpio efektai 48
3.3.4 Klaidų pasirodymo priklausomybė 50
3.3.5 Signalo ir triukšmo lygio matavimas per ilgą laiko periodą 51
3.4 Skyriaus išvados 52
4. BALSO IR DUOMENŲ PERDAVIMAS VARTOTOJŲ PRIEIGŲ TINKLAIS 54
4.1 Duomenų perdavimo vartotojų tinklais ypatumai 54
4.1.1 Eksperimentiniai duomenų perdavimo tyrimai 54
4.1.2 Duomenų šaltiniai ir jų modeliai 57
4.1.3 Duomenų srautų generavimas 70
4.2 Balso perdavimo paketais ypatumai 72
4.2.1 Kalbos modelis 74
4.2.2 Eksperimentiniai balso signalų tyrimai 78
4.2.3 Balso modelio patikslinimai 80
4.2.4 Balso srautų generavimas 84

4.2.5 Balso perdavimo WLAN tinklu efektyvumo tyrimai 85
4.3 Skyriaus išvados 91
5 WLAN ADAPTACIJA VARTOTOJŲ TINKLAMS 93
5.1 Geresnio ryšių kanalo naudojimo būdai 93
5.1.1 Duomenų srautų kompresijos būdai 94
5.1.2 Paketų multipleksavimas 94
5.1.3 Kompleksinis multipleksavimo protokolas. 100
5.2 Paketų multipleksavimo efektyvumo tyrimai 110
5.2.1 Analitinis balso multipleksavimo tyrimas 110
5.2 Multipleksavimo protokolo modeliavimas 115
5.2.1 Tyrimų metodika 115
5.2.2 Modeliavimo rezultatai 116
5.3 Skyriaus išvados 128
6. DARBO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS 130
LITERATŪRA 132
SANTRUMPŲ SĄRAŠAS 143
SIMBOLIŲ IR KINTAMŲJŲ SĄRAŠAS 145
1 PRIEDAS. PROGRAMŲ IŠEITIES TEKSTŲ KOMPAKTINĖ PLOKŠTELĖ 147

1. ĮVADAS

Darbo aktualumas. Šiuo metu vykstanti sparti telekomunikacijų rinkos liberalizacija skatina atsirasti vis daugiau naujų paslaugų tiekėjų. Tačiau telekomai, turėję telekomunikacijų rinkos monopolį, vis dar dominuoja vietinių prieigų srityje, sulaukdami nedidelės konkurencijos iš naujų rinkos dalyvių ir tokiu būdu išlaikydami aukštus linijų nuomos tarifus. Naujai į rinką atėję operatoriai, kurie nėra linkę nuomotis ryšio kanalų iš egzistuojančių telekomų, privalo tiestis naujas ryšio linijas. Tačiau tai tinka tik tuo atveju, jei vietovės yra tankiai apgyvendintos, t. y. ten, kur vartotojų skaičius yra didelis, o mažai apgyvendintose vietovėse tai daryti per brangu. Tokiose vietovėse labiau tinka naudoti bevielės kreipties tinklus. Tam tikslui paslaugų tiekėjams buvo sukurta įranga, specialiai skirta fiksuotai bevielei kreipčiai, ir paskirti atitinkami dažnių ruožai. Vis dėlto tokia technologija nėra plačiai paplitusi dėl aukštų diegimo kainų politikos, todėl kaip alternatyva fiksuotai bevielei kreipčiai vis dažniau yra siūloma naudoti bevielius vietinius tinklus, pavyzdžiui, IEEE 802.11 ar ETSI HiperLAN standartų šeimą. Tokių tinklų pagrindu įmanoma kurti alternatyvius telekomunikacinius tinklus.

Iki šiol nėra atlikta detali tokių technologijų, skirtų didelės spartos ryšiui retai apgyvendintose urbanizuotose vietovėse diegti, analizė, nors darbų skaičius šia tema didėja. Todėl šiuo darbu yra bandoma papildyti tokių tyrimų sąrašą bei paskatinti alternatyvius egzistuojančių ryšių technologijų panaudojimo tyrimus Lietuvoje. Ateityje šio darbo pagrindu būtų galima kurti regioninius plėtros planus, skatinti informacinių sistemų plėtrą Lietuvai integravusis į Europos Sąjungą.

Darbo tikslai ir uždaviniai. Šio darbo tikslas – išnagrinėti šiuolaikines radijo ryšio technologijas ir parengti metodiką bei priemones jų įdiegimui vartotojų prieigų tinkluose.

Darbo tikslui įgyvendinti formuluojami šie uždaviniai:

1. išnagrinėti standartizuotus bevielio ryšio įrenginius, sukurti metodiką jų galimybėms netipinėse vartotojų prieigų tinklų sąlygose vertinti;
2. eksperimentiškai ištirti bevielio radijo ryšio priemones, veikiančias nelicencijuojamame dažnyje, ir nustatyti jų esminius parametrus;
3. išnagrinėti balso kodavimo būdus ir patikslinti balso sukuriamų duomenų srautų modelius;
4. ištirti informacinių technologijų vartotojų sukuriamų duomenų srautus ir parinkti jų modelius;

5. parengti metodiką ir priemones racionaliam bevielio ryšio technologijų naudojimui informacinių technologijų vartotojų prieigų tinkluose.

Mokslinis naujumas. Pasaulyje vystantis informacinei visuomenei, prisijungimas prie viešųjų interneto bei telefonų tinklų iš bet kurios pasaulio vietos tampa vis labiau aktualus. Todėl pasaulyje atlikta daug darbų vartotojų prieigų optimizavimo, naujų technologijų ir protokolų kūrimo srityse, pradedant nuo fundamentalių radijo ryšio moduliacijų tyrimo iki ekonominių vartotojų prieigų aspektų. Dėl uždavinio kompleksiškumo dauguma duomenų perdavimo tyrimų buvo atliekama esant tipinėms sąlygoms, o šiame darbe nagrinėjamas netipinis standartizuotų LAN ir WLAN tinklų įrenginių pagrindu sukurtas vietinis tinklas, toliau vadinamas vartotojų prieigų tinklu (VPT). VPT būtini prieigų prie bendrųjų tinklų resursų punktai (infrastruktūros požymiai), o vartotojų įranga veikia ir kaip terminalai, ir kaip retransliatoriai (ad hoc mazgų funkcijos). Tokia mišri tinklo architektūra yra nauja, šia tema atlikta mažai tyrimų.

Esminiai šio darbo naujumo elementai:

1. Lietuvos sąlygomis eksperimentiškai ištirti IEEE 802.11b standartų įrenginiai;
2. pasiūlyti vartotojų prieigų tinklai, jų vertinimo kriterijai;
3. nustatytos balso kalbos/tylos intervalų tarpusavio koreliacinės savybės;
4. riboto laidumo radijo ryšio kanalo panaudojimo efektyvumui didinti pasiūlytas balso ir duomenų bendro grupavimo protokolas, atlikti jo tyrimai;
5. grupavimo protokole pasiūlyta adaptyvi išsiuntimo schema, atlikti jos tyrimai. Naujas paketų grupavimo protokolas taikytinas tiek Lietuvoje, tiek kitose šalyse kuriant vartotojų tinklus.

Disertaciniame darbe autorius gina:

1. Radijo technologijų vertinimo bei jų taikymo vartotojų prieigų tinkluose metodiką.
2. Eksperimentinių IEEE 802.11b protokolo įrenginių tyrimų rezultatus.
3. Koreguotą balso kalbos/tylos intervalų modelį.
4. Balso ir duomenų paketų bendro grupavimo algoritmą.

Darbo aprobavimas. Pagrindiniai autoriniai darbo rezultatai pristatyti šiose mokslinėse konferencijose:

1. „Vaizdo ir garso perdavimo technologijų apžvalga“. Jaunųjų mokslininkų konferencijoje "Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities”, Vilnius, 2000 m.
2. „Interneto srauto duomenų analizė“. Jaunųjų mokslininkų konferencijoje "Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities", Vilnius, 2001 m.

3. „Apie informacinių technologijų vertinimą ir parinkimą“. Konferencijoje „Elektronika’2001”, Kaunas, 2001 m.
4. „Bevielio ryšio tyrimas“. Jaunųjų mokslininkų konferencijoje "Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities", Vilnius, 2002 m.
5. „Customer Premises Local Area Network: concept and problems”. Konferencijoje „Elektronika’2002”, Kaunas, 2002 m.
6. „Balso perdavimo IEEE 802.XX protokolo tinklais ypatumų analizė“. Konferencijoje „Elektronika’2002”, Kaunas, 2002 m.
7. „IEEE 802.11 tinklų tyrimas“. Konferencijoje „Elektronika’2002“. Kaunas, 2002 m.
8. „EMC Aspects and Analysis of Hierarchical Wireless Local Area Networks”. Konferencijoje “16th International Wroclaw Symposium on EMC”, Vroclavas, Lenkija, 2002 m.
9. „Paketinio radijo ryšio 2,4 GHz dažniu ruože eksperimentiniai tyrimai“. Konferencijoje „Elektronika’2003”, Vilnius, 2003 m.
10. „Balso perdavimo IEEE802.xx protokolo tinklais ypatumų analizė“. Konferencijoje „Elektronika’2003”, Vilnius, 2003 m.
11. „Balso signalų aktyvumo ir tylos intervalų tyrimai“. Konferencijoje „Elektronika’2003”, Vilnius, 2003 m.
12. „Balso ir duomenų paketų grupavimai ir jų įtaka ryšio kanalo panaudojimo efektyvumui“. Konferencijoje „Elektronika’2004”, Vilnius, 2004 m.
13. „One radio channel packet implementation interference analysis”. Konferencijoje “17th International Wroclaw Symposium on EMC”, Vroclavas, Lenkija, 2004 m.

Praktinis darbo rezultatų taikymas. Disertacijoje gauti rezultatai gali būti tiesiogiai taikomi kuriant ir diegiant vartotojų ar kitokius tinklus, kuriuose kaip informacijos transportavimo priemonė naudojami IEEE 802.11 standarto įrenginiai. Balso ir duomenų paketų bendro grupavimo – multipleksavimo algoritmas gali būti panaudotas ir kitų tinklų „butelio kaklelio“ susidarymo vietose.

Disertacijos struktūra ir apimtis. Disertaciją sudaro 6 skyriai ir vienas priedas. Įvadiname skyriuje aprašomas disertacijos temos aktualumas, darbo tikslai ir uždaviniai, metodiniai darbo principai, mokslinis naujumas ir rezultatų panaudojimas, darbo aprobacijos ir publikacijos, formuluojami ginami teiginiai, nurodoma darbo struktūra ir apimtis. Antrame skyriuje pateikiama radijo prieigų technologijų apžvalga. Prieinama išvada, kad radijo ryšio

priemonės vartotojų prieigų tinkluose – tai alternatyva laidinio ryšio priemonėms. Šiuo metu paplitusi IEEE 802.11a, b bei g technologija nėra skirta paslaugoms, orientuotoms į sujungimus, teikti, todėl taikant ją vartotojų prieigų tinkluose reikia ieškoti būdų, kaip išlaikyti priimtiną paslaugos kokybę ir racionaliai išnaudoti radijo kanalo galimybes. Trečiame skyriuje formuluojama vartotojų prieigų tinklų sąvoka bei požymiai. Aprašomi bevielio vietinio tinklo parametrai bei charakteristikos. Pateikiami eksperimentinių tyrimų apie IEEE 802.11b standarto įrangą Lietuvoje rezultatai. Ketvirtame skyriuje nagrinėjami duomenų ir balso šaltiniai bei jų modeliai. Pateikiami eksperimentiniai balso ir duomenų srauto tyrimų rezultatai. Penktame skyriuje aprašomi duomenų multipleksavimo metodai. Pateikiamas sukurto kompleksinio multipleksavimo algoritmo aprašymas bei sukurto algoritmo modeliavimo rezultatai. Visi tyrimo metu gauti rezultatai apibendrinami šeštame skyriuje. Disertacijos pabaigoje pateikiamas literatūros sąrašas, kuriame yra 182 kitų autorių ir 9 disertacijos autoriaus publikacijų bibliografijos šaltiniai.

Disertacijoje yra 147 teksto puslapiai, 16 lentelių, 107 paveikslai, 191 bibliografijos šaltinių sąrašas. Disertacijos priedas yra kompaktinė plokštelė su programų išeities tekstais.

Padėka. Autorius nuoširdžia dėkoja darbo vadovui prof. habil. dr. A. Kajackui, taip pat prof. habil. dr. R. Martavičiui, prof. habil. dr. S. Štarui, doc. dr. R. Pociui, prof. habil. dr. P. Balaišiui, doc. dr. D. Navakauskui bei kitiems, kurie prisidėjo prie šio darbo vertingomis pastabomis ir pasiūlymais.

2. BEVIELIAI VIETINĖS KREIPTIES TINKLAI IR JŲ TIPINIS TAIKYMAS

2.1 Įvadas

Ilgus dešimtmečius telekomunikacijų kūrimo procesai apsiribojo vien tik globalių tinklų plėtojimu, todėl akivaizdu, kad vartotojų prieigoms nebuvo skiriama reikiamo dėmesio. Vartotojai prie bendrųjų tinklo resursų buvo jungiami paprastomis linijomis, dažniausia laidinėmis. Kuriant naujas paslaugas, didėjant duomenų srautams iki galinių vartotojų, pradėta daugiau dėmesio skirti vartotojų prieigoms prie tinklų. Susiformavo skaitmeninių linijų (*angl. Digital Subscriber Line* DSL) bei jų modifikacijų: asimetrinės (*angl. Asymmetric Digital Subscriber Line* – ADSL) ir didelės spartos skaitmeninės linijos (*angl. Very High Speed Digital Subscriber Line* – VDSL), sąvokos, sukurtos jas realizuojančios priemonės.

Kita ryšių technologija, pradėjusi vystytis kartu su kompiuteriais, yra vietiniai tinklai (*angl. Local Area Network* – LAN). Vėliau buvo sukurti ir bevieliai vietiniai tinklai (*angl. Wireless Local Area Network* – WLAN), kurie, naudodami radijo bangas arba infraraudonuosius spindulius, perduoda ir priiminėja duomenis eteriu, taip minimizuodami laidinių sujungimų poreikį. Pirminė LAN bei WLAN paskirtis buvo perduoti duomenis tarp sujungtų kompiuterių. Šiuo metu šių tinklų taikymo sritys plečiasi, t. y. jie pradedami taikyti vartotojų prieigų prie bendrųjų telekomunikacinių tinklų kūrimui.

Bevielio ryšio priemonės vartotojų prieigų tinkluose – tai alternatyva laidinio ryšio priemonėms, kurių realiais monopolistiniais savininkais išlieka telekomai. LAN bei WLAN tinklų taikymo plėtra pozityviai prisideda prie telekomunikacijų rinkos liberalizavimo.

Tyrimų būklė Lietuvoje ir pasaulyje. Mokslinių darbų, skirtų įvairių standartų WLAN tinklų analizei, kiekis pasaulyje labai didelis, skaičiuojamas tūkstančiais. Tai lėmė šie faktoriai: pirmųjų gaminių sėkmė ir greitas plitimas rinkoje, taikymo sričių plėtimas, reguliari gaminių modernizacija. Bendrą publikacijų turinio evoliucijos logiką galima išdėstyti taip:

1. standartą kurianti organizacija parengia naujos ***x*** versijos standarto juodraštį, kurio pagrindas – konkrečios firmos parengtas gaminys, t. y. prototipas;
2. universitetai ir kitos organizacijos ***x*** versiją analizuoja, modeliuoja, bando taikyti konkrečiose srityse;
3. universitetai ir kitos organizacijos nustato pagrindinius ***x*** versijos parametrus, jos savybes ribojančius bei bloginančius faktorius;
4. universitetai ir kitos organizacijos parengia pasiūlymus standarto tobulinimui;

5. standartą kurianti organizacija, išnagrinėjusi tyrimų rezultatus ir sukurtų gaminių bandymų bei taikymo duomenis, parengia galutinę standarto ***x*** versiją;
6. firmos – gamintojai gamina naujo ***x*** versijos standarto įrangą;
7. universitetai ir kitos organizacijos patvirtintą ***x*** versiją analizuoja, modeliuoja ir t. t., tai yra po to, kai ciklo pabaigoje sukuriama nauja ***x***+1 standarto versija, jis prasideda iš naujo.

IEEE 802.11 standarto kūrimo etape tokių ciklų buvo tiek, kiek sukurta standarto versijų: a, b ir g.

Dauguma publikacijų, skirtų WLAN tyrimams, vertina potencialias jų galimybes, pavyzdžiui, laidumą, talpą, išnaudojimą. Tuose darbuose tokie baziniai rodikliai, kaip laidumas ar talpa, priklauso nuo tinklo topologijos, sąveikos protokolo ir nuo perduodamų duomenų paketo dydžio. Tuo tarpu šiame darbe nagrinėjamų vartotojų tinklų tipinės sąlygos skiriasi nuo aukščiau pateiktų.

Susisteminti ir pakomentuoti visas publikacijas fiziškai tiesiog neįmanoma, todėl darbe pateikiamos ir cituojamos tik tos publikacijos, kurių tyrimų objektas artimas suformuluotiems uždaviniams, o gauti rezultatai svarbūs nustatant pagrindines WLAN įrangos savybes.

Lietuvoje bevielių tinklų įranga naudojama palyginti plačiai. Yra nemažai interneto paslaugų tiekėjų, tame tarpe ir LITNET, kurie vartotojus jungia prie interneto, naudodami bevielės prieigos technologijas. Lietuvoje šios srities tyrimai vykdomi VGTU bei KTU universitetuose.

2.2 Tipinės bevielio ryšio priemonės ir jų taikymas

Tipinės paplitusių bevielio ryšio priemonių taikymo sritys ir jų galimybės vaizduojamos 2.1 pav., o paplitusių WLAN tinklų standartų pagrindinės charakteristikos pateikiamos 2.1 lentelėje. Numatoma, kad ateityje WLAN tinklai glaudžiai integruosis kartu su trečios - ketvirtos kartos korinio ryšio tinklais [1–3]. Suderinamumas tarp ateities WLAN (pvz. HiperLAN/2) ir plačiajuostės kolektyviosios kodinio atskyrimo kreipties (*angl. Wide Code Division Multiple Access* – WCDMA) numatomas šių technologijų kūrimo stadijoje [4].

WLAN įranga naudojama verslo įmonių, asmeniniuose bei viešuose tinkluose informacijai tarp tinklo įrenginių perduoti. Tipinės WLAN taikymo vietos bei sąlygos:

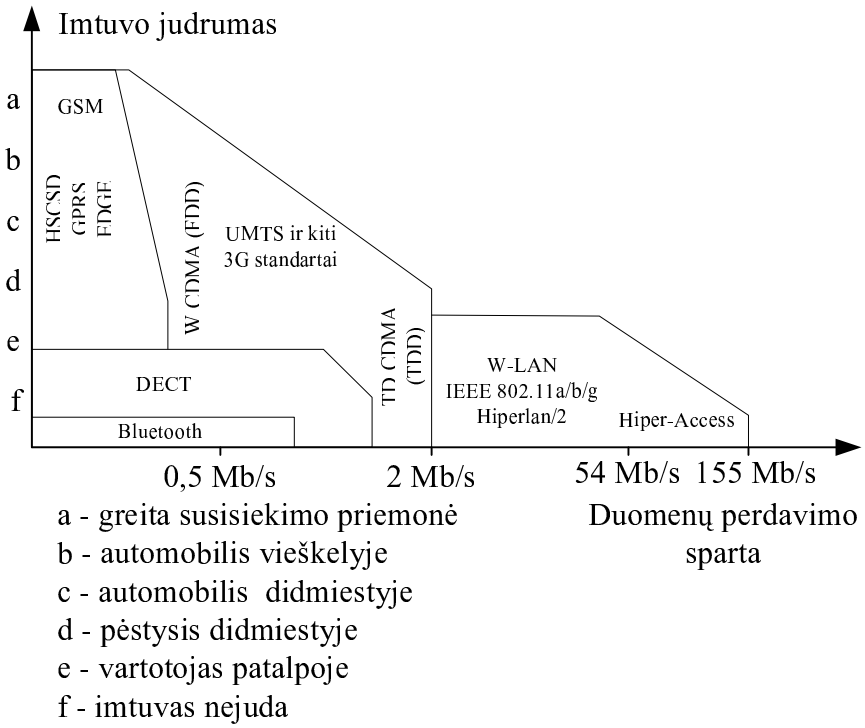
1. vietos, kuriose sudėtinga įrengti laidinį ryšį (istoriniai pastatai, laikini statiniai);
2. laikini tinklai (avarijų likviduotojų tinklai, laikini intarpai vietoj sugedusių nuolatinių tinklų);

3. mobilios darbo vietos – biurai;

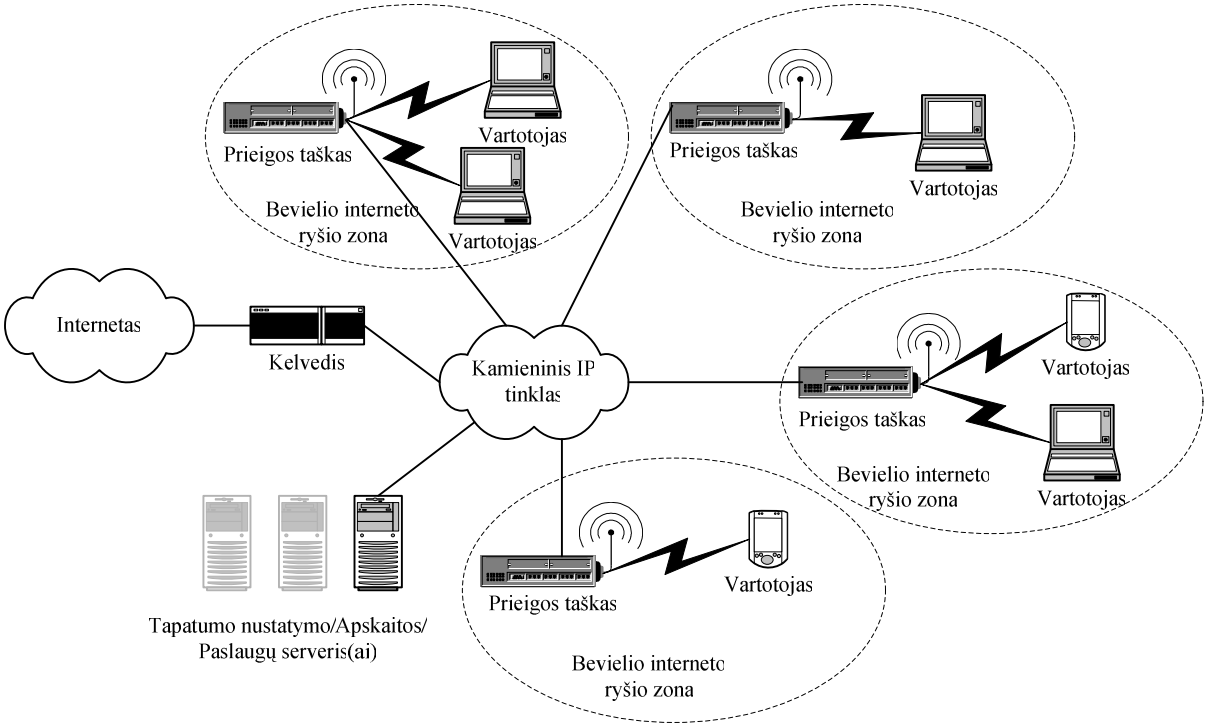
4. nuolatiniai kompiuterių tinklai, kuriuose WLAN įrenginiai suteikia tam tikrų papildomų paslaugų;

5. bevielio interneto zonų ryšio taškai (*angl. hot spot*), kur yra daug vartotojų ir kurie nuolat kinta (oro uostai, viešbučiai, parodos, konferencijų salės, universitetai). Bevielio interneto zonos tinklo topologija pateikiama 2.2 paveiksle.

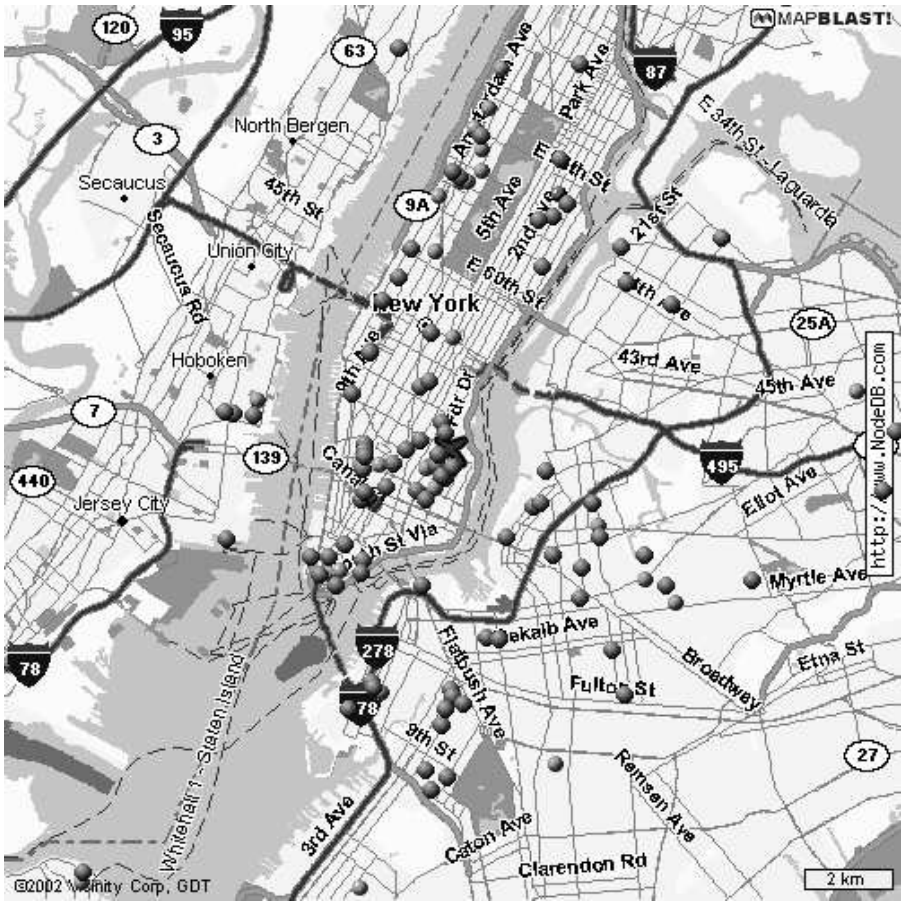
Atskirą bevielio interneto ryšio zonų rūšį sudaro viešos interneto ryšio zonos (*angl. Public Wireless Network),* kurias kuria entuziastai kaip alternatyvą komerciniams tinklams. Jau yra tokių duomenų bazių [5], kuriose nemokamai galima gauti informacijos apie tai, ar dominančioje šalyje ar vietovėje yra viešieji bevieliai tinklai ir kaip prie jų prisijungti. Tokią galimybę iliustruoja 2.3 pav., kuriame pateikiama Niujorko miesto plano dalis su pažymėtais viešų bevielių tinklų kreipties taškais.



2.1 pav. Bevielių tinklų tipinės taikymo sritys



2.2 pav. Bevielio interneto zonos struktūra



2.3 pav. Viešo bevielio tinklo kreipties taškai Niujorko mieste. Apskritimais pažymėti bevielio tinklo kreipties taškai

2.1 lentelė. Pagrindinės WLAN standartų charakteristikos

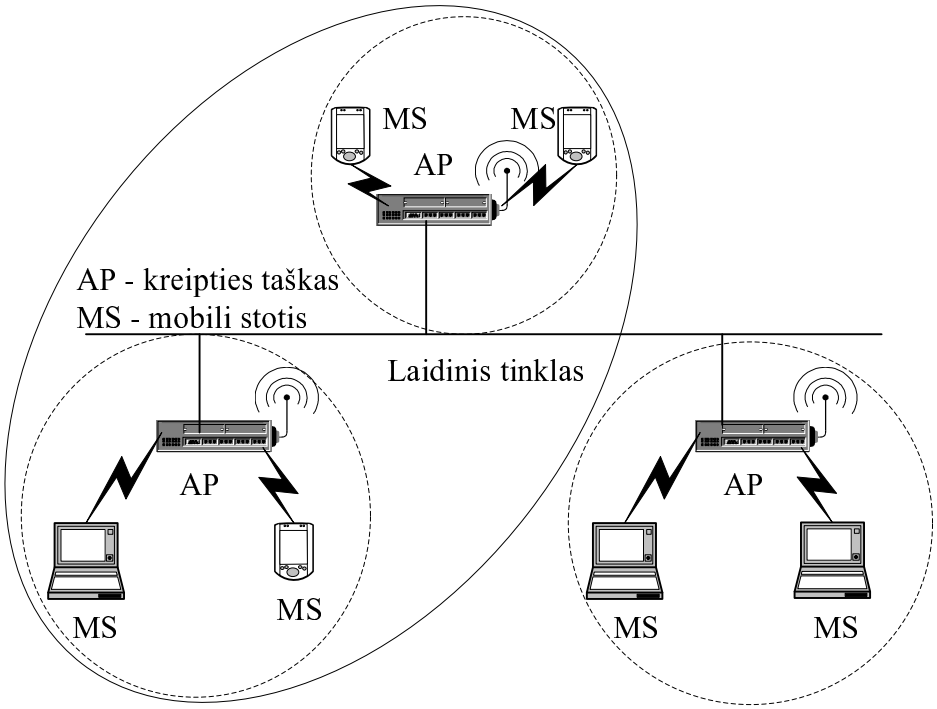
Technologija	802.11a	802.11b	802.11g	Hiperlan/2	HomeRF	Hiperaccess	IEEE 802.16
Standarto kūrėjas/būsena	IEEE / patvirtintas	IEEE / patvirtintas	IEEE / patvirtintas	ETSI BRAN / patvirtintas	HomeRF Working Group, nutraukė egzistavimą 2003 m. sausio mėn. / standartas patvirtintas	ETSI BRAN / standartas kuriamas	IEEE / standartas kuriamas
Kreipties protokolas	CDMA/CA	CDMA/CA	CDMA/CA	TDMA/TDD	SWAP (CSMA/CA TDMA)	TDD/FDD/TDMA	TDMA/FDD
QoS	PCF	PCF	PCF	ATM/802.1p/RSVP	TDMA	TDD/FDD/TDMA	TDD/FDD/TDMA
Dažnis	5.15 GHz	2.4 GHz (ISM)	2,4 GHz (ISM)	ES – 5,15–5,30 5,470–5,725 GHz; JAV – 5,15–5,35 5,725–5,825 GHz; Japonijoje 5,15–5,25 GHz	2,4 GHz (ISM)	40.5 / 43.5 GHz	10,6–60 GHz
Kanalo plotis	22 MHz	22 MHz	22 MHz	22 MHz	versija 1 – 1MHz; versija 2 – 5MHz	28 MHz x 2 (dvipusiam ryšiui)	28 MHz x 2 (dvipusiam ryšiui)
Kanalų skaičius	12 JAV, 8 ES, 4 Japonijoje	13; iš jų tik 3 nepersidengiantys	3	12 JAV, 8 ES, 4 Japonijoje	–	–	–
Moduliacija	žiūrėti į 2.2 lentelę	1 Mb/s – DBPSK; 2Mb/s – DQPSK; 5,5Mb/s – DBPSK (CCK kodas), 11Mb/s – DQPSK (CCK kodas)	OFDM 64+CCK	žiūrėti į 2.2 lentelę	1 Mb/s 2FSK; 2 Mb/s – 4FSK; 10 Mb/s WBFH	QPSK, 16–QAM, 64–QAM viršutiniam srautui; TFM/QPSK, 16–QAM apatiniam srautui	QPSK, 16 QAM, 64 QAM, adaptyvus moduliacijos parinkimas
Skleidimas	OFDM	CCK	OFDM	OFDM su dinaminiu kanalo parinkimu	versija 1 – FHSS; versija 2 – WBFH	–	OFDM
Galia	ES: 5,15–5,25 GHz – 200mW (tik patalpose); 5,25–5,35 GHZ 250mW (tik patalpose); 5,47– 5,725 GHz 1W (lauke ir patalpose) JAV: 5,15–5,25 GHz – 50mW (tik patalpose); 5,25–5,35 GHZ 250mW (lauke ir patalpose); 5,47– 5,725 GHz 1W (neleidžiama); Japonija: 5,15–5,25 GHz – 200mW	JAV – 30 dBm; ES – 20 dBm; JAV – 10 dBm	JAV – 30 dBm; ES – 20 dBm; JAV – 10 dBm	ES: 5,15–5,25 GHz – 200mW (tik patalpose); 5,25–5,35 GHZ 250mW (tik patalpose); 5,47– 5,725 GHz 1W (lauke ir patalpose) JAV: 5,15–5,25 GHz – 50mW (tik patalpose); 5,25–5,35 GHZ 250mW (lauke ir patalpose); 5,47– 5,725 GHz 1W (neleidžiama); Japonija: 5,15–5,25 GHz – 200mW	100mW	–	–
Duomenų perdavimo sparta	54 Mb/s	11 Mb/s	54 Mb/s	54 Mb/s	versija 1 – 2 Mb/s; versija 2 – 10 Mb/s	25 Mb/s	134 Mb/s
Nuotolis	50 m	150 m	100 m	50 m	150 m	5 km	35 km
Tipinis taikymas	WLAN	WLAN	WLAN	WLAN, ATM	Namų įrenginiams	IP / ATM / WMAN	WMAN

2.3 WLAN technologijos

2.3.1 WLAN topologijos

Pagal topologiją WLAN tinklai skirstomi į centralizuotus (*angl. managed*) ir paskirstytus (*angl. ad–hoc*).

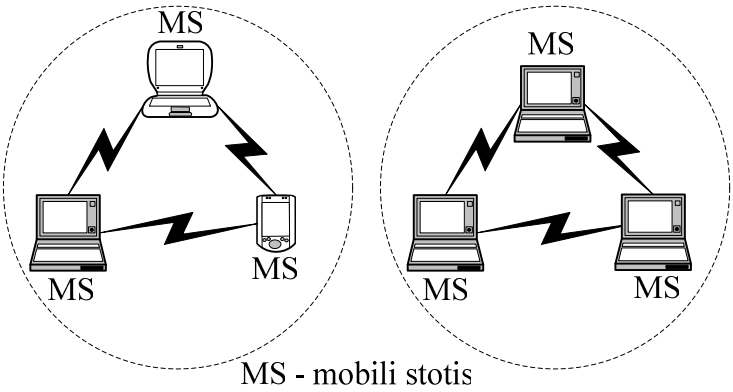
Centralizuoti WLAN. Centralizuotuose tinkluose yra dviejų tipų įrenginiai: kreipties taškai (*angl. Access Point* – AP) ir mobiliosios stotys (*angl. Mobile Station* – MS). Visi duomenų apsikeitimai tarp mobiliųjų stočių yra vykdomi tik per kreipties taškus, kurie vykdo komutacinės stoties bei tinklo administravimo funkcijas. Centralizuoto WLAN tinklo topologija pateikiama 2.4 paveiksle. Čia matyti, kad centralizuotų WLAN tinklų struktūra gimininga tradicinių vietinių telefono tinklų struktūrai.



2.4 pav. Centralizuotų WLAN tinklų topologija

Paskirstyti WLAN. Kadangi paskirstyti tinklai dažniausiai vadinami *ad hoc*, šiuo pavadinimu jie vartojami ir darbe. Bazinių stočių ar kreipties taškų tokiame tinkle nėra. Esminis *ad hoc* tinklo skirtumas nuo centralizuoto tinklo yra tas, kad čia stotys ne tik siunčia savo ir priima joms skirtus duomenis, bet ir retransliuoja kitų stočių signalus, kai tos stotys tiesiogiai negali sąveikauti. Tipinė *ad hoc* tinklo topologija pateikiama 2.5 paveiksle.

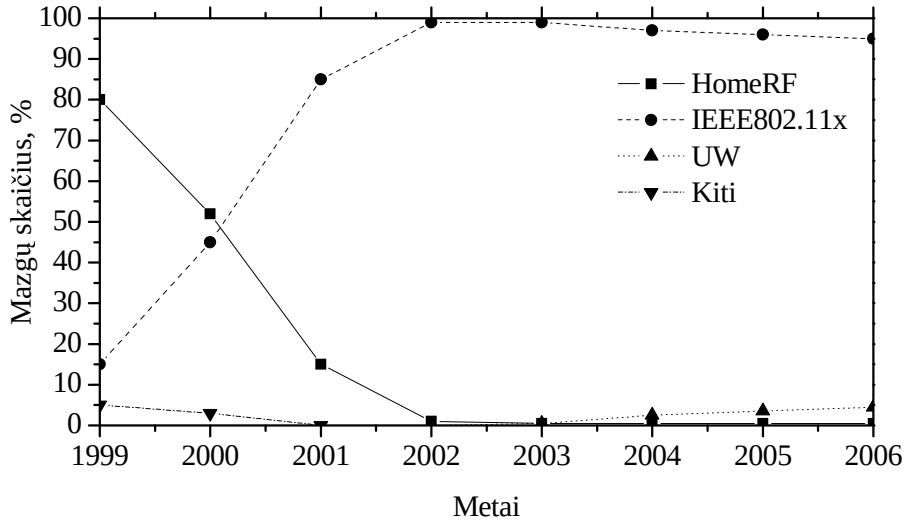
Ad hoc topologijos tinklams būdingi šie privalumai: aukštas patikimumas, galimybė stochastiškai organizuotis. Esminės šio tipo tinklų technologinės problemos buvo išspręstos kuriant tinklus kariniams tikslams.



2.5 pav. *Ad hoc* WLAN tinklo topologija

2.3.2 WLAN tinklo standartai

Šiuo metu pasaulyje yra keletas plačiai paplitusių WLAN tinklo standartų. Didžiausia rinkos dalį užima IEEE 802.11x protokolų šeima (2.6 paveikslas) [6]. Tai sąlygojo didelė duomenų perdavimo sparta, maža kaina bei lengvas diegimo procesas lyginant su kitais konkuruojančiais WLAN tinklo standartais. Be to, ši standartų šeima viena pirmųjų atėjo į WLAN rinką.



2.6 pav. WLAN tinklo standartų pasiskirstymas rinkoje

Buvo tikimasi, kad kuriami HiperLAN2 tinklai sudarys rimtą konkurenciją IEEE 802.11x tinklams, ypač, kai pradės populiarėti trečios kartos mobilieji tinklai, tačiau šiuo metu HiperLAN/2 standarto įrenginių rinkoje vis dar nėra, o trečios kartos mobiliųjų tinklų diegimas vyksta vangiai.

2.3.3 IEEE 802.11 standarto WLAN tinklai

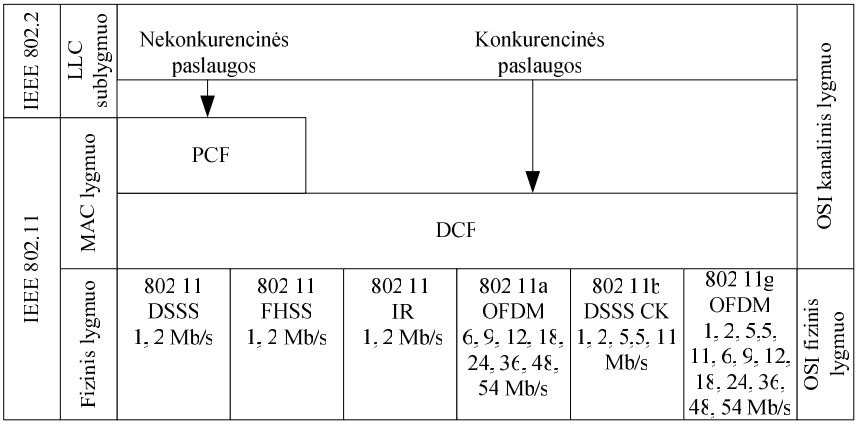
IEEE 802.11 standartas pradėtas kurti 1990 metais. Pirmoji specifikacija išleista 1997 metais. Ji aprašė kreipties valdymo į perdavimo terpę lygmenį (*angl. Media Access Control –*

MAC), jo protokolus ir paslaugas (*angl. services*) bei tris fizinius lygmenis (*angl. Physical Layer* – PHY): du plėsto spektro (2,4 GHZ dažnių diapazono radijo prieigos plėsto spektro (*angl. Direct Sequence Spread Spectrum* – DSSS) ir 2,4 GHz dažnių diapazono radijo prieigos šokinėjančio dažnio (*angl. Frequency Hopping Spread Spectrum* – FHSS) [7 – 9]) bei vieną infraraudonųjų spindulių (*angl. Infrared Ray* – IR). Visi šie PHY lygmenys gali perdavinėti duomenis 1 Mb/s ir 2 Mb/s sparta. Pagal savo veikimo principus šis standartas yra panašus į IEEE 802.3 standartą.

1999 metais buvo išleisti du šio standarto papildymai, aprašantys naujus fizinius lygmenis:

1. IEEE 802.11a, veikiantis 5 GHz dažnių ruože, perdavimo sparta iki 54 Mb/s [10];
2. IEEE 802.11b, veikiantis 2,4 GHz dažnių ruože, perdavimo sparta iki 11 Mb/s [11].

2003 metais išėjo dar vienas standarto PHY papildymas – IEEE 802.11g, veikiantis 2,4 GHz dažnių ruože, kurio perdavimo sparta siekia iki 54 Mb/s [12]. Visiems šiems naujiems standartams MAC lygmuo išlieka nepakitęs. IEEE 802.11a, b bei g standarto naudojami lygmenys pagal ISO/OSI tinklo modelį pateikiami 2.7 paveiksle.



2.7 pav. IEEE 802.11 standartas ISO/OSI tinklo lygmenų modelyje

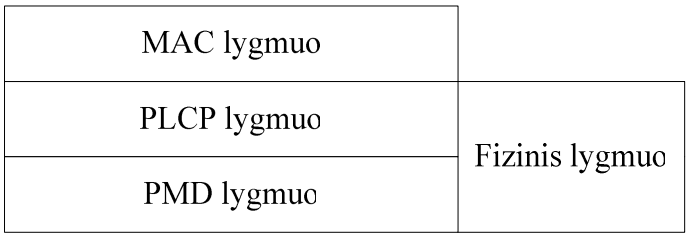
Ruošiami nauji IEEE 802.11 standarto papildymai, kurie aprašys perdavimo galios valdymo 5 GHz ruože (IEEE 802.11h), paslaugų kokybės (IEEE 802.11e) ir papildomo saugumo (IEEE 802.11i) algoritmus. Jau pradėta formuoti nauja darbo grupė (IEEE 802.11n), kurios tikslas – aprašyti virš 100 Mb/s perdavimo spartos siekiantį standartą.

2.3.3.1 IEEE 802.11 fizinis lygmuo

IEEE 802.11 standarto fizinis lygmuo pateikiamas 2.8 paveiksle. Jis jungia MAC lygmenį su radijo eteriu, kuriuo kaip bendru radijo kanalu perdavinėjami ir priiminėjami duomenys. Fizinis lygmuo atlieka tris funkcijas:

1. kadrų apsikeitimo tarp MAC ir PHY lygmenų naudojant fizinio lygmens konvergencijos procedūras (*angl. Physical Layer Convergence Procedure* – PLCP);
2. duomenų kadrų perdavimo naudojant priklausomąjį fizinį lygmenį (*angl. Physical Medium Dependent* – PMD);
3. nešančiosios registravimo bei eterio būsenos perdavimo MAC lygmeniui.

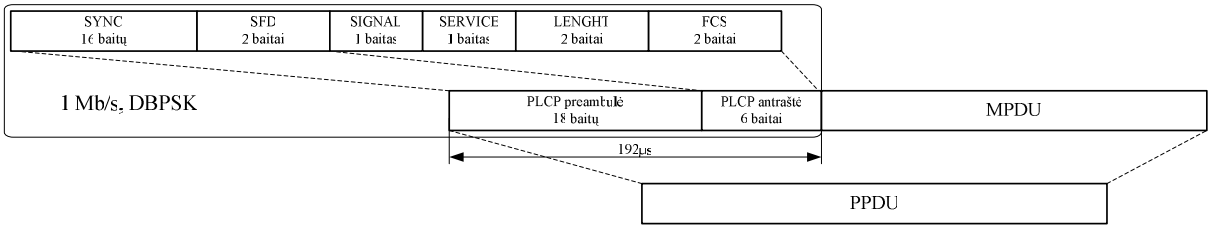
Visos PHY versijos turi individualius PLCP ir PMD lygmenis. Trijų IEEE 802.11 fizinių lygmenų spartų palyginimai pateikiami [13] darbe.



2.8 pav. IEEE 802.11 standarto fizinis lygmuo

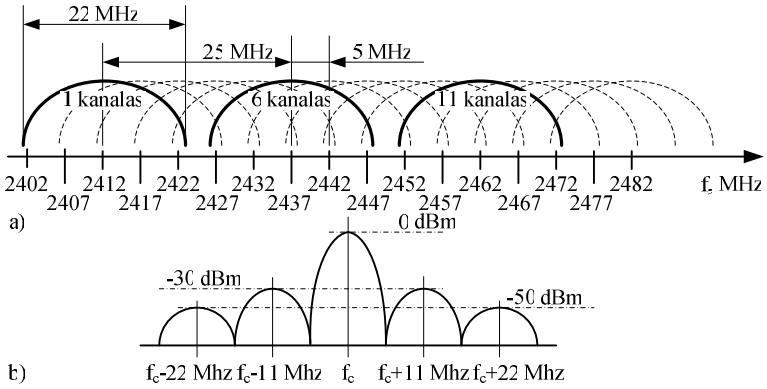
IEEE 802.11 DSSS. IEEE 802.11 plėsto spektro fizinis lygmuo veikia 2,4 GHz dažnių ruože. Šio fizinio lygmens kadro (*angl. PLCP Protocol Data Unit* – PPDU) struktūra pateikiama 2.9 paveiksle. Iš čia matyti, kad kadras susideda iš PLCP preambulės, antraštės ir MAC protokolo duomenų konteinerio (angl. MAC Protocol Data Unit – MPDU).

DSSS tipo fizinis lygmuo 1 ir 2 Mb/s perdavimo spartai naudoja diferencinę binarinę fazės poslinkio moduliaciją (*angl. Differential Binary Phase Shift Keying* – DBPSK) bei diferencinę kvadratūrinę fazės poslinkio moduliaciją (angl. *Differential Quadrature Phase Shift Keying* – DQPSK). Spektras skleidžiamas naudojant Barkerio kodą (BK). Kiekvienas DSSS PHY kanalas užima 22 MHz dažnių ruožą. Kanalų centriniai dažniai yra atskirti vienas nuo kito 5 MHz tarpais. Kai toje pačioje vietovėje veikia keletas nepriklausomų WLAN tinklų, siekiant išvengti interferencijos, rekomenduojama naudoti ne daugiau kaip tris (1, 6, 11) kanalus. Tokiu atveju tarp gretimų kanalų susidaro 25 MHz pločio juosta (2.10 paveikslas).

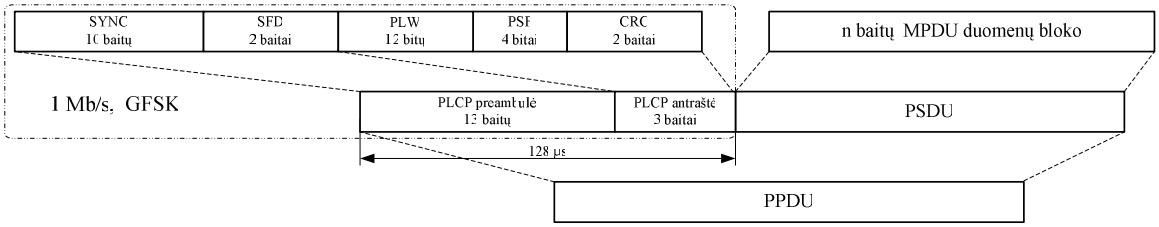


2.9 pav. IEEE 802.11 DSSS standarto kadro struktūra

IEEE 802.11 FHSS. Šokinėjančio dažnio fizinio lygmens versija taip pat veikia 2,4 GHz spektro srityje. Šio fizinio lygmens kadro struktūra pateikiama 2.11 paveiksle.



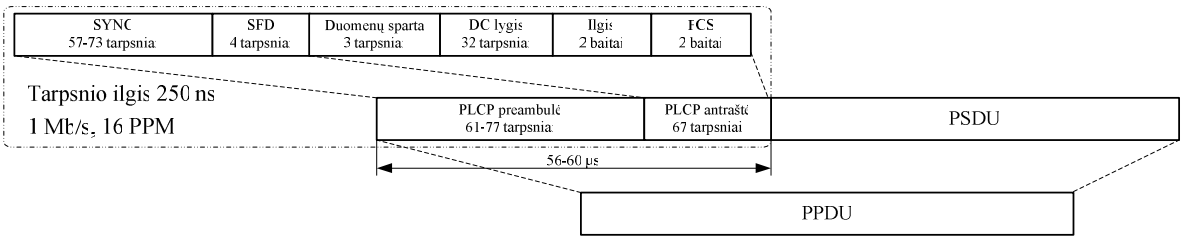
2.10 pav. IEEE 802.11 DSSS kanalų išsidėstymas: a) kanalų išsidėstymas, b) vieno kanalo užimama dažnių juosta



2.11 pav. IEEE 802.11 standarto šokinėjančio dažnio kadrų struktūra

FHSS tipo fizinis lygmuo naudoja dviejų lygių Gauso postūmio dažninę moduliaciją (*angl. Gaussian Frequency Shift Key* – GFSK) 1 Mb/s perdavimo sparta, tuo tarpu keturių lygių GFSK yra naudojama PLCP paslaugos duomenų vienetui (*angl. PLCP Service Data Unit* – PSDU) perduoti 2 Mb/s sparta. Šiame fiziniame lygmenyje dažnio deviacija yra 110 kHz, kanalai išdėstyti vienodais tarpais 83,5 MHz dažnių ruože, o kanalo plotis 1 MHz. Standarte numatyta atlikti mažiausiai 2,5 dažnio šuolių per sekundę, kai minimalus šuolio atstumas yra lygus 6 MHz. IEEE 802.11 standarte yra apibrėžtos trijų šuolių sekos, kurios atskirose geografinėse vietovėse yra skirtingos. Šuolių sekos buvo sukurtos tam, kad tarp kaimyninių tinklų būtų minimizuoti interferenciniai trukdžiai.

IEEE 802.11 IR. Infraraudonųjų spindulių fizinis lygmuo skiriasi nuo DSSS ir FHSS tuo, kad informacijos perdavimui naudojama šviesos, kurios bangos ilgis yra nuo 850 nm iki 950 nm, energija bei impulsinė pozicinė moduliacija (*angl. Pulse Position Modulation* – PPM). Perduodamų duomenų sparta priklauso nuo moduliacijos: 1 Mb/s naudojamas 16 PPM,

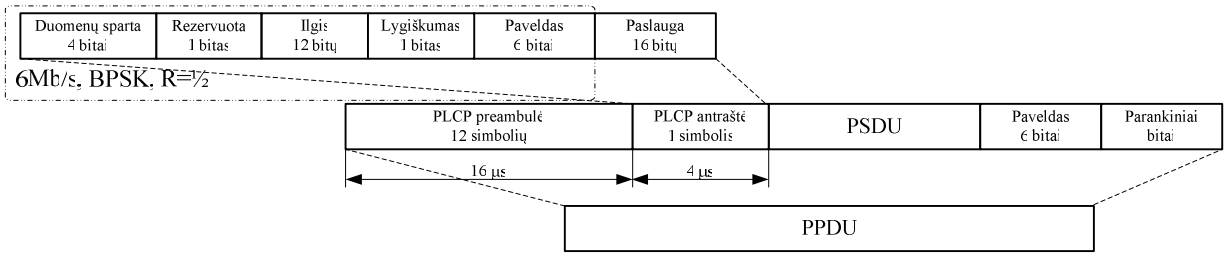


2.12 pav. IEEE 802.11 infraraudonųjų spindulių fizinio lygmens kadrų struktūra

o 2 Mb/s naudojamas 4 PPM tipas. IEEE 802.11 infraraudonųjų spindulių fizinio lygmens kadrų struktūra pateikiama 2.12 paveiksle.

IR PHY taikytinas tik patalpose ir negali perdavinėti duomenų, jei nėra tiesioginio matomumo tarp stočių.

IEEE 802.11a. IEEE 802.11a standarto fizinis lygmuo naudoja ortogonaliojo dažnių sutankinimo (*angl. Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – OFDM) metodą. Šis PHY veikia 5 GHz dažnių ruože, kuriame yra 8 kanalai, o jų centriniai dažniai vienas nuo kito atskirti 20 MHz. Duomenų perdavimo sparta gali būti nuo 6 iki 54 Mb/s [10]. PLCP preambulė ir antraštė siunčiamos 6 Mb/s sparta naudojant binarinę fazės poslinkio moduliaciją (*angl. Binary Phase Shift Keying* – BPSK). Moduliacijos rūšys ir perdavimo spartos pateikiamos 2.2 lentelėje. Verta pažymėti, kad IEEE 802.11a fizinis lygmuo yra labai panašus į Europos telekomunikacinių standartų instituto (*angl. European Telecommunications Standards Institute* – ETSI) sukurtą HiperLAN/2 fizinį lygmenį. IEEE 802.11a fizinio lygmens kadrų struktūra pateikiama 2.13 paveiksle.



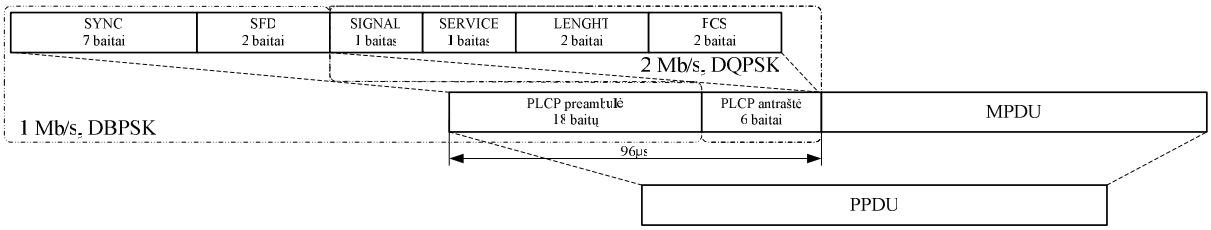
2.13 pav. IEEE 802.11a OFDM fizinio lygmens kadrų struktūra

2.2 lentelė. OFDM moduliacijos

Perdavimo sparta	Moduliacija	Kodo santykis	Baitų skaičius simbolyje
6 Mb/s	BPSK	1/2	3
9 Mb/s	BPSK	3/4	4,5
12 Mb/s	QPSK	1/2	6
18 Mb/s	QPSK	3/4	9
36 Mb/s	16 QAM	3/4	18
48 Mb/s	64 QAM	2/3	24
54 Mb/s	64 QAM	3/4	27
Tik HiperLAN 2			
27 Mb/s	16 QAM	9/16	13,5
Tik IEEE 802.11a			
24 Mb/s	16 QAM	1/2	12

IEEE 802.11b. IEEE 802.11b fizinis lygmuo skirtas duomenų perdavimui 5,5 ir 11 Mb/s sparta, tačiau šio standarto įrenginiai gali perdavinėti duomenis ir 1 bei 2 Mb/s. Tai leidžia IEEE 802.11b standarto įrenginiams sąveikauti su IEEE 802.11 DSSS įrenginiais.

Standarte numatytos dvi skirtingos PLCP preambulės: ilgoji (2.9 pav.) ir trumpoji (2.14 paveikslas). Ilgoji PLCP preambulė ir antraštė yra identiškos IEEE 802.11 DSSS preambulei bei antraštei ir todėl yra suderintos su pastaruoju standartu. Trumpoje preambulėje yra tik 56 bitų SYNC laukas, kuris perduodamas 1 Mb/s sparta naudojant DBPSK moduliaciją. Šiuo atveju PLCP antraštė yra perduodama 2 Mb/s sparta naudojant DQPSK moduliaciją. Šis režimas nėra suderintas su IEEE 802.11 standartu, be to, jo palaikymas nėra privalomas IEEE 802.11b įrenginiuose. Aukštesnė duomenų perdavimo sparta pasiekiama naudojant atvirkštinio kodo manipuliavimo (*angl. Complementary Code Keying* – CCK) moduliaciją. Tam, kad IEEE 802.11b standartas, perduodantis duomenis 11 Mb/s sparta, taptų suderinamas su FHSS standartu, perduodančiu duomenis 1 Mb/s sparta, papildomai yra įvedamas dažninis judrumas. IEEE 802.11b standarto moduliacijos tipai pateikiami 2.3 lentelėje.



2.14 pav. IEEE 802.11b standarto fizinio lygmens kadro struktūra su trumpa preambule

2.3 lentelė. IEEE 802.11b standarto moduliacijos tipai

Duomenų sparta	Kodo ilgis	Moduliacija	Simbolių sparta
1 Mb/s	11 (BK)	DBPSK	1 Ms/s
2 Mb/s	11 (BK)	DQPSK	1 Ms/s
5,5 Mb/s	8 (CCK)	DBPSK	1,375 Ms/s
11 Mb/s	8 (CCK)	DQPSK	1,375 Ms/s

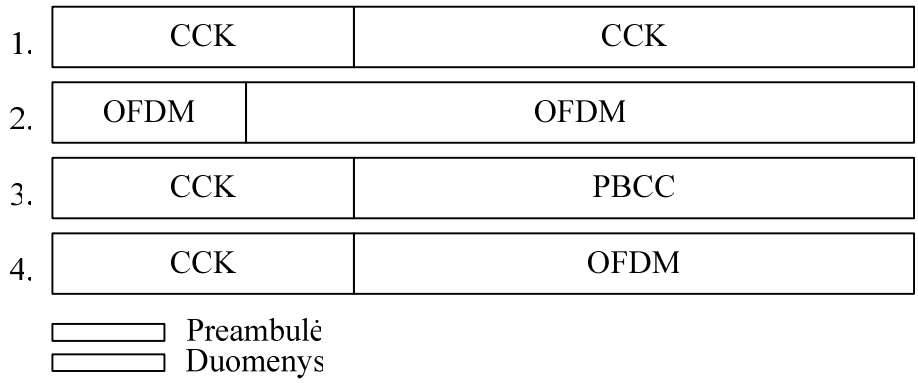
IEEE 802.11g. Šio standarto fizinis lygmuo skirtas 2,4 GHz dažnių ruožui ir įgalina perduoti duomenis įvairiomis spartomis iki 54 Mb/s. Standarte numatytos keturios moduliacijų schemos [12], [14], pirmosios dvi iš jų yra privalomos, o likusios papildomos (2.15 paveikslas):

1. DSSS/CCK moduliacija (dar vadinama ne ERP) – tai tikslus IEEE 802.11b PHY lygmens atitikmuo (numatytos DSSS 1 ir 2 Mb/s bei CCK 5,5 ir 11 Mb/s duomenų perdavimo spartos). Ši standarto versija leidžia IEEE 802.11g standarto įrenginiams sąveikauti su IEEE 802.11b standarto įrenginiais;

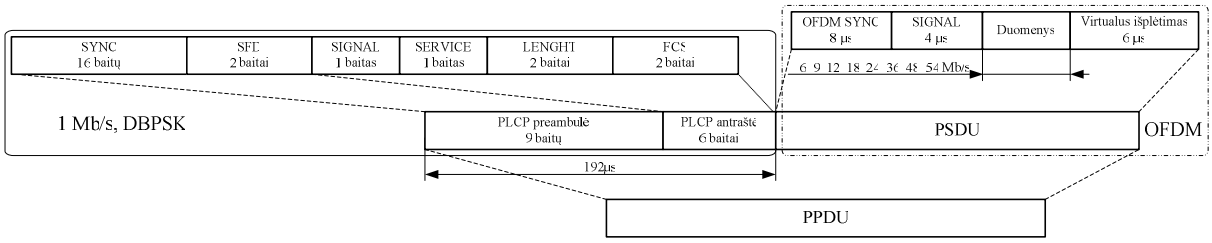
2. ERP – OFDM moduliacija (*angl. Extend Rate PHY – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) – tai IEEE 802.11a PHY lygmens versija, veikianti 2,4 GHz dažnių ruože bei leidžianti perdavinėti duomenis sparta iki 54 Mb/s;

3. išplėstos perdavimo spartos paketų dvejetainio konvoliucinio kodavimo (*angl. Packet Binary Convolutional Coding* – PBCC) moduliacija, papildomai leidžianti perdavinėti duomenis 22 ir 33 Mb/s sparta. Preambulė, antraštė ir kadro formatas yra identiški IEEE 802.11b versijai;

4. CCK – OFDM – tai hibridinė moduliacija, kuri naudoja DSSS preambulės bei antraštės, o OFDM – duomenų perdavimui. Galima duomenų perdavimo sparta yra nuo 6 iki 54 Mb/s. Kadro formatas pateikiamas 2.16 paveiksle.



2.15 pav. IEEE 802.11g standarto kadrų moduliacijos tipai



2.16 pav. IEEE 802.11g standarto kadro struktūra naudojant hibridinę moduliaciją

Toje pačioje aplinkoje dirbant IEEE 802.11g ir IEEE 802.11b tinklams, susidaro interferenciniai reiškiniai dėl to, kad IEEE 802.11b standarto įrenginiai nesugeba atpažinti OFDM moduliuoto signalo. Siekiant išvengti šios problemos, standarto specifikacijoje rekomenduojama prieš išsiunčiant paketą apsikeisti užklausos (*angl. Request to Transmit* – RTS) ir patvirtinimo (*angl. Clear to Send* – CTS) paketais, tačiau tai sumažina maksimalų kanalo laidumą. Kitas [15] darbe nagrinėjamas problemos sprendimo būdas siūlo modernizuoti centralizuotos koordinavimo funkcijos (*angl. Point Coordination Function* – PCF) režimą, siekiant sumažinti galimas kolizijas tarp IEEE 802.11b ir IEEE 802.11g įrenginių.

2.3.3.2 IEEE 802.11 MAC lygmuo

Paskirstytų WLAN tinklų MAC protokolai [9] remiasi signalo – nešlio stebėjimu (*angl. carrier sensing*) ir kolizijų vengimo (*angl. collision avoidance*) arba kolizijų tikimybės mažinimo principais. Pagrindinė operacijų seka yra tokia: stotis, kuri turi paruoštų perdavimui duomenų, prieš bandydama juos perduoti, „klauso" kanalo būklę, t. y. matuoja iš kitų stočių gaunamų signalų galią. Jeigu kanalas tuo metu užimtas, tada stotis laukia atsitiktinės trukmės laikotarpį ir pakartotinai analizuoja kanalo būklę. Jeigu tada kanalas laisvas, tai stotis bando jį užimti. Sėkmingas kanalo užėmimas baigiasi duomenų paketo perdavimu. Visose IEEE 802.11 specifikacijos modifikacijose naudojamas tas pat MAC protokolas.

Kanalo kreipties mechanizmas (*angl. channel access mechanism*). Pagrindinis MAC lygmens tikslas – kontroliuoti perdavimo terpę. Šio lygmens dėka kiekviena stotis gali perdavinėti duomenis ir tikėtis, kad jai bus pasiųsti duomenys. Kanalo kreipties mechanizmas yra viso MAC lygmens stuburas. Yra žinoma keletas pagrindinių kreipties būdų, iš kurių IEEE 802.11 MAC lygmuo naudoja du: kolektyviąją nešlio jutimo kreiptį vengiant kolizijų (*angl. Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance* – CSMA/CA) ir apklausos (*angl. pooling*). Kolektyvinės kreipties laiko dalijimo būdo (*angl. Time Division Multiple Access* – TDMA) IEEE 802.11 standartas nenaudoja.

CSMA/CA protokolas. CSMA/CA kanalo kreipties mechanizmas dažniausiai naudojamas bevielių LAN tinklų, veikiančių pramonės, mokslo ir medicinos (*angl. Industrial, Scientific, Medical* – ISM) dažnių ruože. Pagrindiniai šios kreipties principai yra: „klausyti prieš šnekant" ir varžytinės. CSMA/CA mechanizmas – tai asinchroninis pranešimų perdavimas, neorientuotas sujungimui, duodantis maksimalaus panaudojimo (*angl. best effort*) paslaugą, be jokio laidumo ar vėlinimo garantijų.

CSMA/CA prototipas yra kolektyvioji nešlio jutimo kreiptis aptinkant kolizijas (*angl. Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection* – CSMA/CD), realizuota Ethernet standarto tinkluose. CSMA/CD kreipties įrenginiuose siuntėjo imtuvas veikia ir tuo metu, kai įjungtas siųstuvas, todėl gali aptikti kolizijas, nes visoje terpėje signalo stiprumas yra maždaug vienodas. Tuo tarpu bevielio ryšio atveju vienos stoties siųstuvas ir imtuvas veikia tik pakaitomis, todėl kolizijų aptikti negali.

CSMA/CA standarto įrenginiai nustato tai, kad kanalas laisvas, kai priimamo signalo galia yra žemiau nustatytos ribos. Kadangi WLAN įrenginiai kolizijų radijo eteryje aptikti negali, tai papildomai įvesta tam tikra valdymo priemonė – tinklo užėmimo vektorius (*angl. Network Allocation Vector* – NAV), kuris parodo, po kiek laiko atsilaisvins perdavimo terpė. Siunčianti stotis nustato NAV vektorių, o jį išanalizavusi priimanti stotis

nesiunčia duomenų NAV nurodytą laiką, net jei galios matavimai rodytų, kad kanalas laisvas, ir taip gali išvengti kolizijos. NAV dažnai vadinamas virtualiuoju nešlio jutimo mechanizmu. Taigi IEEE 802.11 MAC protokole siekiant užtikrinti patikimą kolizijų vengimą, numatyti virtualusis ir fizinis nešlio jutimo mechanizmai.

Antrasis MAC uždavinys – bevielės terpės valdymas. Tai atliekama naudojant šias funkcijas:

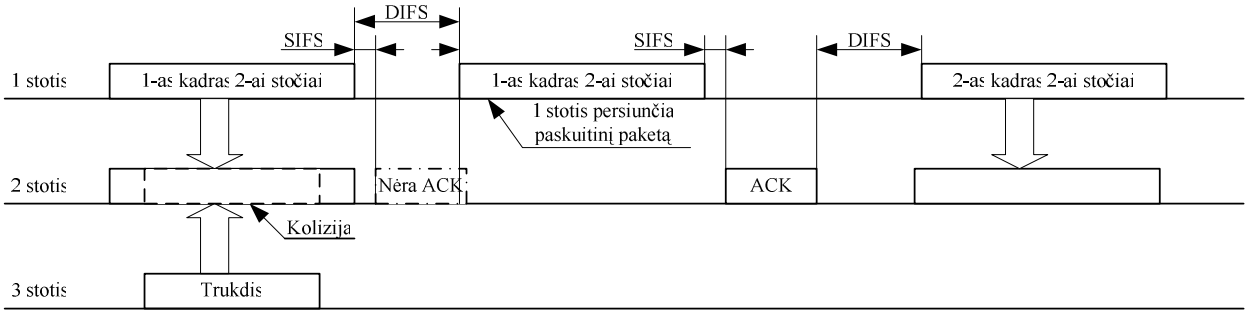
1. pagrindinę, vadinamą paskirstytąja, koordinavimo funkciją (*angl. Distribution Coordination Function* – DCF);
2. centralizuotą arba sutelktąją koordinavimo funkciją;
3. duomenų apsaugą naudojant bevielę šifravimo sistemą (*angl. Wireless Equivalent Privacy* – WEP) [9] bei duomenų kadrų fragmentavimą.

Kadrų apsikeitimo protokolas. Kadangi duomenų perdavimo terpė dėl triukšmo yra nepatikima, IEEE 802.11 standarte yra numatyti kadrų apsikeitimo mechanizmai, leidžiantys siuntėjui nustatyti, ar gavėjas tikrai gavo išsiųstą kadrą. Tačiau lyginant su IEEE 802.3 [16], toks mechanizmas įveda tam tikrą pertekliškumą.

Minimalus MAC kadrų apsikeitimo protokolas sudarytas iš dviejų dalių:

1. duomenų kadro, kurį siuntėjas išsiunčia gavėjui;
2. patvirtinimo kadro, kurį siunčia gavėjas, kai priima neiškraipytą kadrą.

Duomenų ir patvirtinimo kadrų apsikeitimo mechanizmai yra nedalomas MAC protokolo vienetas, kitos stotys šio proceso pertraukti negali. Kai siuntėjas negauna patvirtinimo kadro, jis pakartotinai išsiunčia tą patį kadrą (2.17 paveikslas). Didėjant klaidų kiekiui, toks mechanizmas kanalo laidumą išnaudoja neefektyviai. MAC protokolas veikia „stok ir eik“ principu, t. y. jis perduoda kitą kadrą tik tada, kai gaunamas patvirtinimas, jog išsiųstas kadras pasiekė gavėją.

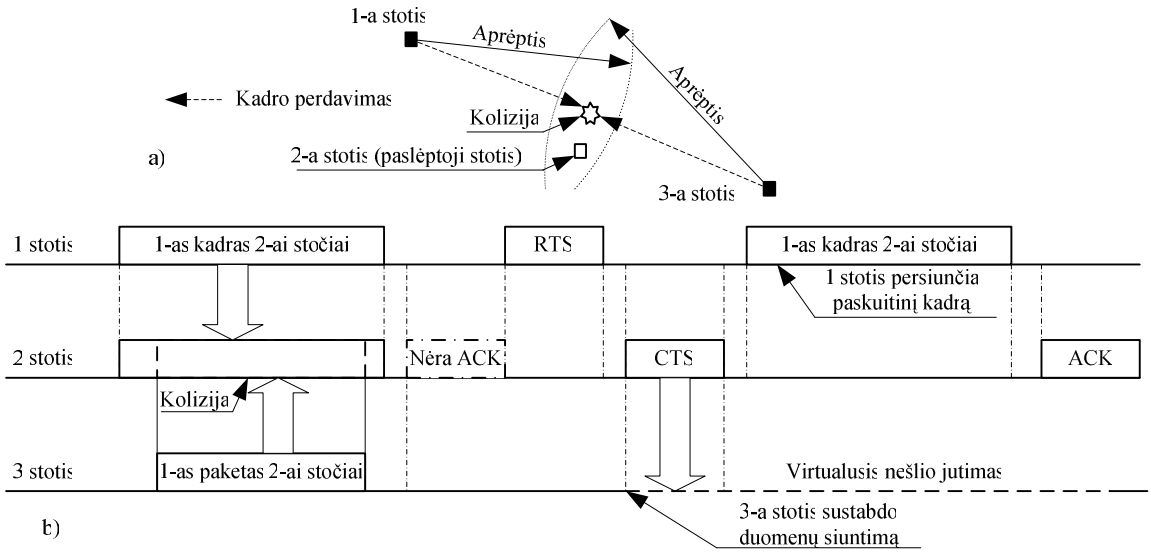


2.17 pav. IEEE 802.11 MAC protokolo persiuntimo mechanizmas

RTS/CTS – kanalo rezervavimo mechanizmas. Kai dėl per didelio nuotolio ar signalo slopinimo ne visos stotys gali „išgirsti“ viena kitą, atsiranda paslėptų stočių problema.

Viena kitos „negirdinčioms“ stotims perduodant duomenis tuo pačiu metu, o priimančioje pusėje siunčiančiųjų stočių signalų galioms esant panašioms, susidaro kolizinė situacija ir išsiųsti kadrai dingsta. Šios problemos priežastis yra pats nešlio jutimo mechanizmas, pagal kurį tik siuntėjas, naudodamasis vietine informacija, nustato, ar kanalas yra laisvas. Tuo tarpu situacija gavėjo aplinkoje tuo metu gali būti skirtinga.

IEEE 802.11 standarte yra numatytas paslėptų stočių problemos sprendimo būdas – ryšio kanalo rezervavimas. Šiam tikslui stotis, kuri perdavinėja duomenis, siunčia papildomą RTS kadrą. Gavėjas atsako į RTS patvirtinimo CTS kadru. Jo gavimas rodo, kad gavėjas priėmė išsiustą RTS, taigi kanalas yra laisvas. Šis mechanizmas pirmą kartą buvo pasiūlytas X.25 standarte. RTS/CTS dar vadinamas „rankų paspaudimu“ (2.18 paveikslas).



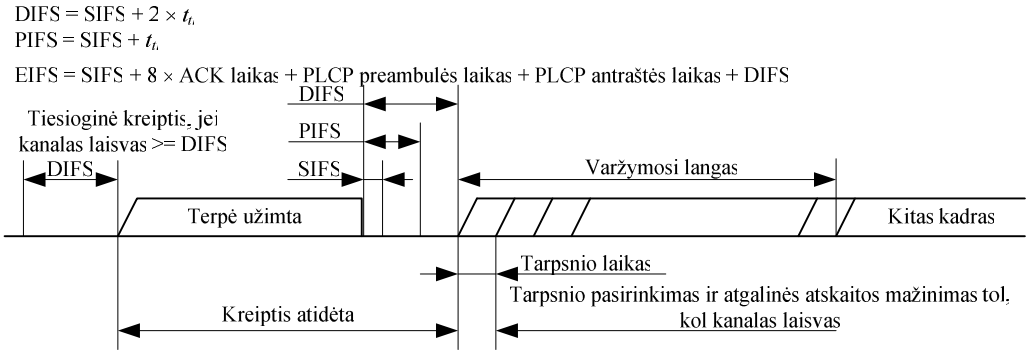
2.18 pav. RTS/CTS mechanizmas: a) kolizijos susidarymas, b) RTC/CTS mechanizmo veikimo principas

Visos kitos stotys, gavusios RTS ar CTS kadrą, sustabdo duomenų siuntimą. Šiuose kadruose esanti informacija apie duomenų paketo dydį nustato NAV vektorių.

Kolizija, įvykusi siunčiant RTC/CTS kadrus, sukelia žymiai trumpesnius laiko trukdžius nei kolizija, įvykusi perduodant duomenis, kadangi RTC/CTS kadrų dydžiai yra mažesni už atitinkamus duomenų kadrus. Visgi RTC/CTS kadrai užima tam tikrą kanalo resurso dalį, todėl IEEE 802.11 standarte yra įvesta duomenų kadro dydžio riba. RTS/CTS mechanizmas naudojamas tik duomenų kadro dydžiui viršijus tą ribą. Taip išvengiama spartos mažėjimo perdavinėjant mažus kadrus. Keturių kadrų (RTS, CTS, duomenų bei ACK) apsikeitimo procesas taip pat yra nedalomas ir kitos stotys jo nutraukti negali.

Laiko intervalai. WLAN įrenginiuose siųstuvas ir imtuvas perjungiami atsižvelgiant į tam tikrus laiko intervalus. IEEE 802.11 MAC standarte yra 5 laiko intervalai. Du iš jų

nusako fizinis lygmuo: trumpas tarpkadrinis tarpas (*angl. Short Interframe Space* – SIFS) ir tarpsnio laikas t_{tl} (*angl. slot time*). Trys papildomi intervalai priklauso nuo ankstesnių dviejų: paskirstytas tarpkadrinis tarpas t_{DIFS} (*angl. Distributed Interframe Space* – DIFS), prioriteto tarpkadrinis tarpas t_{PIFS} (*angl. Priority Interframe Space* – PIFS) ir išplėstas tarpkadrinis laiko tarpas t_{EIFS} (*angl. Extended Interframe Space* – EIFS), kuris naudojamas NAV sinchronizavimui, kai gaunamas sugadintas kadras. Naudojantis šiais laiko intervalais, yra valdomas duomenų perdavimo procesas, todėl siuntimas gali prasidėti tik šių intervalų pradžioje. Laiko intervalų tarpusavio santykiai pateikiami 2.19 pav., o jų skaitinės reikšmės 2.4 lentelėje.

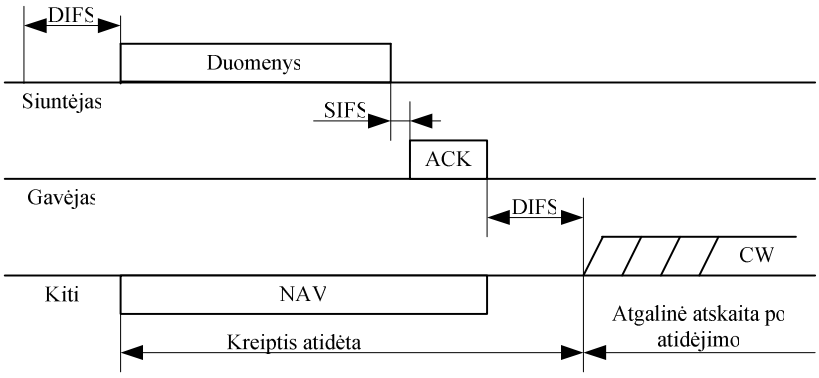


2.19 pav. IEEE 802.11 tarpkadriniai laikai

2.4 lentelė. Laiko intervalų reikšmės

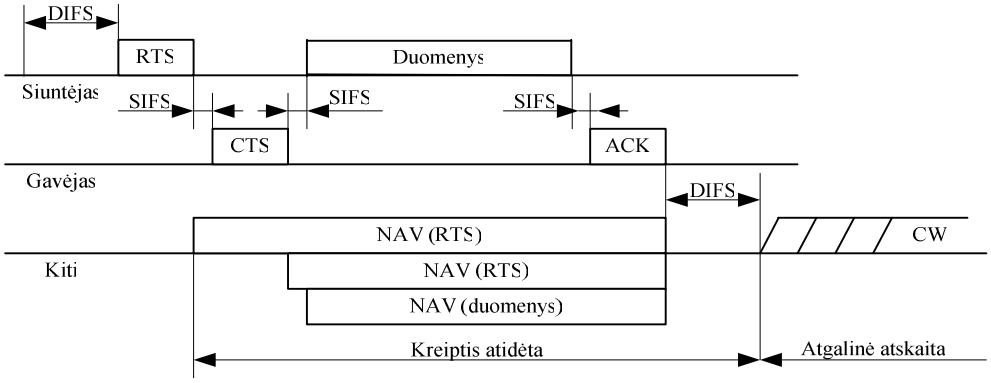
Standartas	t_{SIFS}, µs	t_{DIFS}, µs	t_{tl}, µs	CW_{min}	CW_{max}
IEEE 802.11a	16	34	9	15	1023
IEEE 802.11b	10	50	20	31	1023
IEEE 802.11g	10	50	20	15	1023
IEEE 802.11 DSSS	10	50	20	31	1023
IEEE 802.11 FHSS	28	128	50	15	1023
IEEE 802.11 IR	7	23	8	63	1023

Paskirstyta koordinavimo funkcija. DCF yra pagrindinė CSMA/CA funkcija, kuri koordinuoja bet kokį duomenų perdavimą. Prieš išsiųsdamas duomenų kadrą, MAC lygmuo

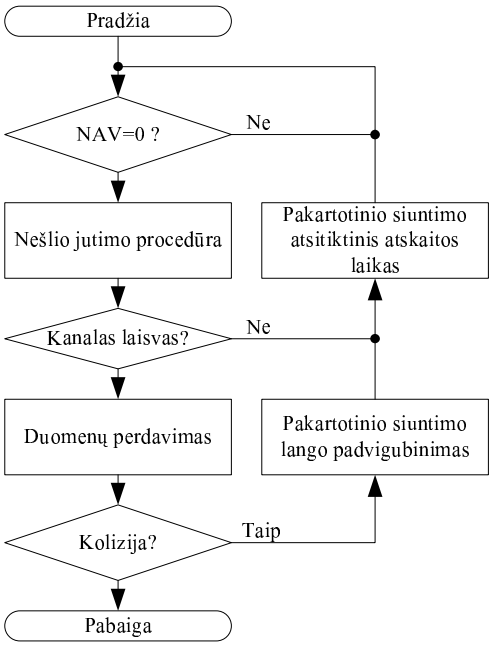


2.20 pav. IEEE 802.11 DCF veikimo principas nenaudojant RTS/CTS

pirmiausia tikrina kanalo būklę naudodamas virtualųjį ir fizinį nešlio jutimo mechanizmus. Jei abu mechanizmai rodo, kad kanalas po DIFS (ar EIFS, jei prieš tai gautas kadras buvo sugadintas) intervalo yra laisvas, tada pradedamas duomenų perdavimas. Jei bent vienas iš mechanizmų rodo, kad kanalas DIFS intervalo laikotarpiu yra naudojamas, tai stotis laukia siuntimo pabaigos, ir tada, naudodama pakartotinio siuntimo algoritmą (*angl. exponential backoff algorithm*), pradeda varžytis dėl terpės laukdama atsitiktinį laiko tarpą (2.20 paveikslas, 2.21 paveikslas). Pakartotinio siuntimo laikmačio reikšmė sumažėja vienetu, kai virtualiojo ir fizinio nešlio jutimo mechanizmai rodo, kad kanalas neužimtas. Stotis, pasirinkusi trumpiausią varžymosi delsą, laimi ir turi teisę perduoti kadrą. Kitos stotys turi laukti kito varžymosi laikotarpio. Varžymasis, kaip procesas, yra atsitiktinis, vykstantis po kiekvieno perduoto kadro, todėl kiekviena stotis turi vienodas galimybes perduoti savo duomenis. DCF funkcijos veikimo algoritmas pateikiamas 2.22 paveiksle.



2.21 pav. IEEE 802.11 DCF veikimo principas naudojant RTS/CTS



2.22 pav. IEEE 802.11 DCF veikimo algoritmas

Kai išsiuntus kadrą patvirtinimo kadras negaunamas, stotis fiksuoja koliziją. Varžymosi langas padvigubinamas, parenkamas naujas atgalinio pakartotinio siutimo laikas, ir procesas kartojasi tol, kol kadras išsiunčiamas arba kol pasibaigia šio kadro galiojimo laikas.

Naudojant DCF funkciją yra sukuriamas *ad hoc* tinklas, kitaip dar vadinamas nepriklausomas bazinis paslaugos vienetas (*angl. Independent Basic Service Set* – IBSS). Tokiu atveju stotys keičiasi informacija tiesiogiai, be jokių papildomų kreipties taškų.

Straipsnyje [17] yra siūloma modernizuoti DCF funkciją taip, kad mažesnės spartos įrenginiai nešuntuotų viso duomenų srauto.

Pakartotinio siuntimo algoritmas. Šis algoritmas pasirenka atsitiktinį skaičių, kuris nusako laiko tarpsnį, po kurio, nesant duomenų siuntimo, perdavimo terpė turi būti laisva (2.23 paveikslas). IEEE 802.11 MAC protokole numatyta, kad tarp dviejų sėkmingai perduotų kadrų yra bent vienas tarpsnio trukmės laiko tarpas. Pakartotinio siuntimo laikmačio trukmė t_{CW} apskaičiuojama pagal du parametrus: fizinio lygmens parametrą, vadinamą tarpsnio laiką t_{tl}, ir varžymosi langą (*angl. Contention Window* – CW), t. y. aibę, iš kurios pakartotinio siuntimo laikmačiui išrenkamas atsitiktinis skaičius nuo 0 iki *CW*. Varžymosi langas kiekvieną kartą padvigubėja, jei dėl kolizijos nepavyksta išsiųsti duomenų. Pirminę *CW* reikšmę nusako standarto CW_{min} parametras, kuris didinamas tol, kol pasiekiama maksimali CW_{max} reikšmė. Kiekvienam fizinio lygmens standartui yra numatytos individualios minimali CW_{min} ir maksimali CW_{max} vertės (2.4 lentelė). Pakartotinio siuntimo laikas yra apskaičiuojamas pagal (2.1) išraišką:

$$\begin{gathered} CW = \left(0, \min\left(\left(CW_{\min}+1\right)^{i+1}-1, CW_{\max}\right)\right), \\ t_{at} = \text{random}\,(CW) \cdot t_{tl}\,, \end{gathered} \tag{2.1}$$

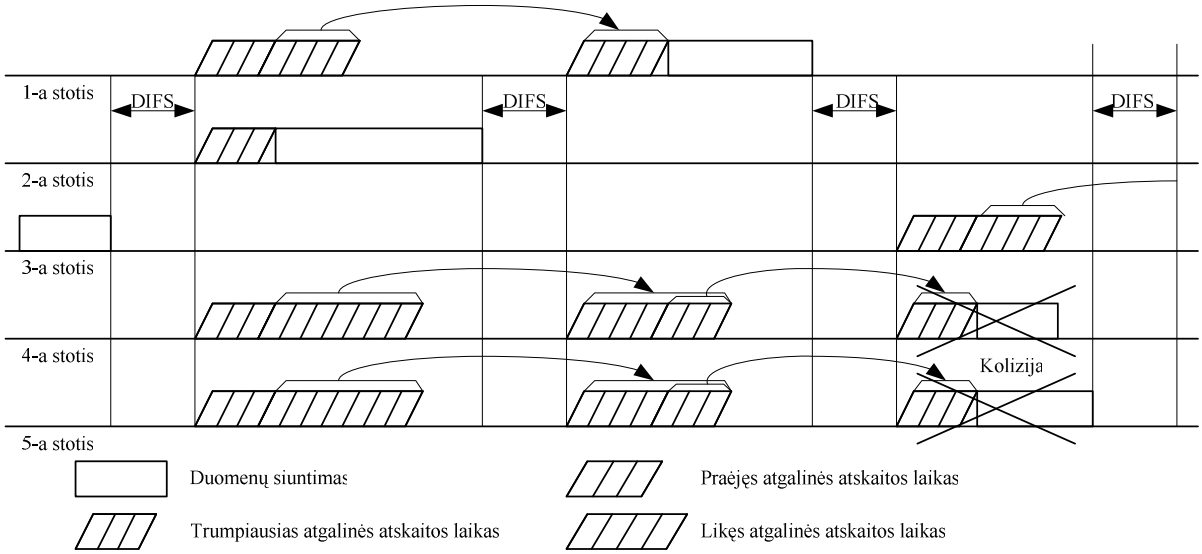
čia i – bandymo numeris, random – atsitiktinė funkcija.

Sėkmingai nusiuntus kadrą, varžymosi langas sumažinamas iki minimalios CW_{min} reikšmės. Pagal IEEE 802.11b standartą, kai perdavimas pavyksta po pirmo varžymosi karto, vidutinis atgalinės atskaitos laikas $\overline{t}_{\mathrm{CW}}$ (2.2) yra apie 300 μs:

$$\overline{t}_{CW} = \frac{\left(CW_{min}-1\right)}{2} t_{tl}\,. \tag{2.2}$$

Mažinant CW_{min} reikšmę, galima padidinti maksimalų kanalo laidumą, nes sumažėja vidutinė $\overline{t}_{CW}$ reikšmė. Tokie siūlymai yra pateikti darbuose: [18–21].

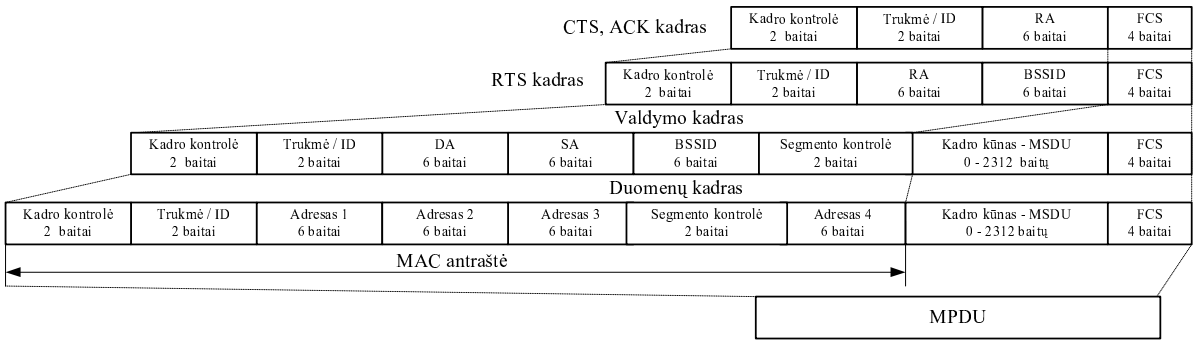
Jei tinkle yra daug stočių, tada yra didelė tikimybė, kad dvi ar daugiau stočių gali pasirinkti tą patį varžymosi lango laiko tarpsnį. Tai sukelia koliziją, kurios metu prarandami duomenys bei mažėja bendras tinklo laidumas. Tačiau situaciją galima pagerinti naudojant RTC/CTS funkciją. Kai IEEE 802.11 tinkle veikia RTC/CTS mechanizmas, tai jame gali dirbti daugiau stočių, tačiau maksimali tinklo perdavimo sparta mažėja [22, 23].



2.23 pav. Pakartotinio siuntimo algoritmas

Kadrų struktūra. IEEE 802.11a, b bei g kadrų struktūra pateikiama 2.24 paveiksle. Čia matyti, kad kadras MPDU sudarytas iš MAC antraštės, kadro kūno (*angl. MAC Service Data Unit* – MSDU) ir kontrolinės sumos (*angl. Frame Check Sequence* – FSC). Yra keturi skirtingų tipų kadrai:

1. duomenų kadras, skirtas perduoti duomenis iš aukštesnių lygmenų;
2. valdymo kadras, skirtas švyturio (*angl. beacon* – B) kadro perdavimui;
3. WEP šifravimo mechanizmo kadras;
4. tarnybiniai kadrai RTS, CTS ir ACK.



2.24 pav. IEEE 802.11 a, b ar g kadrų struktūra

Įvairių fizinio lygmens standartų kadrų dydžiai pateikiami 2.5 lentelėje.

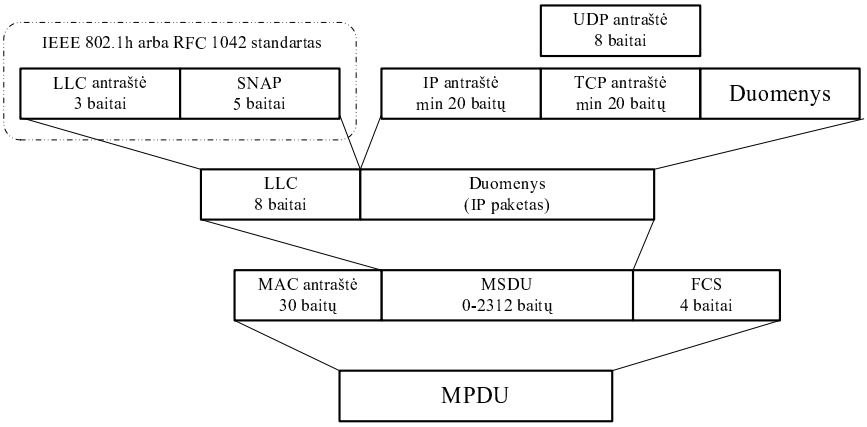
Nagrinėjant paskelbtus darbus pastebėta, kad kai kuriuose šaltiniuose [24] yra pateikti kitokie IEEE 802.11a standarto kadrų laikai. Analizė parodė, kad juose yra kitaip interpretuojama OFDM antraštė.

2.5 lentelė. IEEE 802.11 a/b/g kadrų intervalų trukmės

Parametras \ Standartas	802.11 DSSS	802.11 FHSS	802.11 IR	802.11a	802.11b	802.11g
$t_{PLCP_preambulė}$ – PCLP preambulės trukmė, μs	144	104	15,25 – 19,25	16	144[1] 72[2]	144[1] 72[2] 16[3]
$t_{PLCP_antraštė}$ – PCLP antraštės trukmė, μs	48	24	–	4	48[2] 24[1]	48[1] 24[2] 4[3]
$t_{preamb} = t_{PLCP_preambulė} + t_{PLCP_antraštė}$ – visos preambulės trukmė, μs	192	128	15,25 – 19,25	20	192[2] 96[1]	192[1] 96[2] 20[3]
$n_{MAC_antraštė}$ – MAC antraštės dydis[4] baitais	34 baitai					
$n_{service}$ – service lauko dydis bitais	–	–	–	16	–	16
$n_{paveldas}$ – paveldo lauko dydis bitais	–	–	–	6	–	6
n_{ACK} – ACK kadro dydis baitais	14					
n_{CTS} – CTS kadro dydis baitais	14					
n_{RTS} – RTS kadro dydis baitais	20					

[1] kai yra naudojama ilga preambulė;
[2] kai yra naudojama trumpa preambulė;
[3] kai yra naudojama OFDM preambulė;
[4] kartu su FSC kontroline suma, užimančia 4 baitus.

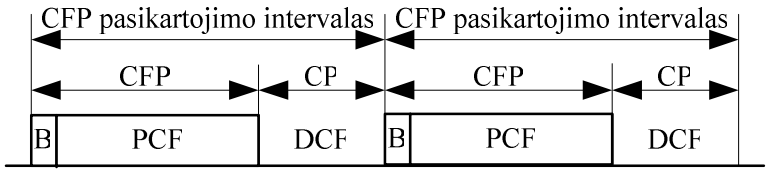
Aukštesnių lygmenų inkapsuliavimas į IEEE 802.12. Priešingai nei Ethernet, IEEE 802.11 standartas aukštesnių lygmenų protokolų perdavimui naudoja IEEE 802.2 loginio kanalo valdymo (*angl. Logical Link Control* – LLC) protokolą. IP paketų perdavimo IEEE 802.11 tinkle naudojant IEEE 802.2 LLC inkapsuliacijos mechanizmą, pavyzdys



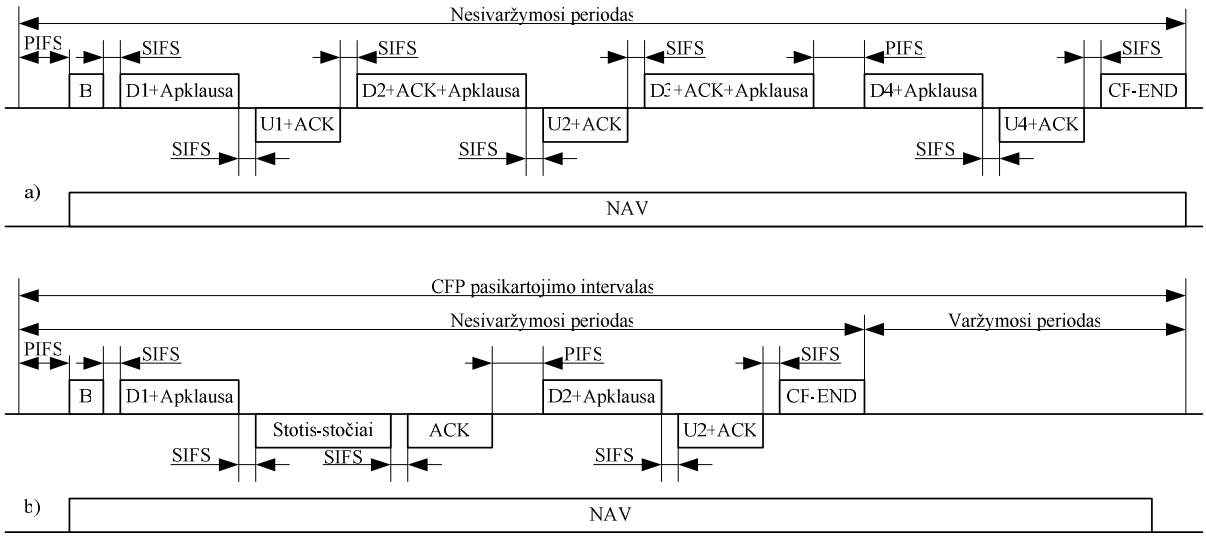
2.25 pav. IP inkapsuliacija į IEEE 802.11 kadrą

pateikiamas 2.25 pav., iš kurio matyti, kad prieš kiekvieną perduodamą IP paketą yra pridedama 8 baitų ilgio antraštė [25, 26]. Šiuo metu egzistuoja du skirtingi LLC inkapsuliavimo metodai, skirti duomenų perdavimui IEEE 802 tinkluose. Vienas iš jų yra aprašytas RFC 1042 [27], o kitas IEEE 802.1h [28] standarte. Abu šie protokolai labai panašūs, nes yra vienodo ilgio bei kilę iš tarptinklinės kreipties protokolo (*angl. Subnetwork Access Protocol* – SNAP), tačiau dažniausia naudojamas RFC 1042 protokolas. Abiejų protokolų „tipo“ lauke yra nurodomas aukštesnio lygmens, kuriuo transportuojami duomenų paketai, protokolo numeris iš Interneto inžinierių darbo grupės (*angl. The Internet Engineering Task Force* – IETF) nustatyto sąrašo [29].

Centralizuota valdymo funkcija. Apklausos MAC protokolas IEEE 802.11 naudojamas PCF funkcijoje kaip kanalo kreipties mechanizmas, veikiantis virš DCF funkcijos (2.7 paveikslas). Šis mechanizmas yra tarpinis variantas tarp CSMA/CA ir TDMA, nes kreipties taškas turi pilną kanalo kontrolę, tačiau kadro dydis nėra fiksuojamas. Prieš siųsdama duomenis per AP, stotis turi užsiregistruoti kreipties taške. Kiekvienai tokiai stočiai AP reguliariai siunčia specifinį apklausos kadrą (*angl. pool*). Su šiuo kadru stotis gauna jai adresuotus duomenis ir leidimą užimti kanalą duomenų perdavimui. Registravimosi procedūra atliekama varžymosi periodo (*angl. Contention Period* – CP) metu, kadangi dalindamosi



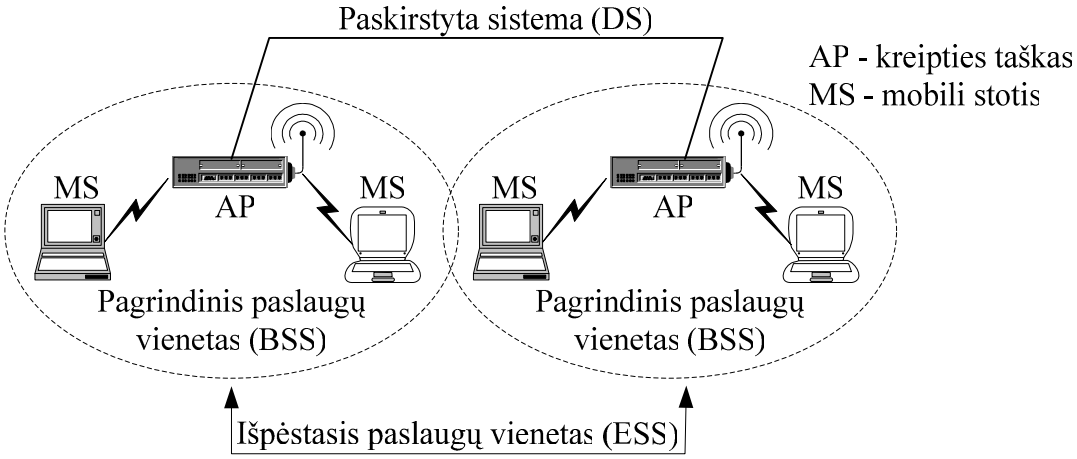
2.26 pav. Kanalo dalinimas tarp DCF ir PCF funkcijų



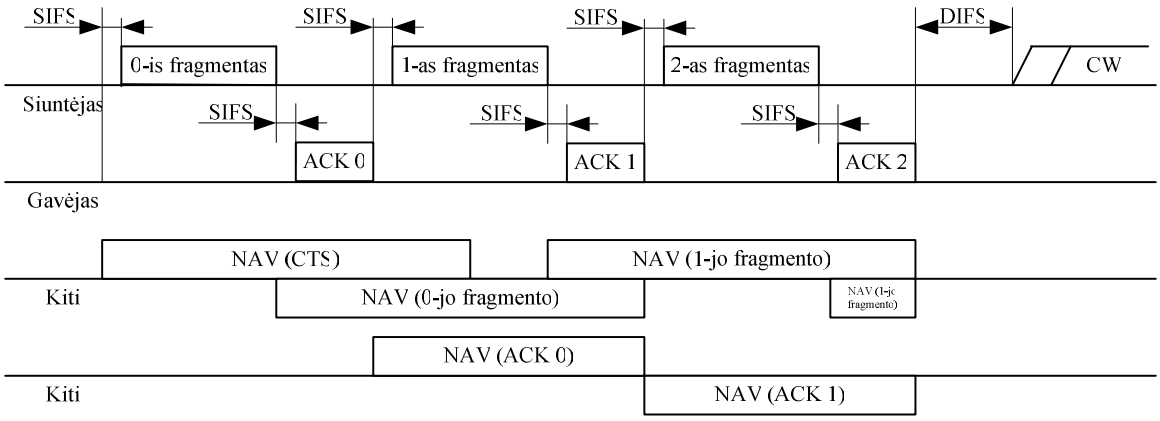
2.27 pav. PCF funkcijos veikimas: a) siunčiant duomenis tarp AP ir stoties, b) siunčiant duomenis tarp stočių.

kanalą laike PCF ir DCF funkcijos gali veikti tame pačiame tinkle (2.26 paveikslas). Po CP fazės kreipties taškas, siekdamas užimti kanalą, turi laukti PIFS laiko tarpą, trumpesnį nei DIFS (2.19 pav.), po kurio išsiunčiamas švyturio kadras, kuris signalizuoja kitoms stotims, kad AP perjungia kanalą į nesivaržymo būseną (*angl. Contention Free Period* – CFP). Švyturio kadre nurodoma CFP periodo trukmė, pagal kurią stotys nustato NAV vektorių ir tuo laikotarpiu nebando užimti kanalo (2.27 paveikslas).

PCF funkcija leidžia tarp IEEE 802.11 standarto įrenginių organizuoti centralizuotą bevielį tinklą. Vienas kreipties taškas ir jo aprėpties zonoje asocijuotos stotys sudaro bazinį (*angl. Basic Service Set* – BSS), o keletas sujungtų AP sudaro išplėstą (*angl. Exteanded Service Set* – ESS) paslaugos vienetą (2.4 paveikslas). Pastarieji, sujungti bet kokia (laidine ar beviele) terpe, vadinami WLAN tinklo kamienu arba paskirstyta sistema (*angl. Distributed System* – DS) (2.28 paveikslas). Visos ESS tinklo stotys virtualiai priklauso tam pačiam MAC tinklui. Kai iš vienos AP aprėpties zonos stotis pereina į kitą, AP perduoda vienas kitam duomenis per DS.



2.28 pav. IEEE 802.11 centralizuoto tinklo struktūra



2.29 pav. IEEE 802.11 standarto fragmentacijos mechanizmas

Kadangi PCF organizuoja izochroninį duomenų perdavimą [8], tai sudaro būtinas prielaidas minimalioms teikiamų paslaugų kokybės garantijoms. Siekiant teikti garantuotos kokybės paslaugas, sukurtas IEEE 802.11e standartas [30].

Fragmentacija. Fragmentacija naudojama tada, kai reikia išsiųsti kadrą, kurio dydis viršija maksimalų perdavimo vienetą (*angl. Maximum Transfer Unit* – MTU) arba kai dėl padidinto triukšmo ar per mažo signalo lygio perduodamą kadrą tenka skaidyti į mažesnius kadro fragmentus, kurių iškraipymo tikimybė mažesnė, todėl kadrui dingus pakartotinai siunčiami trumpesni kadrai. Tačiau iš kitos pusės toks mechanizmas įneša papildomą pertekliškumą. Fragmentacijos metu po to, kai gaunamas patvirtinimas apie nusiųstą kadrą, po SIFS laiko intervalo yra siunčiamas kitas kadro fragmentas, nes tarp gretimų perduodamų fragmentuotų kadrų dėl kanalo iš naujo nėra varžomasi (2.29 paveikslas).

2.4 WLAN tyrimų santrauka

Darbų apie IEEE 802.11 parašyta labai daug. Vien tik IEEE ryšių grupė nuo 2000 metų šia tematika išspausdino virš šešių tūkstančių darbų. Pagal nagrinėjamą problematiką visus šiuos darbus galima suskirstyti į keletą grupių:

1. darbai, aprašantys standartus, tarp jų ir naujai kuriamus, jų galimybes, veikimo principus. Dažniausiai šie darbai publikuojami po to, kai yra išleidžiama nauja standarto specifikacija, pavyzdžiui, darbas [31], kuriame aprašytas IEEE 802.11 standartas bei jo jungimo schemos, detalizuojami fiziniai ir kanaliniai lygmenys. Tai yra vienas pirmųjų straipsnių apie IEEE 802.11 standartą;
2. darbai bei eksperimentiniai tyrimai, analizuojantys WLAN tinklų pralaidumo problematiką. Juose dažnai pateikiamos rekomendacijos, kaip tobulinti IEEE 802.11 standartą tam, kad būtų pasiektas didesnis laidumas. Tokie darbai yra pateikiami [19], [21], [22], [32–37];
3. darbai, kuriuose tyrinėjamas nestandartinis WLAN tinklų taikymas:
   a) darbai, nagrinėjantys balso perdavimą, [38–42],
   b) darbai, nagrinėjantys vaizdų perdavimą, [43–45];
4. darbai, analizuojantys paslaugų kokybės (*angl. Quality of Service* – QoS) galimybes, [18], [30], [46–49];
5. darbai, nagrinėjantys WLAN tinklų integraciją į WAN tinklus [50–52].

2.5 Skyriaus išvados

Šioje darbo dalyje nagrinėjamos WLAN tinklų radijo technologijos, išsamiai gilinamasi į šiuo metu populiariausius standartus, formuluojami spręstini uždaviniai. Surinkta

ir susisteminta medžiaga sudaro bazinių postulatų rinkinį, kuris reikalingas taikomiesiems projektams kurti.

Pažymėtina tai, kad:

1. radijo ryšio priemonės vartotojų prieigų tinkluose – tai alternatyva laidinio ryšio priemonėms, kurių realiais savininkais išlieka telekomų monopoliai;
2. realiai įvertinus padėtį, šiuo metu fiksuotų tinklų prieigų sferoje labiausiai taikytina yra IEEE 802.11b standarto įranga, tačiau artimiausioje ateityje turėtų būti taikoma ir IEEE 802.11a bei g standartų įranga;
3. IEEE 802.11b standarto įranga nėra skirta teikti paslaugas, orientuotas į sujungimus, todėl, siekiant taikyti ją vartotojų prieigų tinkluose efektyviai, reikia ieškoti būdų, kaip palaikyti priimtiną ryšio kokybę ir racionaliai panaudoti radijo kanalo galimybes.

3. WLAN PAGRINDU VEIKIANČIŲ VARTOTOJŲ PRIEIGŲ TINKLŲ TYRIMAS

Šiame skyriuje aptariamas disertacijos tyrimų objektas, sukuriama WLAN charakteristikų bei parametrų skaičiavimo metodika, pateikiami atliktų eksperimentų, tiriant IEEE 802.11b standarto tinklus, rezultatai. Šio skyriaus rezultatai skelbiami [A1–A5], [A9].

3.1 Vartotojų prieigos ir tinklai

Prijungus vartotoją prie bendrųjų telekomunikacijų tinklų bet kokia prieigos linija, iš esmės jis gali gauti visas reikalingas paslaugas. Tačiau nuo konkretaus prieigos linijos tipo pasirinkimo priklauso tai, kokia yra paslaugos kokybė, kiek kainuoja prieigos linijos įrengimas ir ar racionaliai naudojami tinklo resursai bei apskritai bendra vartotojo investicija.

Ilgus dešimtmečius vartotojai prie bendrųjų telefono tinklo resursų buvo jungiami paprastomis linijomis, dažniausia laidinėmis. Šiais laikais, sukūrus naujas paslaugų rūšis, informaciniai srautai iki galinių vartotojų nuolatos didėja, todėl paprastų linijų informacijos perdavimui nebeužtenka. Taigi tenka daugiau dėmesio skirti vartotojų prieigoms ir jų tobulinimui.

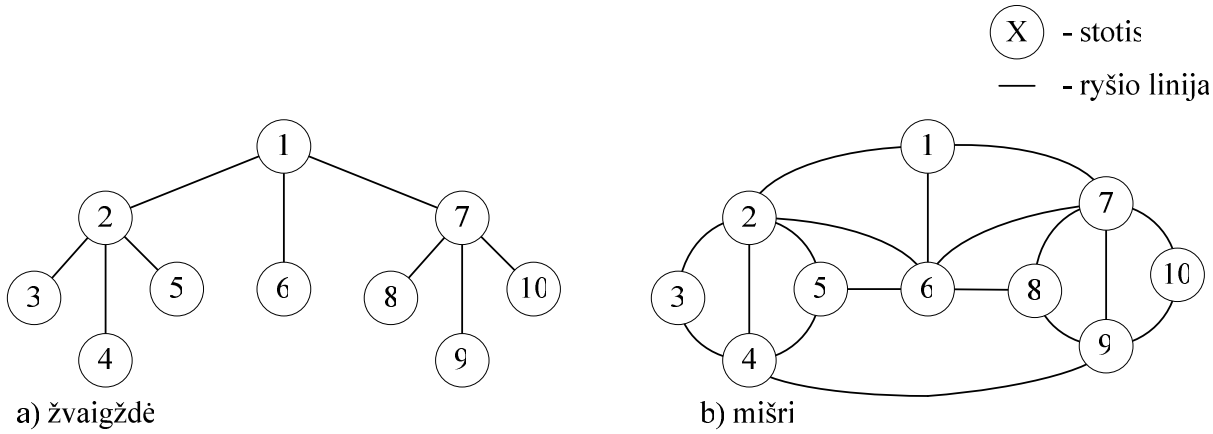
Vartotojų prieigų modernizavimo krypčių yra nemažai, viena iš jų yra skaitmeninių linijų DSL bei jų modifikacijų: asimetrinės ADSL ir didelės spartos skaitmeninės linijos VDSL – taikymas.

Kita ryšių technologija, kuri neseniai pradėta taikyti vartotojų prieigose, yra LAN bei WLAN tinklai. Mokslinėje bei techninėje literatūroje dažniausia nagrinėjami įvairių standartų LAN ir WLAN. Jų nagrinėjimo tikslai – nustatyti bendrąsias sukurtų tinklų savybes bei jas tobulinti.

Šio darbo tyrimo objektas – vartotojų prieigų tinklai (VPT), kuriuose prieigų tinklus kuria patys vartotojai. VPT išsiskiria tokiais požymiais:

1. VPT – paskutinė grandis tarp bendrųjų (telefono, interneto bei kitų) tinklų ir vartotojų;
2. VPT teikia integruotas telefono ir interneto paslaugas;
3. VPT architektūra yra mišri, jų topologija yra *ad hoc* (stotys gali veikti kaip retransliatoriai), turinti tokius infrastruktūros požymius kaip išėjimai į bendruosius telefono ir interneto tinklus (3.1 paveikslas) [53];
4. VPT įranga mišri, tačiau dominuojanti ryšio priemonė yra radijo ryšys. Naudotini standartai: IEEE 802.3 (10, 100, 1000 Mb/s), IEEE 802.11 a/b/g, IEEE 802.15 bei IEEE 802.16;

5. VPT tinkluose duomenims ir balsui transportuoti rekomenduotinas TCP/IP protokolų stekas, nes tai populiariausia ir paprasčiausia transportavimo forma, leidžianti lengvai sujungti VPT su internetu [54];
6. VPT kuriami prisilaikant teritorinio arba bendrumo-traukos principo;
7. vartotojai kuria ir eksploatuoja VPT nedalyvaujant operatoriui.



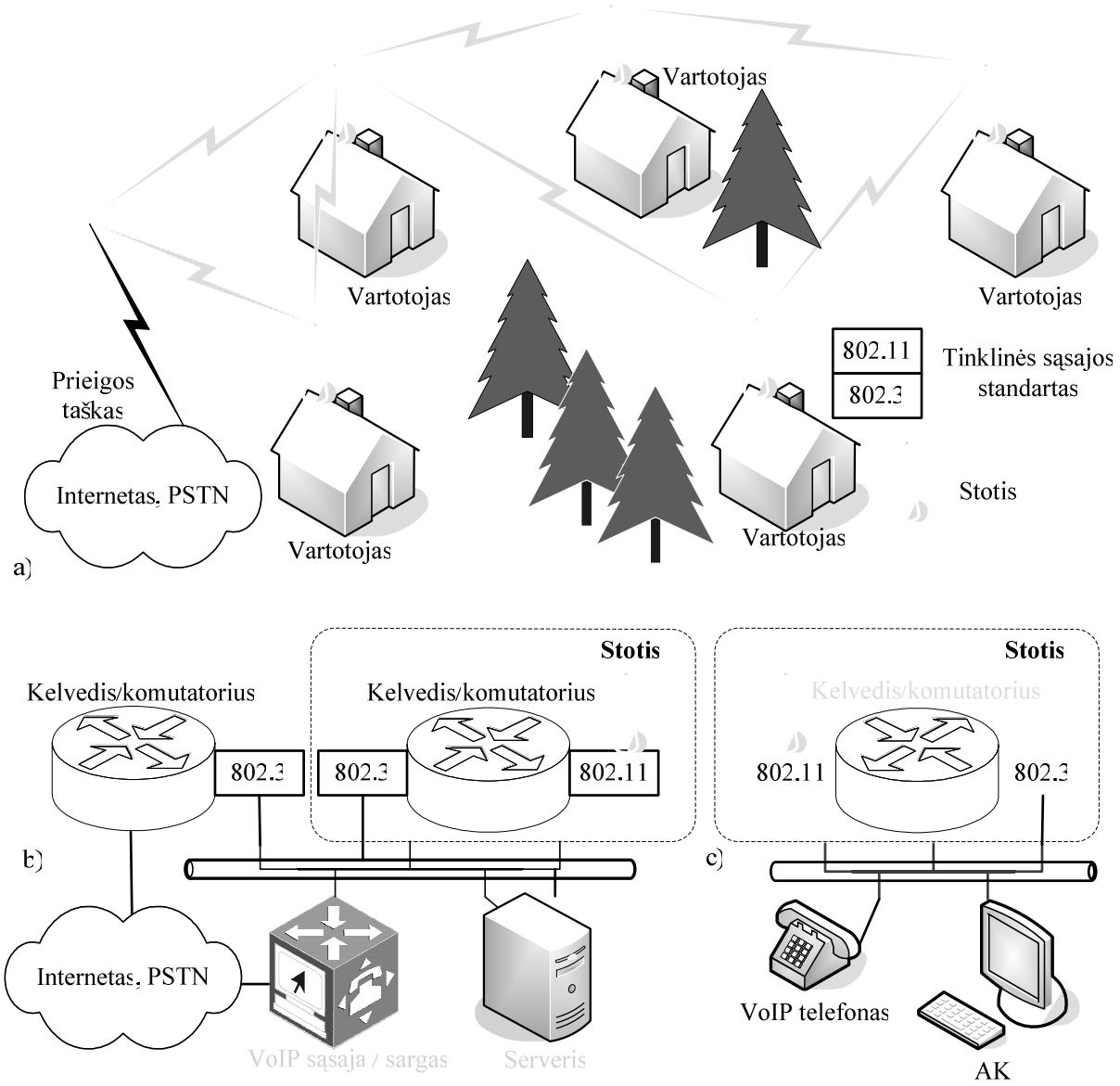
3.1 pav. Vartotojų prieigų tinklų topologija

Siekiant apsibrėžti tyrimo objektą pasirenkamos tokios sąlygos:

1. bazinė VPT technologija – tai IEEE 802.11 a, b arba g standartų įrangos pagrindu veikiantys WLAN, kadangi yra sukurti nebrangūs ir kokybiški radijo ryšio įrenginiai bei laisvas 2,4 ir 5 GHz radijo spektras, kuriuo gali naudotis bet kas ir bet kur. Ši technologija išsamiai nagrinėjama moksliniuose darbuose, ji nuolat modifikuojama;
2. charakteringa VPT taikymo vieta – tai priemiesčiai, atskiros gyvenvietės bei nutolusių vienkiemių grupės.

VPT tinklas susideda iš stočių, prieigos taškų bei vartotojų techninės įrangos. Vartotojų įranga, skirta darbui tinkle (asmeniniai kompiuteriai (AK) ir/arba balso per IP (*angl. Voice over IP* – VoIP) telefonai), prijungiama prie bevielio ryšio stoties naudojant laidinį arba bevielį ryšį. Tarpusavyje stotys yra sujungtos per bevielį ryšį. Su kitais tinklais VPT jungiasi per prieigos tašką, į kurį ateina ryšio kanalai ir iš paslaugų tiekėjų. Savo ruožtu per pastarųjų tinklus vartotojai gali prisijungti prie interneto bei bendrųjų telefono tinklų. Tipinio vartotojų prieigos tinklo bei stočių jungimo schemos pateikiamos 3.2 paveiksle.

Diskusijose ir moksliniuose darbuose apie būsimas telekomunikacijų technologijas, nagrinėjant ateities – 3G ir 4G tinklus [55, 56], neretai išsakomos mintys, kad ilgainiui į bendrą tinklo struktūrą turėtų būti įjungiami ir įvairūs vietiniai tinklai, tarp jų įvairios WLAN versijos, todėl galima tikėtis, kad ateities telekomunikacijų plėtroje VPT suvaidins svarbų vaidmenį.



3.2 pav. Vartotojų tinklo schema: a) VPT schema, b) prieigos taško struktūrinė schema, c) vartotojo tinklo struktūrinė schema

3.2 WLAN parametrai ir charakteristikos

CSMA pagrindu veikiančių tinklų analizė buvo vykdoma daugelyje darbų [19], [21], [22], [32–37], [57, 58]. Buvo sudarinėjami teoriniai modeliai bei kuriami specialūs moduliai, skirti WLAN modeliavimui programiniame pakete ns2 [59]. Daugumoje darbų, tiriančių WLAN tinklus, tyrimai buvo atliekami tinkle esant dideliam stočių kiekiui. Tuo tarpu apibrėžiant šio darbo tyrimo objektą VPT, pasirenkama tokia sąlyga, kad stočių skaičius nebūtų didelis.

Šioje darbo dalyje išskiriamos ir aprašomos tik tos WLAN tinklo savybės, nuo kurių priklauso galimybė taikyti WLAN įrangą vartotojų tinkluose. Tai kanalo laidumas (*angl. throughput*) ir tinklo kaip sistemos talpa (*angl. capacity*).

Pagal informacijos teoriją ryšių kanalo laidumas nusakomas didžiausia duomenų šaltinio sparta, kuriai esant duomenys perduodami be iškraipymų. Priklausomai nuo to, kokia kadro (–ų) duomenų dalis yra skaičiuojama, galima išskirti fizinio kanalo spartą arba kanalo laidumą, kai yra perduodami vartotojų duomenys. Abiem atvejais parametras priklauso nuo perduodamų bitų trukmės. IEEE 802.11 standarto WLAN laidumo tyrimai pateikiami [20], [60, 61] darbuose.

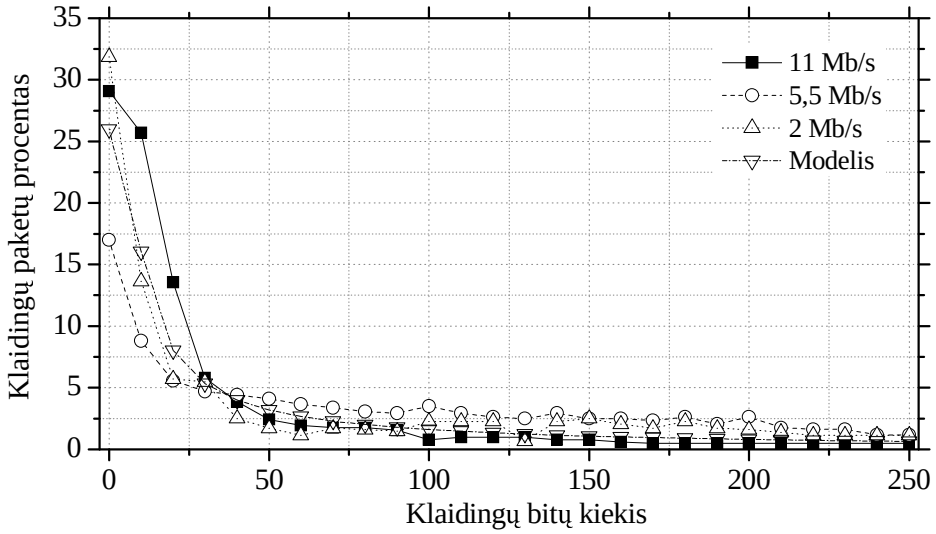
3.2.1 Fizinio kanalo sparta

Fizinio kanalo sparta v_f – tai bitų perdavimo greitis vienos krypties linijoje, kuri nustatoma paketo perdavimo metu ir išreiškiama formule:

$$v_f = \frac{1}{t_b}, \tag{3.1}$$

čia t_b – vieno bito perdavimo laikas.

Parametras v_f – tai svarbus WLAN kanalo rodiklis. Jis priklauso nuo ryšio nuotolio bei kitų sąlygų (trukdžių, signalo tipo). Fizinė duomenų perdavimo sparta skiriasi nuo fizinio kanalo laidumo, nes faktinę vartotojo duomenų perdavimo spartą mažina kolizijos bei kanalo apkrova.



3.3 pav. Klaidingų bitų pakete pasiskirstymai

Fizinio kanalo kokybės įtaka. Kanalo kokybės įtaką aiškiai parodo klaidingų bitų perdavimo tankis (*angl. Bit Error Rate* – BER). Ruošiant šį darbą atlikta [54] straipsnyje skelbtų modeliavimo duomenų analizė leidžia suformuluoti gana svarbią išvadą: perduotuose duomenų paketuose *j* klaidingų bitų pasitaikymo dažnis nuo realios kanalo perdavimo spartos priklauso nežymiai (3.3 paveikslas). Apytikrė šios priklausomybės išraiška yra p_0/j (3.3 pav.) kreivė, pavadinta "modeliu", čia p_0 – klaidingų bitų perdavimo tankis.

3.2.2 WLAN kanalo laidumas

Išnagrinėjus WLAN technologijas, manoma, kad vartotojams svarbias tinklo savybes išreiškia:

1. WLAN vienakrypčio (*angl. simplex*) kanalo laidumas;
2. WLAN dvikrypčio (*angl duplex*) kanalo laidumas;
3. WLAN tinklo laidumas. Pastarasis įvairioms taikymų schemoms skirtingas.

WLAN laidumo skaičiavimui būtina išnagrinėti IEEE 802.11 standarto perduodamų duomenų ir tarnybinių laiko tarpų trukmes.

Perdavimo laikai. Žinant fizinio radijo kanalo laidumo v_f reikšmę, paketo ar jo dalių perdavimo laikai t_{data} skaičiuojami pagal (3.2) išraišką. Pagal šią formulę konkrečiomis sąlygomis analogiškai skaičiuojami RTS, CTS ir ACK paketų, MAC, LLC ir TCP/IP antraščių bei CRC lauko perdavimo laikai, atitinkamai žymimi: t_{RTS} , t_{CTS} , t_{ACK} , t_{MAC} , t_{LLC} , $t_{TCP/IP}$, t_{CRC}.

$$t_{data} = v_f N = \frac{N}{t_b}, \tag{3.2}$$

čia N – duomenų kiekis bitais.

Bendra vartotojo duomenų paketo papildomų laukų perdavimo trukmė pažymima t_s . Ji išreiškiama preambulės, MAC, LLC, TCP/IP protokolo steko antraščių ir CRC perdavimo trukmių suma:

$$t_s = t_{preamb} + t_{MAC} + t_{LLC} + t_{TCP/IP} + t_{CRC}, \tag{3.3}$$

čia t_{preamb} – preambulės perdavimo laikas (2.5 lentelė).

Skaičiuojant tinklo ribinį laidumą dar reikia įvertinti ir tarp perduodamų paketų būtinus papildomus intervalus t_Δ . Priklausomai nuo to, ar kanalo rezervavimas naudojamas ar ne, intervalo tarp tinklo paketų trukmė yra skirtinga. Jei kanalo rezervavimas naudojamas,

tada minimali papildomų intervalų tarp perduodamų paketų trukmė, neįvertinant varžytinių dėl teisės perduoti trukmių, išreiškiama taip:

$$t_{\Delta 11R} = t_{DIFS} + t_{RTS} + t_{CTS} + 3t_{SIFS} + t_{ACK}\,, \tag{3.4}$$

čia $t_{\Delta 11R}$ – minimali trukmė tarp tinklo paketų, indeksu R pažymėta tai, kad naudojamas kanalo rezervavimas.

Jei kanalas nėra rezervuojamas, tada ši išraiška paprastesnė:

$$t_{\Delta 11} = t_{DIFS} + t_{SIFS} + t_{ACK}\,. \tag{3.5}$$

Apibendrintai vienam paketui perduoti būtino laiko intervalo trukmė t_p išreiškiama formule:

$$t_p = t_{data} + t_s + t_\Delta = t_{kadr} + t_\Delta\,, \tag{3.6}$$

čia t_{data} – laiko intervalo trukmė, būtina vienam vartotojo duomenų paketui perduoti, t_{kadr} – vieno kadro perdavimo trukmė. Tai parametras, rodantis, kiek laiko užtrunka perduoti bet kokio tipo kadrą su preambule, visomis antraštėmis bei vartotojo duomenimis, be jokių papildomų laiko intervalų. Atvirkštinė šio parametro reikšmė apibūdintų kanalo apkrovą, t. y. kiek apkraunamas kanalas perduodant vieną paketą.

IEEE 802.11b standarto kadrų trukmė t_{kadr} skaičiuojama pagal (3.7) išraišką, o IEEE 802.11a ir g – pagal (3.8) išraišką [35], [37]:

$$t_{kadr} = t_{preamb} + \left[\frac{8\left(n_{MAC_antraštė} + n_{MPDU}\right)}{v_f}\right], \tag{3.7}$$

$$t_{kadr} = t_{preamb} + \left[\frac{n_{service} + n_{paveldas} + 8\left(n_{MAC_antraštė} + n_{MPDU}\right)}{v_f}\right], \tag{3.8}$$

čia v_f – perdavimo sparta Mb/s, n_{MPDU} – duomenų paketo su tinklo ir aukštesnių lygmenų antraštėmis dydis baitais (3.9), kitų dydžių aprašas pateikiamas 2.5 lentelėje. Skaičiuojant RTS, CTS bei ACK kadrų trukmes, dydis $n_{MAC_antraštė}$ yra atitinkamai lygus n_{RTS}, n_{CTS}, n_{ACK}, o n_{MPDU} yra lygus nuliui.

$$n_{MPDU} = n_{data} + n_{LLC} + n_{TCP/IP}, \quad (3.9)$$

čia n_{data} – vartotojo duomenų dydis baitais, n_{LLC} – LLC, $n_{TCP/IP}$ – TCP/IP protokolo steko antraščių dydis baitais.

Pagal (3.8) ir (3.9) išraiškas apskaičiuotos IEEE 802.11a, b bei g standarto kadrų trukmės pateikiamos 3.1 lentelėje.

3.1 lentelė. IEEE 802.11a, b bei g standarto kadrų trukmės

Sparta	t_{CTS}, t_{ACK}, µs	t_{RTS}, µs	Duomenų kadras[1] t_{dmax}, µs	Valdymo kadras, µs
IEEE 802.11a				
6 Mb/s	42,33	50,33	3151,67	3141,00
9 Mb/s	34,89	40,22	2107,78	2100,67
12 Mb/s	31,17	35,17	1585,83	1580,50
18 Mb/s	27,44	30,11	1063,89	1060,33
24 Mb/s	25,58	27,58	802,92	800,25
36 Mb/s	23,72	25,06	541,94	540,17
48 Mb/s	22,79	23,79	411,46	410,13
54 Mb/s	22,48	23,37	367,96	366,78
IEEE 802.11b su ilga preambule				
1 Mb/s	308,00	356,00	18932,00	18900,00
2 Mb/s	252,00	276,00	9564,00	9548,00
5,5 Mb/s	216,36	225,09	3602,55	3596,73
11 Mb/s	206,18	210,55	1899,27	1896,36
IEEE 802.11b su trumpa preambule				
1 Mb/s	208,00	256,00	18832,00	18800,00
2 Mb/s	152,00	176,00	9464,00	9448,00
5,5 Mb/s	116,36	125,09	3502,55	3496,73
11 Mb/s	106,18	110,55	1799,27	1796,36
IEEE 802.11g su OFDM preambule				
6 Mb/s	42,33	50,33	3151,67	3141,00
9 Mb/s	34,89	40,22	2107,78	2100,67
12 Mb/s	31,17	35,17	1585,83	1580,50
18 Mb/s	27,44	30,11	1063,89	1060,33
24 Mb/s	25,58	27,58	802,92	800,25
36 Mb/s	23,72	25,06	541,94	540,17
48 Mb/s	22,79	23,79	411,46	410,13
54 Mb/s	22,48	23,37	367,96	366,78
IEEE 802.11g su PLCP ilga preambule				
6 Mb/s	228,67	236,67	3338,00	3327,33
9 Mb/s	222,44	227,78	2295,33	2288,22
12 Mb/s	219,33	223,33	1774,00	1768,67
18 Mb/s	216,22	218,89	1252,67	1249,11
24 Mb/s	214,67	216,67	992,00	989,33
36 Mb/s	213,11	214,44	731,33	729,56

[1] Kai maksimalus MPDU lauko dydis lygus 2312 baitams.

3.1 lentelės tęsinys

Sparta	t_{CTS}, t_{ACK}, μs	t_{RTS}, μs	Duomenų kadras[2] t_{dmax}, μs	Valdymo kadras, μs
48 Mb/s	212,33	213,33	601,00	599,67
54 Mb/s	212,07	212,96	557,56	556,37
IEEE 802.11g su PLCP trumpa preambule				
6 Mb/s	132,67	140,67	3242,00	3231,33
9 Mb/s	126,44	131,78	2199,33	2192,22
12 Mb/s	123,33	127,33	1678,00	1672,67
18 Mb/s	120,22	122,89	1156,67	1153,11
24 Mb/s	118,67	120,67	896,00	893,33
36 Mb/s	117,11	118,44	635,33	633,56
48 Mb/s	116,33	117,33	505,00	503,67
54 Mb/s	116,07	116,96	461,56	460,37

WLAN vienakrypčio duomenų kanalo laidumas. Šis rodiklis išreiškiamas didžiausia šaltinio duomenų perdavimo sparta, perduodant duomenis vienakrypčiu kanalu:

$$v_s = \frac{v_f t_{data}}{t_\Sigma + t_{kadr}}, \tag{3.10}$$

čia t_d – duomenų kadro laiko trukmė, priklausanti nuo duomenų šaltinio, t_Σ – bendra visų papildomų kadro laukų trukmė:

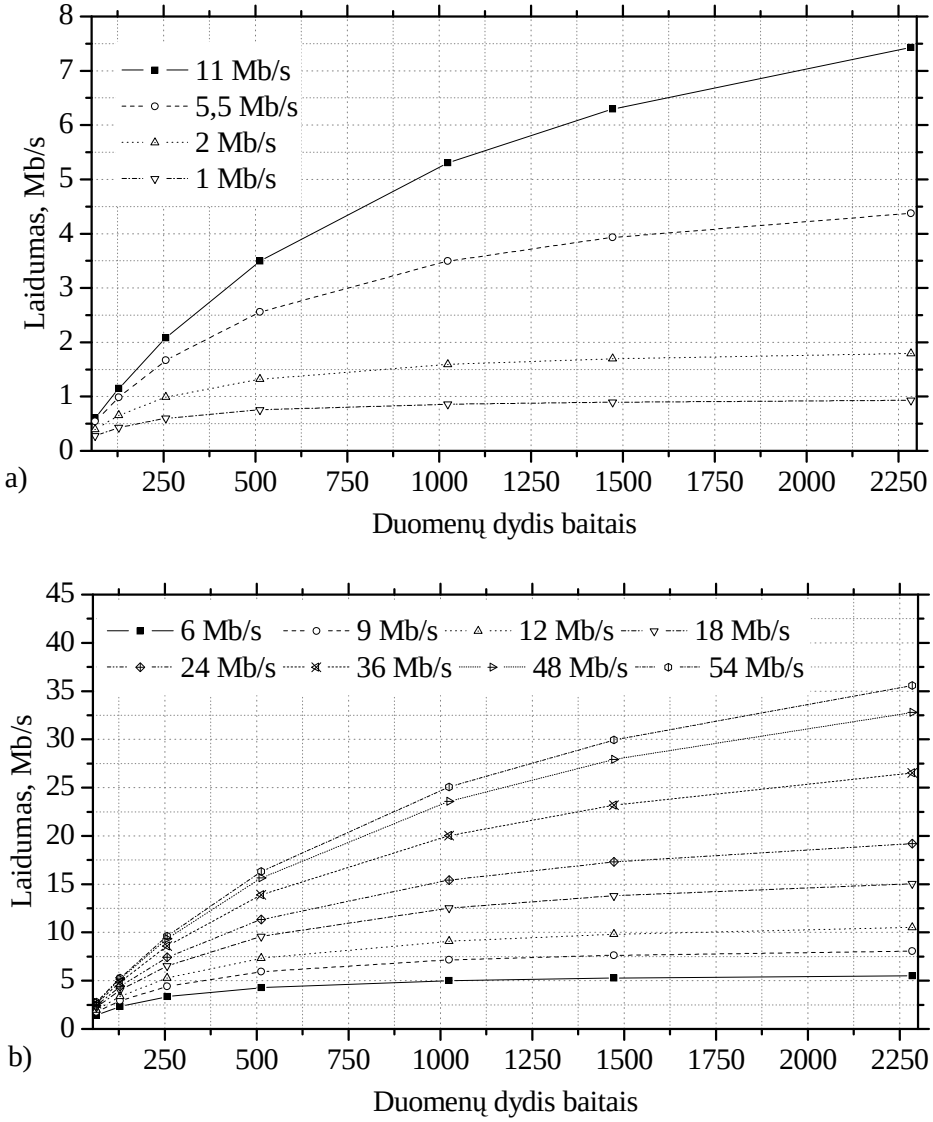
$$t_\Sigma = 2\tau + t_{SIFS} + t_{ACK} + t_{DIFS} + \overline{t}_{CW}, \tag{3.11}$$

čia τ – signalo sklidimo trukmė, vartotojų tinkluose $\tau \approx 1$μs, $\overline{t}_{CW}$ – vidutinis atgalinės atskaitos laikas (2.2).

Nustatant WLAN kanalo duomenų laidumą, analizuojamas vieno paketo perdavimo vienos krypties linija laikotarpis. Šiam rodikliui akivaizdžiai turi įtakos specifiniai CSMA/CA procesai: laukimo laikai SIFS, DIFS, CW ir ACK perdavimo laikas. Šiuos laiko intervalus būtina įvertinti, nes IEEE 802.11 standarte nenumatyta galimybė minėtus intervalus pašalinti arba kitaip keisti. Tuo tarpu nagrinėjant tokias linijas nėra atsižvelgiama į RTS/CTS paketų perdavimo laikus, nes šiame režime juos naudoti netikslinga. Skaitinė WLAN kanalo laidumo v_s vertė priklauso ne tik nuo naudojamos įrangos, bet ir nuo aukštesnių lygmenų protokolų (TCP ar UDP) bei perduodamų duomenų paketų dydžių. Vienakrypčio kanalo duomenų perdavimo spartos priklausomybė nuo perduodamų duomenų dydžio, kai IP ir UDP

[2] Kai maksimalus MPDU lauko dydis lygus 2312 baitams.

protokolai naudojami tinklo ir transportavimo lygmenyse, pateikiama 3.3 paveiksle. Akivaizdu, kad $v_s < v_f$. Kuo trumpesni perduodami duomenų paketai, tuo nelygybė $v_s < v_f$ „didesnė“.



3.3 pav. Vienakrypčio kanalo duomenų perdavimo spartos priklausomybė nuo perduodamų duomenų dydžio: a) IEEE 802.11b, b) IEEE 802.11a, g

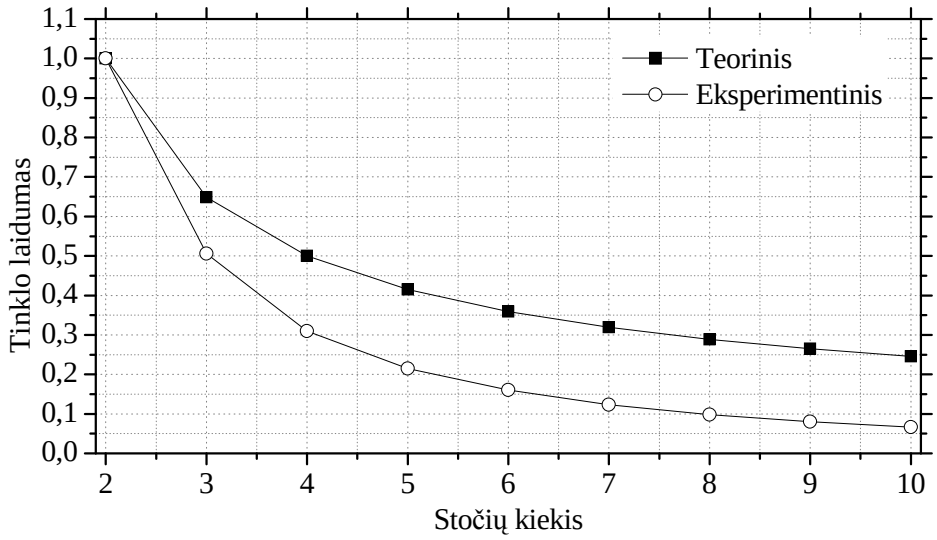
Nominali WLAN vienakrypčio kanalo perdavimų sparta išreiškiama taip pat **(**3.10) formule, įrašant į ją $t_{d\max}$ vietoj t_d. Čia $t_{d\max}$ – kadro duomenų laiko trukmė, perduodant didžiausio 2312 baitų ilgio paketą.

WLAN dvikrypčio kanalo laidumas. Jis skaičiuojamas padalinus laidumą į perdavimus aukštyn v_a ir žemyn $v_ž$:

$$v_s = v_a + v_ž \,. \tag{3.12}$$

Paprastai paketų perdavimo linijų apkrova skirtingomis kryptimis nebūna vienoda, todėl $v_a \neq v_ž$.

WLAN tinklo laidumas. Kai tinkle veikia n stočių, tai jos visos naudoja tą patį radijo kanalą, todėl joms tenka dalintis bendrą kanalo laidumą. Darbe [62], remiantis protokolo IEEE 802.11 modeliu, teoriškai nustatyta, kad bendras tinklo laidumas, didėjant stočių kiekiui, turėtų mažėti pagal dėsnį $v_s/\sqrt{n \lg n}$. Tuo tarpu realus laidumas priklauso nuo panaudojimo sąlygų: eksperimentiniu būdu [63], dirbtinai sukūrus didelį perduodamų duomenų srautą, gaunama kitokia bendro tinklo laidumo išraiška – $v_s/n^{1,68}$. Šias dvi priklausomybes iliustruoja 3.4 paveiksle.



3.4 pav. WLAN laidumo priklausomybė nuo tinklo stočių kiekio

Teoriniai ir eksperimentiniai bendro kanalo laidumo dalinimosi tyrimai [62, 63] atlikti tipinėmis ryšio sąlygomis, teigiant, kad stotys yra arti viena kitos, bei neįvertinant bangų sklidimo laikų ir klaidų perdavimo terpėje.

3.2.3 WLAN – masinio aptarnavimo sistema

Perdavimo procesas nagrinėjamas pradedant nuo sąlyginio laiko, kai $t_0 = 0$. Interpretuojant vietinį tinklą, kaip masinio aptarnavimo sistemą, dydis

$$T_u = t_{f1} - t_0 = \tau_\sigma + \tau_d \tag{3.13}$$

atitinka paketo (paraiškos) aptarnavimo laiką. Čia t_{f1} – paketo pristatymo stočiai laikas. Perduotinų paketų srauto intensyvumą pažymėjus λ (paketų per sekundę), sandauga

$$\lambda T_u = \Lambda \tag{3.14}$$

išreiškiamas dydis, kuris pagal analogiją su telefono ryšio teorija vadinamas apkrovos intensyvumu.

Analizuojant WLAN tipo tinklus, kuriuose naudojamas bendras kanalas, dydis Λ atspindi kanalo santykinį užimtumą arba, kitaip sakant, tinklo resurso išnaudojimą. Reikia atkreipti dėmesį į tai, kad WLAN atveju kadro aptarnavimo laikas didesnis už duomenų paketo trukmę dydžiu τ_σ. Pagal analogiją su išraiška (3.14) apkrovos intensyvumą galima taip pat išreikšti dviem komponentėmis:

$$\Lambda = \Lambda_\sigma + \Lambda_{DATA}. \tag{3.15}$$

IEEE 802.11 standarto tinklai be specifinių perkrovoms būdingų problemų veikia, kai $\Lambda < 1$. Ši sąlyga, įvertinant (3.15) formulę, užrašoma taip: $\Lambda_{DATA} < 1 - \Lambda\sigma$.

Kai paketą priėmusi stotis S_1 turi persiųsti jį tolimesnei stočiai S_2, tai ji gali daryti tik pilnai užbaigusi priėmimo ciklą, tai yra laiko momentu t_f. Manant, kad kanalas vėl laisvas, tai paketo retransliavimo ciklas užtrunka tiek pat, kiek užtrunka jo perdavimas artimiausiai stočiai. Vadinasi į antrąją (pagal maršruto kryptį) stotį paketas patenka laiko momentu:

$$t_{f2} = t_{f1} + \tau_\sigma + \tau_{d2}. \tag{3.16}$$

Įvertinus tai, kad stotys gali perdavinėti signalus skirtinga sparta, (3.16) formulėje duomenų trukmė pažymėta τ_{d2}. Sujungus (3.13) ir (3.16) formules, gaunama:

$$t_{f2} = t_0 + 2\tau_\sigma + \tau_{d1} + \tau_{d2}. \tag{3.17}$$

Kai paketas grandine retransliuojamas dar toliau – iki n–osios stoties, tai jis tą stotį geriausiu atveju (kai visų retransliavimų metu kanalas buvo laisvas) pasiekia laiko momentu:

$$t_{fn} = t_0 + n\tau_\sigma + \sum_{n=1}^{n} \tau_{dn} \ . \tag{3.18}$$

Perduodant paketą per n stočių grandinę, vėlinimo laikas išreiškiamas taip pat (3.18) formule, kurioje t_0 belieka prilyginti 0. Taip nustatomas minimalus paketo vėlinimo laikas, kai kanalas visais persiuntimo momentais laisvas. Jeigu bet kurioje retransliavimų grandyje

kanalas būna užimtas, tai perdavimo laikas atitinkamai didėja tiek, kiek paketui tenka papildomai laukti.

Pritaikius neribotos aptarnavimo sistemos modelį (vienu metu bandančių siųsti stočių kiekio k tikimybės aprašomos Puasono skirstiniu), tikimybė, kad duotuoju momentu duomenis ketina siųsti daugiau negu viena stotis, išreiškiama formule:

$$p_{\Sigma} = 1 - p_0 - p_1 = 1 - (1+\Lambda)e^{-\Lambda}. \quad (3.19)$$

Leistinos apkrovos intensyvumo reikšmės nėra didelės. Pavyzdžiui, kai $\Lambda < 0{,}67$, tai $p_{\Sigma} < 0{,}14$. Perduodant duomenis per stočių grandinę, tikimybė, kad bent vienoje stotyje teks laukti (praleisti kitą paketą, kitą seką), skaičiuojama kaip laukimo atskirose stotyse tikimybių suma.

3.3 Eksperimentiniai IEEE 802.11b įrenginių tyrimai

Siekiant nustatyti IEEE 802.11 standarto įrangos stabilumą, kokybės rodiklius įvairiose Lietuvos vietovėse ir apskritai tinkamumą realių vartotojų tinklų kūrimui, buvo atlikta eksperimentų serija. Eksperimentų tikslai:

1. ištirti įrenginių duomenų perdavimo spartos charakteristikas: perdavimo spartą, jos priklausomybę nuo naudojamo dažnių diapazono bei stočių skaičiaus;
2. išsiaiškinti WLAN radijo kanalų savitarpio efektus, jų įtaką įrangos darbui;
3. išnagrinėti klaidų priklausomybę nuo paketų dydžių, signalo/triukšmo.

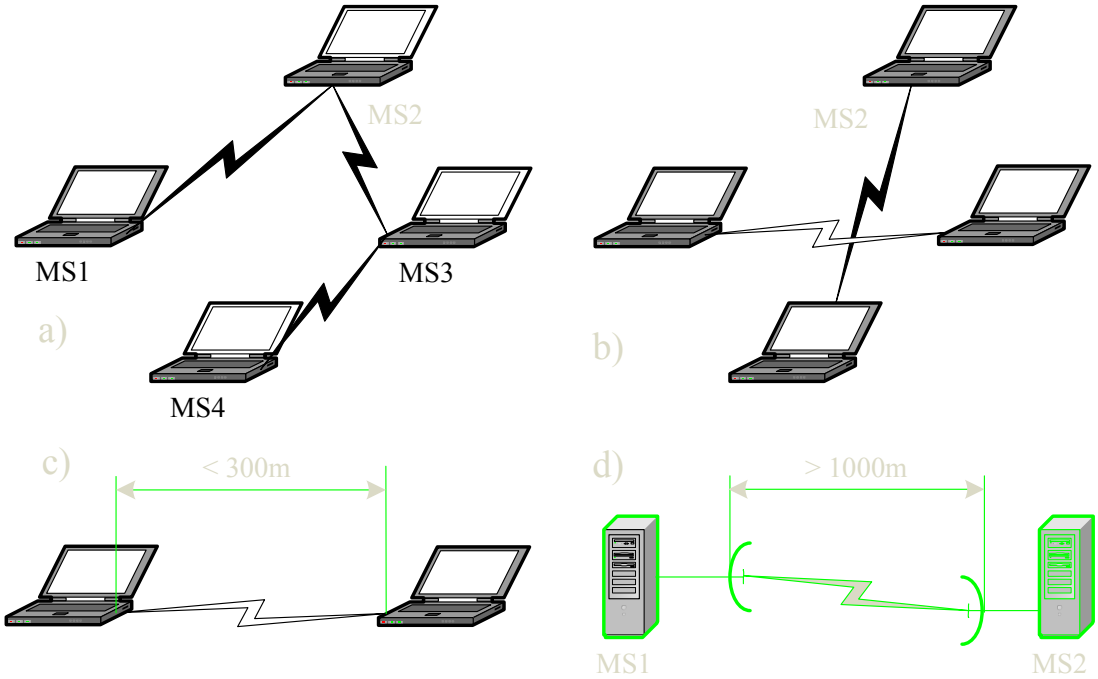
3.3.1 Eksperimentų metodika

Eksperimentams pasirinktos keturios tinklo struktūros, geriausiai atspindinčios realias vartotojų tinklų situacijas. Pirmoji schema, pavaizduota 3.5. pav., a) – tai labiausiai tikėtina vartotojų tinklo struktūra, kai stotys tarpusavyje sujungtos radijo kanalais, veikiančiais tame pačiame radijo dažnio ruože. Šios schemos pagrindu ištirta perdavimo sparta tarp dviejų (MS1 ir MS4) tinklo stočių ir spartos priklausomybė nuo tarpinių stočių skaičiaus.

Kanalų tarpusavio įtakai nustatyti pasirinktos dviejų vienas nuo kito nepriklausomų tinklų „taškas – taškas“ (*angl. point to point)* kanalų sistemos (3.5 paveikslas, b). Tokia situacija būdinga ne vien vartotojų tinkluose, bet ir standartiniuose IEEE 802.11b WLAN tinkluose. Šiuo eksperimentu norėta išsiaiškinti, kokiam minimaliam dažnių skirtumui tarp dviejų gretimų radijo dažnio kanalų esant yra pastebimas perdavimo spartos mažėjimas.

Trečioji eksperimentuose naudota schema sudaryta siekiant išsiaiškinti spartos priklausomybę nuo radijo dažnio kanalo. Tam tikslui panaudotos dvi tinklo stotys, sujungtos

„taškas – taškas“ topologija (3.5 paveikslas, c). Remiantis ta pačia schema, bet skaičiuojant didesniais (>1000m) atstumais (3.5 paveikslas, d), buvo tiriama paketų praradimo priklausomybė nuo paketo dydžio, signalo/triukšmo santykio bei stebimi signalo ir triukšmo lygio pokyčiai ilgu laiko periodu.



3.5 pav. Eksperimentuose naudoti stočių jungimų variantai

Eksperimentams naudoti Orinoco WLAN PCMCIA radijo modemai PC24E–H–ET, atitinkantys 802.11b standartą. Jie per sąsają PCI–PCMCIA buvo prijungti prie personalinių kompiuterių su 600MHz spartos Intel Celeron procesoriumi, 64MB operatyviąja atmintimi bei CompactFlash tipo 32 MB standžiuoju disku. Modemuose buvo išjungtos WEP ir RTS/CTS funkcijos. Tinklo stotyse naudota Linux operacinė sistema su 2.4.17 branduoliu bei orinoco_cs WLAN GPL ORINOCO radijo modemų tvarkyklėmis [64]. Radijo modemų charakteristikos pateikiamos 3.2 lentelėje.

Spartos matavimui naudota `ttcp` programa [65], skirta nustatyti UDP ir TCP paketų laidumą tarp dviejų tinklo įrenginių [66]. Patikrai laidumas buvo išmatuotas `Netperf` programa [67]. Rezultatų skirtumas buvo nežymus ir sudarė vos 5%. Paketų dingimai užfiksuoti siunčiant ICMP Echo–request ir ICMP Echo–replay paketus, kuriuos generuoja standartinė komanda `ping`.

Signalo ir triukšmo įverčiams bei radijo modemų konfigūracijai nustatyti panaudotos paketo Wireless Tools WLAN tvarkyklių programos [68].

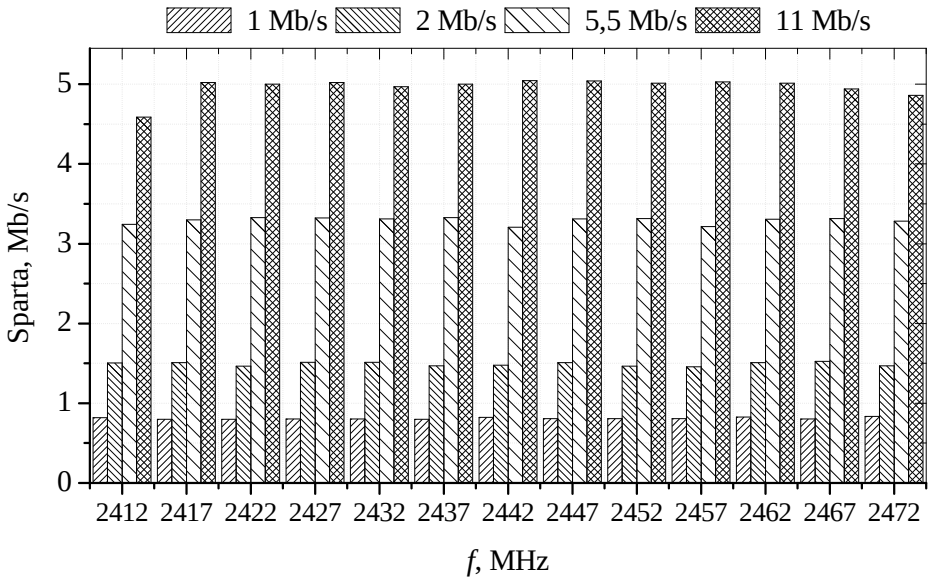
3.2 lentelė. ORINOCO PC Card Silver (PC24E–H–ET) specifikacija

Parametras	Reikšmė
Suderinamumas	IEEE 802.11b, WiFi
Susijungimo protokolas	CSMA/CA su ACK
Naudojamų dažnių juosta	2,4 GHz (2400–2500 MHz)
Galimų kanalų skaičius	13
Moduliacijos	DSSS
Spektro skleidimas	11 bitų Barkerio kodu
Siųstuvo nominali galia	15 dBm
Klaidingų bitų tankis (BER)	Geriau nei 10^{-5}

3.3.2 Perdavimo sparta

Analizuojant spartos priklausomybę nuo dažnio pagal 3.5 pav. c) schemą, buvo keičiamas darbinis dažnis ir su `ttcp` programa fiksuojama kanalo sparta.

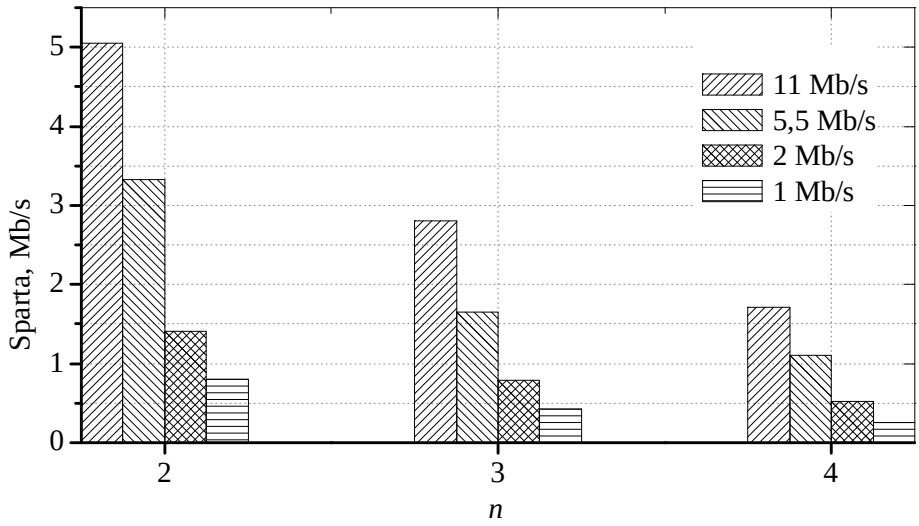
Nustatyta, kad perdavimo sparta tiesiogiai nepriklauso nuo naudojamo radijo dažnio kanalo. Dėl 802.11b standarto ypatybės paketo preambulę ir antraštę visuomet siųsti mažesne sparta (2.14 pav.) bei dėl šio standarto didelės paketo perteklinės informacijos perdavimo sparta yra mažesnė nei reglamentuojama. Taip teigia ir įrangos gamintojai [69]. Gautame grafike (3.6 pav.) 2412 MHz dažnio ruože 11 Mb/s režime matomas spartos sumažėjimas atsirado dėl eksperimentams pasirinktos vietovės, kurioje tuo pačiu metu tuo pačiu dažniu dirbo ir kita įranga. Gauti rezultatai yra panašūs į publikuotus [70 – 73], kurie yra gauti taikant kitokią įrangą.



3.6 pav. Perdavimo spartos priklausomybė nuo dažnio *f*

Vartotojų tinkluose dažnai susidaro situacija, kai tarp dviejų tinklo stočių atsiradusios tarpinės stotys pradeda dirbti kaip retransliatoriai, todėl svarbu išsiaiškinti realią perdavimo spartos priklausomybę nuo didėjančio nuosekliai sujungtų stočių skaičiaus (3.5 paveikslas, b.).

Pagal literatūroje [A3], [62, 63] pateiktus teorinius laidumo skaičiavimus buvo atlikti praktiniai tyrimai, kurių metu ne didesniu kaip 100 metrų atstumu stočių skaičius grandinėje buvo didinamas nuo 2 iki 4. Kaip ir buvo galima tikėtis, perdavimo sparta mažėja dėsniu, artimu 1/(n–1), kur n – stočių skaičius (3.7 paveikslas). Taip atsitinka todėl, kad duomenų siuntimas ir priėmimas vyksta tuo pačiu kanalu. Dėl to stotis pirma turi priimti visą tinklo paketą, tik po to jį išsiųsti kitai stočiai.



3.7 pav. Perdavimo spartos priklausomybė nuo stočių skaičiaus n

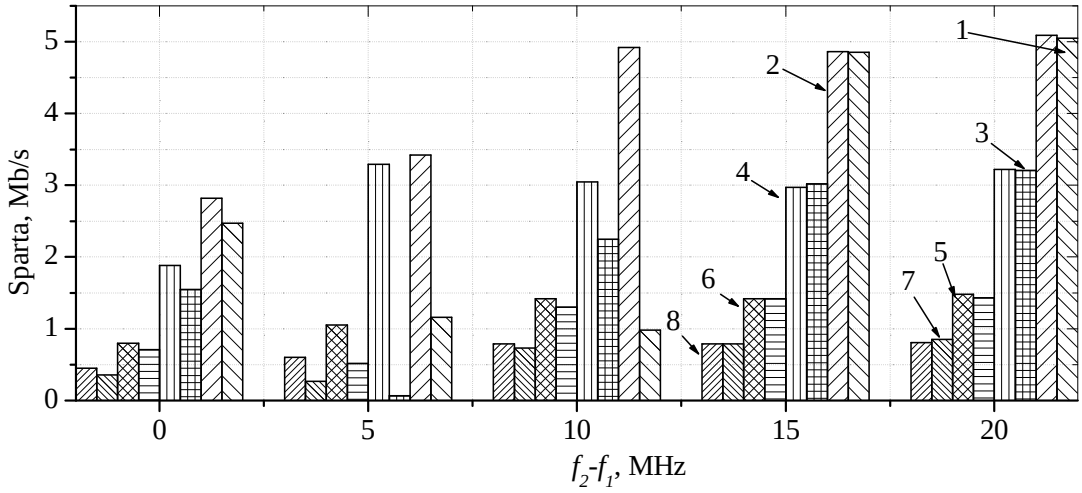
3.3.3 WLAN radijo kanalų savitarpio efektai

Trečiuoju eksperimentu siekta išsiaiškinti laidumo priklausomybę nuo minimalaus atstumo tarp kanalų. IEEE 802.11b standarte rekomenduojama vienoje WLAN tinklo veikimo zonoje naudoti ne daugiau kaip tris skirtingus kanalus, tarp kurių centrinių dažnių būtų ne mažesnė kaip 25 MHz dažnių juosta [11].

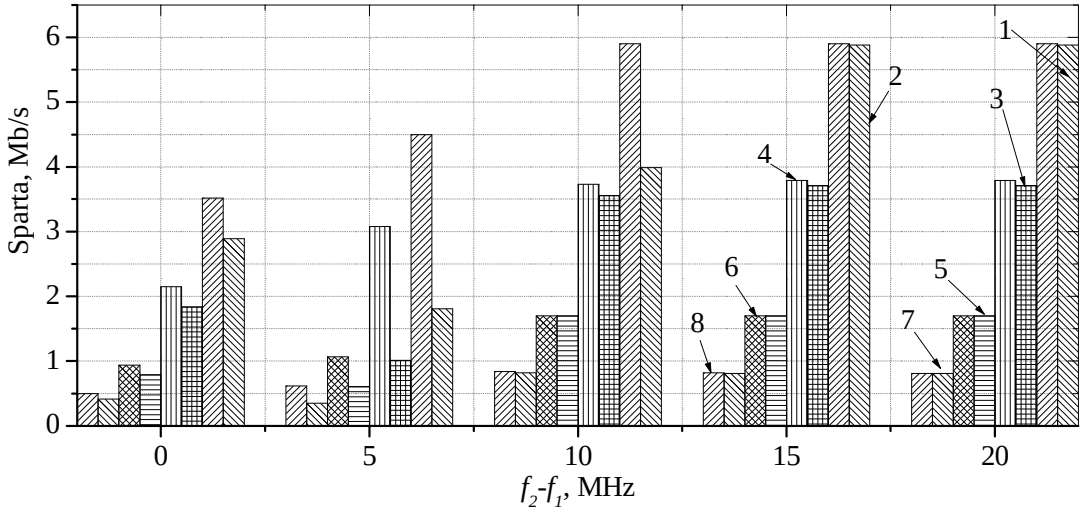
Atlikus eksperimentą pagal 3.5 pav., b schemą, kurio metu keistas veikiančių stočių porų dažnių skirtumas ir matuojamas laidumas, nustatyta, kad, esant mažiems atstumams tarp stočių, naudojamų kanalų centriniai dažniai gali būti nutolę mažiau nei 15 MHz (3.8 ir 3.9 paveikslai). Kaip ir reikėjo tikėtis, rezultatų kreivių pobūdis vienodas atlikus eksperimentus ir su TCP, ir su UDP protokolų paketais. Tai reiškia, kad, kai centrinių dažnių skirtumas yra mažesnis nei reglamentuojama standarte, naudojamo protokolo specifika nedaro įtakos perdavimo spartai.

Kai kanalų skirtumas mažesnis nei 10 MHz, tačiau nėra lygus nuliui, viena iš porų triukšmo negali išskirti iš šalia dirbančios poros signalo. Tai sukuria papildomus trukdžius, kurie sąlygoja signalo/triukšmo santykio sumažėjimą ir atitinkamai kanalo spartos mažėjimą.

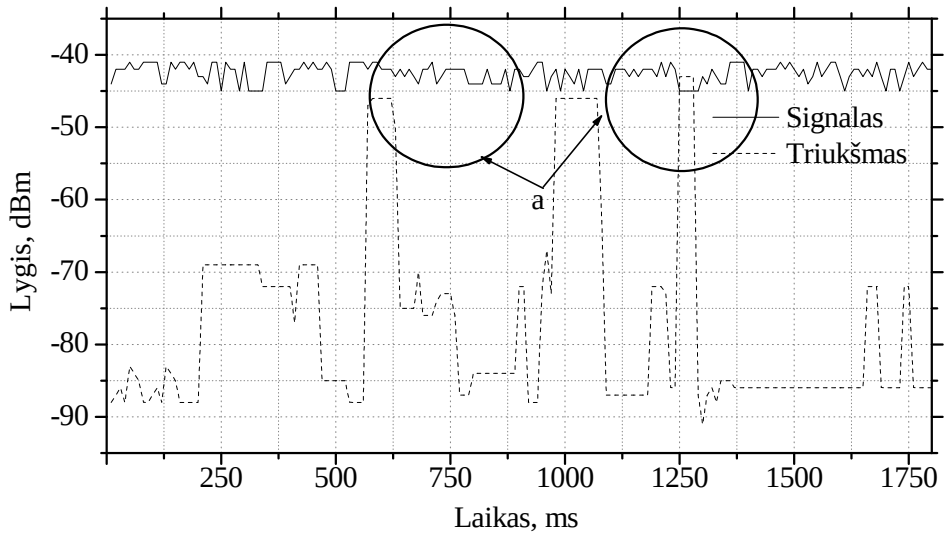
Abiem poroms dirbant tuo pačiu dažniu, toks ryškus perdavimo spartos sumažėjimas nepastebimas, nes kiekviena iš stočių „girdi“ kitas stotis, kurios bendrai dalijasi tinklo resursais (žr. į 2.3.3.2 skyrių). Šį teiginį patvirtina 3.10 paveikslas, kuriame pavaizduotos signalo ir triukšmo matavimų kreivės, kai dažnių skirtumas lygus 5 MHz. Apibrauktose grafiko dalyse (a) pastebimas ryškus triukšmo padidėjimas, nes tuo metu kitos dvi stotys pradeda perdavinėti informaciją. Triukšmo įverčių šuolius (ne ištisinės linijos) lėmė triukšmo matavimo metodikos diskretiškumas.



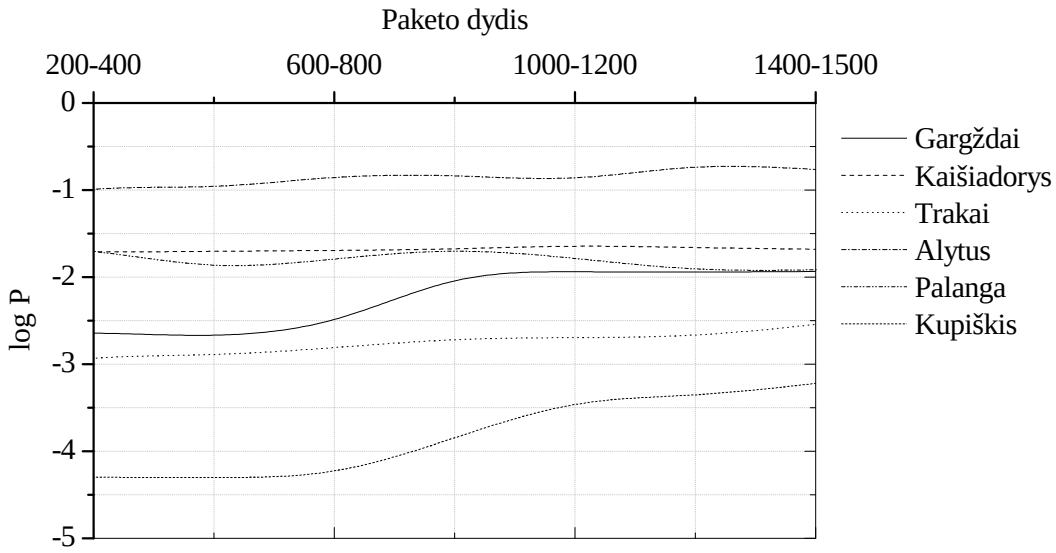
3.8 pav. Informacijos, perduodamos TCP protokolu, spartos priklausomybė nuo kanalų dažnio skirtumo $f_2 - f_1$: 1, 2 – 11 Mb/s; 3, 4 – 5,5 Mb/s; 5, 6 – 2 Mb/s; 7, 8 – 1 Mb/s poros



3.9 pav. Informacijos, perduodamos UDP protokolu, spartos priklausomybė nuo kanalų dažnio skirtumo $f_2 - f_1$: 1, 2 – 11 Mb/s; 3, 4 – 5,5 Mb/s; 5, 6 – 2 Mb/s; 7, 8 – 1 Mb/s poros



3.10 pav. Signalo ir triukšmo pokyčiai; a – triukšmo padidėjimas



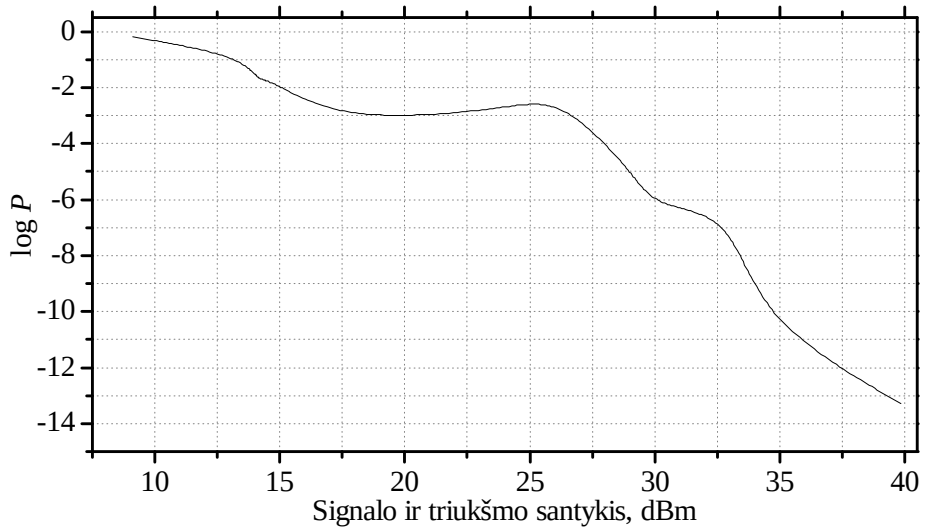
3.11 pav. Paketų praradimo priklausomybė nuo paketo dydžio

3.3.4 Klaidų pasirodymo priklausomybė

Balso perdavimui WLAN tinklais reikalinga mažai kintanti perdavimo sparta bei mažas prarandamų paketų skaičius. Šio darbo metu atlikta keletas eksperimentų, kurių tikslas – nustatyti paketų dingimą, esant dideliems perdavimo atstumams. Eksperimentai buvo atlikti LITNET tinklo radijo ryšio kanaluose pagal 3.5 pav., d schemą skirtingose Lietuvos Respublikos vietovėse.

Iš 3.11 pav. matyti, kad prarandamų paketų skaičius nepriklauso nuo paketų dydžio, nors kitų tyrinėtojų darbuose ši priklausomybė yra akcentuojama. Tai galima paaiškinti tuo, kad šio darbo matavimuose dalyvavo nedaug stočių, o atstumas buvo keičiamas pasirenkant kitą vietovę. Matavimuose, kuriuose ši priklausomybė egzistuoja, atstumas buvo keičiamas

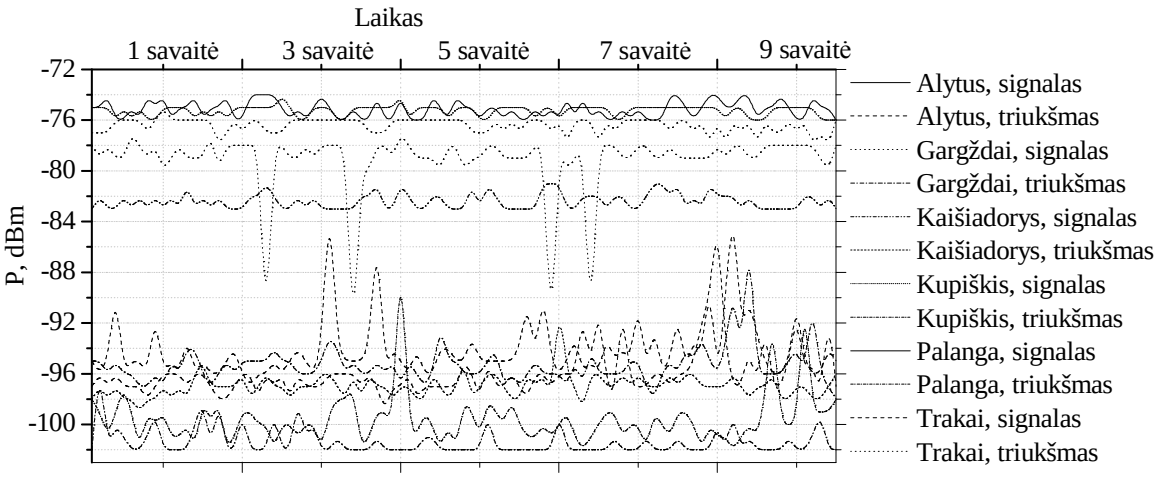
dirbtinai, t. y. priartinat arba nutolinat vieną stotį nuo kitos. Matomi šuoliai atsirado dėl kanalų apkrovimo bei todėl, kad kanalo rezervavimo funkcija modemuose buvo išjungta. Tokiu atveju dėl iš kitų stočių į tą pačią anteną ateinančių signalų, keliančių aukštą triukšmo lygį, veikimo didesni nei 1000 baitų paketai gali būti prarandami, nes prarandamų paketų skaičius priklauso nuo signalo/triukšmo santykio (3.12 paveikslas). Kai signalo/triukšmo santykis yra mažesnis nei 10 dBm, dėl labai didelio paketų praradimo ryšys praktiškai negalimas.



3.12 pav. Paketo praradimo priklausomybė nuo signalo ir triukšmo santykio

3.3.5 Signalo ir triukšmo lygio matavimas per ilgą laiko periodą

IEEE 802.11b naudojamų kanalų stabilumui nustatyti įvairiuose Lietuvos vietovėse buvo atlikti ekspermentai, kurių metu 2001 - 2002 metų žiemą daugiau nei du mėnesius buvo matuojami signalo ir triukšmo lygiai. Eksperimentai atlikti naudojant LITNET radijo ryšio kanalais jungiančiais rajonuose esančias viešąsias bibliotekas su internet tinklu. Trumpiausias duomenų kanalo ilgis Alytuje neviršija 1 km, ilgiausias Gargždžuose siekia apie 32 km. Matavimo rezultatai pateikiami 3.13 paveiksle. Iš šio grafiko matyti, kad signalo ir triukšmo lygiai, laikui bėgant, vidutiniškai kinta nežymiai. Dėl šios priežasties paketų praradimai bei ryšio kokybė gali kisti taip pat nežymiai. Gautame grafike matomi staigūs signalo lygio sumažėjimai bei triukšmo padidėjimai siejami su tinklo konfigūravimo arba įrangos gedimo atvejais. Panašūs rezultatai yra gauti vokiečių mokslininkų [73], kurie industrinėje aplinkoje tyrinėjo 802.11 standartą. Iš gautų rezultatų matyti, kad kuriant VPT mieste gali kilti sunkumų, bet tai nėra neįmanoma.



3.13 pav. Signalo ir triukšmo lygiai ilgame laiko periode

3.4 Skyriaus išvados

1. Šiame skyriuje formuluojami išskirtiniai vartotojų prieigų tinklų požymiai;
2. išanalizavus kitų šalių patirtį bei vietinius precedentus, apibrėžiamos Lietuvos telekomunikacijų raidai aktualios WLAN taikymo sritys;
3. šiuo metu aktuali tema – radijo ryšio įrenginių savybių tyrimas ir jų potencialių galimybių taikant vartotojų tinkluose nustatymas;
4. atlikus WLAN charakteristikų analizę, galima daryti tokias išvadas:
   a) dauguma paplitusių vertinimo metodikų tiria potencialias galimybes. Pavyzdžiui, tinklo laidumas parodo, kiek bitų galima perduoti priklausomai nuo tinklo topologijos ar stočių skaičiaus,
   b) baziniai rodikliai: laidumas bei talpa priklauso nuo tinklo topologijos, sąveikos protokolo ir perduodamų duomenų paketo dydžio. Minėtos sąlygos neatitinka šiame darbe nagrinėjamų tipinių vartotojų tinklų sąlygų,
   c) perduodant duomenis per stočių grandines, kokybiško ryšio galima tikėtis tik tuo atveju, kai bendra tinklo apkrova santykinai maža, t. y. žymiai mažesnė už naudojamo kanalo laidumą.
5. atlikus eksperimentinius IEEE 802.11b tinklo tyrimus, galima teigti, kad:
   a) perdavimo sparta priklauso ne nuo pasirinkto dažnio, o nuo atstumo tarp gretimų kanalų,
   b) esant mažiems atstumams ir kai naudojamų dažnių skirtumas sumažėja iki 15 MHz, potinkliai sukuria pastebimus tarpusavio trukdžius,

c) esant dideliems atstumams tarpusavio trukdžiai atsiranda, kai dažnių skirtumas tampa mažesnis nei 25 MHz,
d) paketų praradimo dažnis nepriklauso nuo kadro dydžio, o priklauso nuo signalo/triukšmo santykio,
e) esant dideliems atstumams, signalo ir triukšmo lygiai Lietuvos sąlygomis vidutiniškai yra pastovūs. Vadinasi, vartotojų tinklai WLAN IEEE 802.11b pagrindu turėtų veikti stabiliai.

4. BALSO IR DUOMENŲ PERDAVIMAS VARTOTOJŲ PRIEIGŲ TINKLAIS

Vartotojų prieigų tinkluose naudojant TCP/IP protokolų šeimą perduodami duomenys ir balso signalai. Siekiant nustatyti vartotojų tinklų potencialias galimybes, šiame skyriuje nagrinėjami balso ir duomenų šaltinių modeliai. Šio skyriaus svarbiausi rezultatai skelbiami [A6–A8].

4.1 Duomenų perdavimo vartotojų tinklais ypatumai

4.1.1 Eksperimentiniai duomenų perdavimo tyrimai

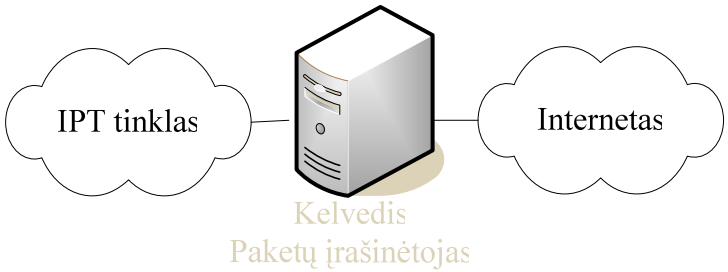
Tiriant bet kokio tinklo charakteristikas ar imituojant tinklą matematiniais metodais, būtina turėti tinklu perduodamų duomenų srautų modelius. Tuo tikslu vykdomi eksperimentiniai duomenų perdavimo tinklų tyrimai, sudaromi jų teoriniai modeliai. Pirmieji eksperimentai atlikti dar 7–tojo dešimtmečio pabaigoje [74]. Internetu perduodamų duomenų srautų analizė, metodika bei rezultatai yra pateikiami darbuose [75 – 81], tačiau visuose minėtuose darbuose tyrimai atlikti analizuojant kamieninių (*angl. backbone*) kanalų srautus. Mažų vartotojų grupių srautų tyrimų nėra daug [82], o Lietuvos interneto srauto tyrimų rezultatų moksliniuose straipsniuose apskirtai nepavyko aptikti. Todėl šiame darbe eksperimentiškai tiriami VPT būdingų mažų vartotojų grupių sukurti interneto duomenų srautai, adaptuojamas teorinis modelis ir nustatomi modelio parametrai.

Matavimai buvo vykdomi pagal pasyvią matavimo schemą [A6], [83]:

1. 2000 metais sausio mėnesį Litnet tinklo punkte (vartotojų skaičius apie 50, surinktų paketų skaičius ~ $0{,}5\times10^6$.),
2. 2003 lapkričio – 2004 sausio mėnesiais vienoje Lietuvos interneto paslaugų teikimo (IPT) firmos tinkle (vartotojų skaičius apie 250, paketų skaičius ~ 198×10^6**)**.

Eksperimentams (4.1 pav.) naudotas asmeninis kompiuteris (AK), su įdiegta Linux operacijų sistema. Šis AK vykdė ir pagrindinio kelvedžio funkciją. Kiekvienos valandos pradžioje pirmieji 250000 paketų, keliaujančių per tinklines sąsajas, šiame kompiuteryje buvo registruojami su `ethereal` [84] programa ir įrašomi į kompiuterio standųjį diską. Taip buvo gautas pradinis 17 GB duomenų masyvas, pagal kurį buvo apskaičiuojamos laiko intervalų tarp gretimų paketų trukmės, išrenkami perduodamų paketų dydžiai bei naudojami prievadų (*angl. port)* numeriai. Šią informaciją išanalizuoja specialiai šiam tikslui sukurta statistinio apdorojimo programa `traffstat`, kurios išeities tekstas pateikiamas 1 priede.

Vykdant eksperimentus buvo tiriami visi kanalu perduodami paketai: vartotojų sukurti naudojant elektroninį paštą, naršant žiniatinklyje (*angl. WWW*) ir t.t. bei sisteminiai, tinklą aptarnaujančios programinės įrangos generuojami (ICMP, SNMP) paketai.



4.1 pav. Eksperimento schema

Eksperimentais buvo siekiama nustatyti:

1. informacinių duomenų ir programų sukurtų paketų dydžių pasiskirstymus;
2. intervalų tarp paketų trukmių pasiskirstymus laiko ašyje;
3. duomenų masyvų pasiskirstymus pagal taikomąsias programas.

Pagrindinių interneto naudojamų programų sukuriamų srautų pasiskirstymas IPT tinkle pateikiamas 4.2 paveiksle. Programų srautai konkrečiai kategorijai buvo priskiriami pagal prievado numerį (4.1 lentelė).

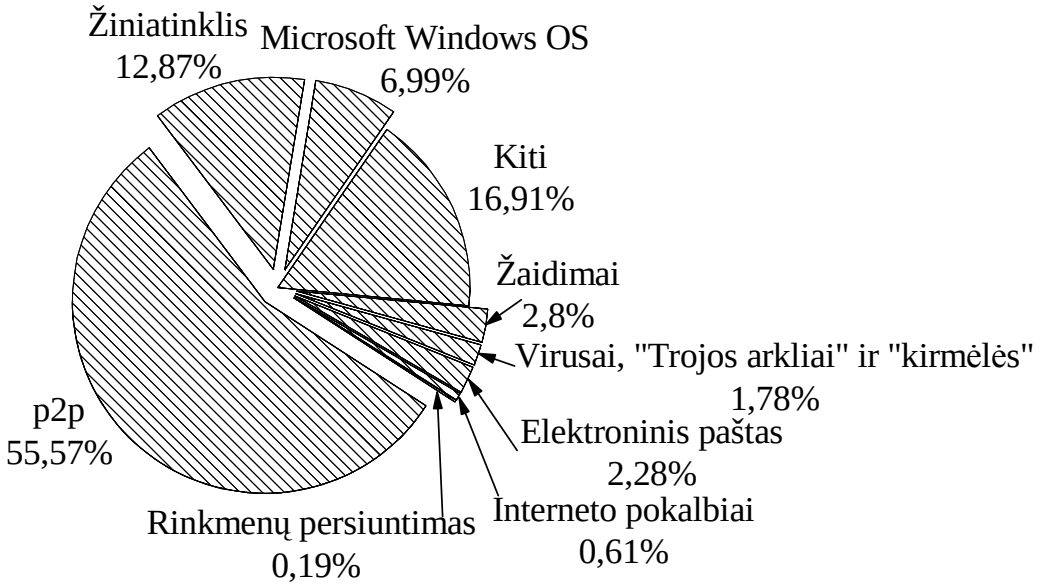
4.1 lentelė. Konkrečios programų kategorijos prievadų numerių sąrašas

Srautas	Prievadų numeriai[3]
Žiniatinklis	80, 443
p2p	1214, 2234, 3531, 3662, 4660 – 4672, 4682, 4762, 5662, 6257, 6662, 6699, 6881 – 6889, 6346
Žaidimai	3783, 6112, 27005, 27015, 27016, 27025, 27030, 27900, 27901, 27910, 28900, 29900, 47624
Microsoft Windows OS	135, 137, 139, 445
Interneto pokalbiai	4000, 5190, 6667
Virusai, „Trojos arkliai“ ir „kirmėlės“	1033, 1054, 1863, 4242, 5555, 5556, 7000, 7777, 8301, 8888
Elektroninis paštas	25, 110, 143, 993, 994
Rinkmenų persiuntimas	20, 21

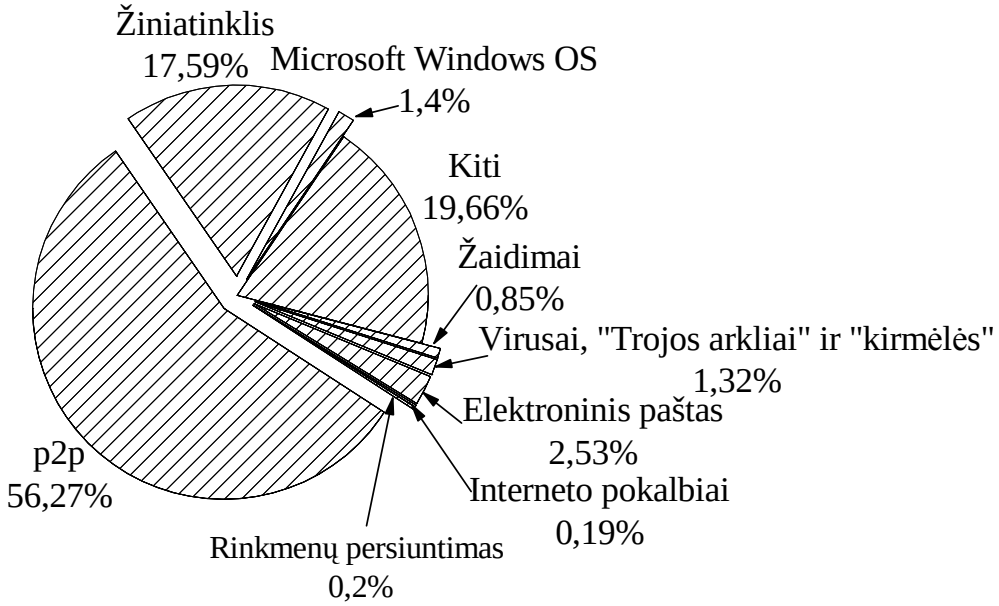
Iš grafiko matyti, kad pagrindinę srauto dalį užima lygus - lygiam (*angl. peer-to-peer* – p2p) srautas. p2p – tai technologija, leidžianti vartotojams ieškoti bei apsikeisti duomenimis tarpusavyje be jokios papildomos infrastruktūros, t. y. p2p yra autonomiškas decentralizuotas tinklas. Kaip rodo praktika, šiuo metu pasaulyje p2p srautas sudaro iki 70 % visų IPT

[3] Šioje lentelėje pateikti tik tie prievadų numeriai, kurie buvo aptikti ir identifikuoti eksperimentiškai tirtame tinkle. Tai nėra kiekvienos kategorijos pilnas prievadų sąrašas

kamieniniais kanalais perduodamo duomenų srauto [85]. Pagrindinės p2p programos yra „gnutella” [86], „kazaa” [87] ir „eDonkey“ [88]. Iš 3.2 pav. lentelės matyti, kad pagal baitų kiekį santykis yra šiek tiek kitoks, kai kurių programų kategorijų (Microsoft Windows OS, žaidimai, interneto pokalbiai) generuojamų baitų skaičius santykinai mažesnis nei generuojamų paketų skaičius. Tai rodo, kad šios programos generuoja daug mažų paketų. Verta atkreipti dėmesį į didelį virusų ir kitų nepageidaujamų programų generuojamo srauto dydį. Tai leidžia teigti, kad šiuo metu saugumo problematika internete yra ypač aktuali.



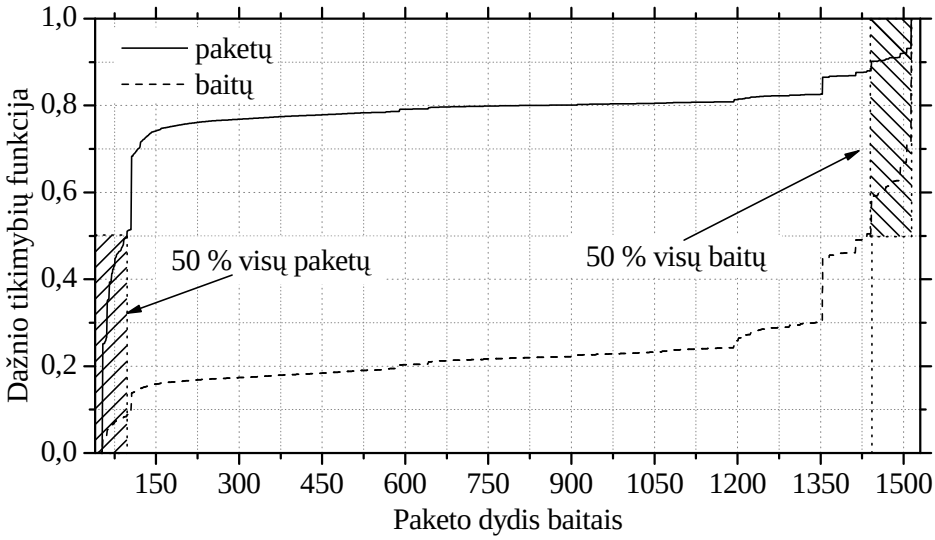
a)



b)

4.2 pav. Tirto tinklo programų sukuriamų srautų pasiskirstymas: a) pagal paketų kiekį, b) pagal baitų kiekį

Paketų dydžių dažnio tikimybių funkcija pateikiama 4.3 paveiksle. Iš paveikslo matyti, kad paketai, kurių dydis buvo iki 97 baitų, sudaro 50 % viso paketų srauto, tuo tarpu 50 % visų perduodamų duomenų kiekio perduoda paketai, kurių dydis yra nuo 1434 iki 1514 baitų. Tuo tarpu literatūroje [75], [81] pateikiamų paketų dydžių struktūra skiriasi nuo pateiktų 4.3 pav. tuo, kad sraute paketų nėra daug, kurių dydis yra apie 500–600 baitų. Šis skirtumas yra paaiškinamas tuo, kad darbai buvo atlikti 1994–1997 metais, kai pagrindinius duomenų srautus sudarė žiniatinklio, pašto bei naujienų grupių programos, o p2p, žaidimų, inertnetinių virusų tipo technologijos buvo nepaplitusios arba tik kūrimo stadijoje. Šią hipotezę įrodo 4.4 pav., kuriame yra pateikiami visų programų (pagal 4.1 lentelę) paketų dydžių pasiskirstymo grafikai, iš kurių matosi, kad duomenų srauto daugumą sudaro maži ir-arba dideli paketai, tuo tarpu vidutinio dydžio paketai ženklūs tik žiniatinklio sraute.



4.3 pav. Paketų dydžių pasiskirstymas

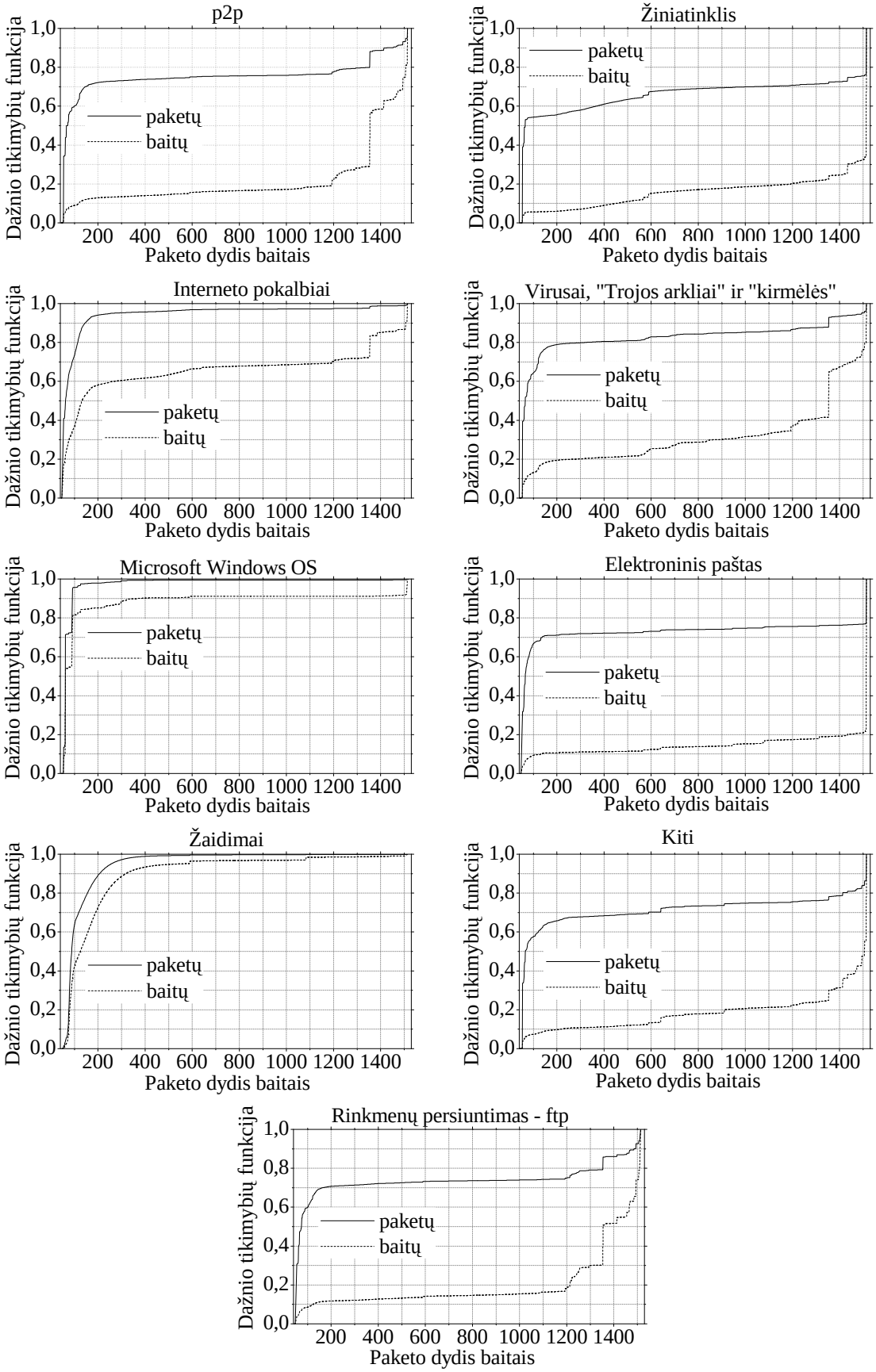
4.1.2 Duomenų šaltiniai ir jų modeliai

Šiuo metu yra žinoma keletas duomenų srautų modelių. Dažniausia taikomi šie: Puasono, „paketų traukinio“ (*angl. packet train*) ir automodelis (*angl. self similar*) modeliai.

Puasono modelis. Šis modelis nuolat naudojamas telefono tinklų srautams aprašyti. Pagal Puasono dėsnį paketai sukuriami nepriklausomais laiko intervalais. Paketų pasirodymo tikimybių tankio funkcija yra:

$$p(t) = 1 - \lambda e^{(-\lambda t)}, \tag{4.1}$$

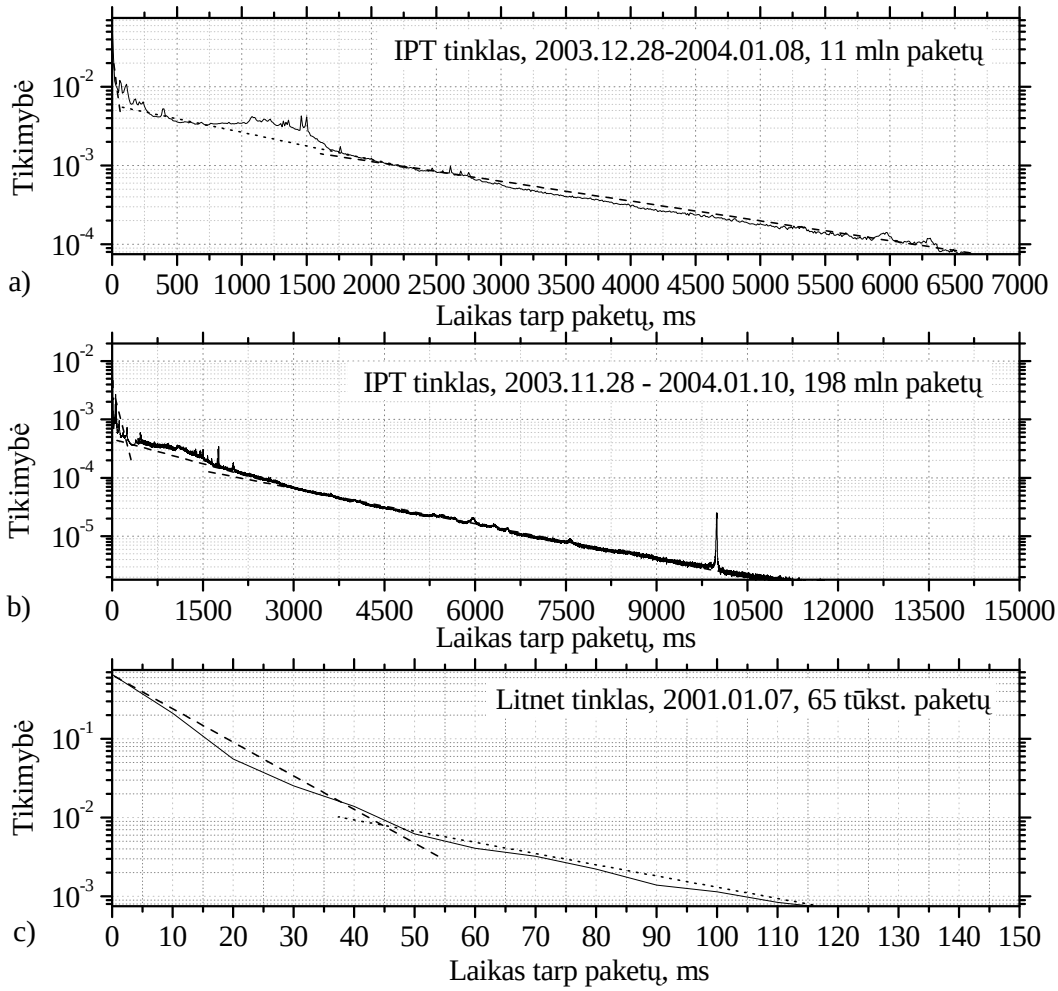
čia λ – vidutinis paketų srauto intensyvumas.



4.4 pav. Įvairių programų generuojamų srautų paketų dydžių pasiskirstymai

Be to, paketų kiekio per užduotą laiko tarpą priklausomybė nuo laiko logaritminiame mastelyje išreiškiama tiese. Ši savybė naudojama tikrinant modelio tinkamumą konkretiems taikymams.

Puasono modelis ilgą laiką buvo populiariausias [89, 90]. Vėliau darbuose [78], [91, 92] prieita išvados, kad Puasono modelis tinkluose perduodamų duomenų srautus aprašo netiksliai, nes neįvertina šiems tinklams būdingų pliūpsnių. Puasono modelis paketais operuoja kaip nepriklausomais objektais. Jis negali įvertinti paketų siuntėjo ir gavėjo adresų įtakos, tai yra tos aplinkybės, kad internete neretai tarp tų pačių mazgų perduodamos paketų serijos. Interneto srauto sproginėjančiam pobūdžiui įvertinti sukurtas jungtinis Puasono (*angl. Compound Poisson Arrivals*) modelis [93], pagal kurį srautas dalinamas į mažesnes vienodo dydžio tiriamas grupes. Tačiau net ir tokiu atveju, kaip rodo tyrimai [92], Interneto srautas tik iš dalies paklūsta Puasono skirstiniui.



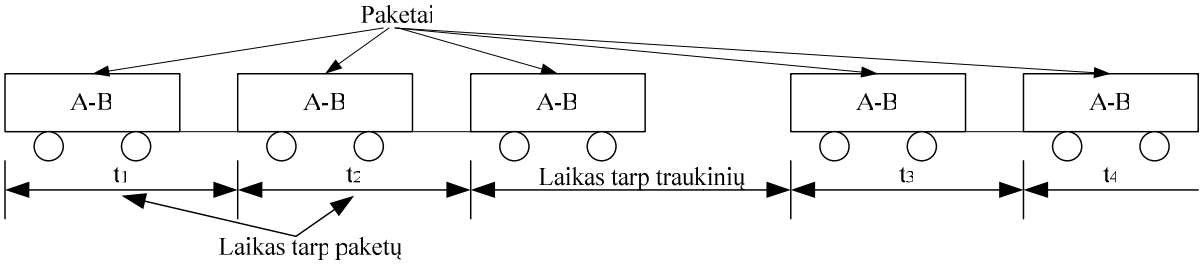
4.5 pav. Laiko tarp paketų pasiskirstymas: a) IPT tinklas 11, dienų stebėjimo rezultatai, b) IPT tinklas, 44 dienų stebėjimo rezultatai, c) Litnet mazgas, 1 dienos stebėjimo rezultatas. Brūkšninės linijos – atskirus grafiko intervalus aproksimuojančios tiesės

Šiame darbe atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatai vaizduojantys laiko tarp paketų pasiskirstymą, pateikiami 4.5 paveiksle. Kaip matyti, grafike atskirus pateiktų kreivių intervalus tenka aproksimuoti keliomis tiesėmis. Tiesa, galima pastebėti, kad kuo daugiau laiko yra stebimas srautas (4.5 pav. b), tuo mažiau matyti kreivės netolydumų, tačiau ir šiuo atveju gautas grafikas aproksimuojamas keliomis kreivėmis.

„Paketų traukinio“ modelis. Iki pradedant taikyti automodelį, „paketų traukinio“ (*angl. packet train*) modelis [78] buvo naudojamas kaip alternatyva Puasono modeliui. Šis modelis tarp siuntėjo ir gavėjo „nutiesia“ savotišką geležinkelį. Kai siuntėjas siunčia gavėjui paketus vieną paskui kitą, sudaromas savotiškas „paketų traukinys“ (4.6 paveikslas). Jei tolesnio paketo pasirodymo laikas viršija tam tikrą nustatytą laiką, sukuriamas naujas „traukinys“.

Laiko intervalai tarp paketų formuoja laiko seką, pagal kurią galima nustatyti tokius parametrus kaip deviacija ir variacijos koeficientas bei autokoreliacinės funkcijos reikšmės. Tuo tarpu duomenų srautui aprašomam Puasono dėsniu, autokoreliacinės funkcijos reikšmė lygi nuliui esant bet kokiam laiko postūmiui [78].

Šiuo darbo metu tirto IPT tinklo autokoreliacinių funkcijų reikšmės yra pateikiamas 4.2 lentelėje, iš kurių matyti, kad nors autokoreliacinės funkcijos reikšmės nėra didelės, tačiau kartu nėra lygios ir nuliui. Remiantis tuo, galima teigti, kad tinkle perduodamas srautas nepaklūsta Puasono dėsniui. Kitų autorių atliktuose matavimuose [78], [92] nustatytos panašios autokoreliacijos reikšmės.



4.6 pav. „Paketų traukinio“ modelis

4.2 lentelė. Tirtų srautų statistinės analizės rezultatai

Intervalų skaičius	Vidurkis, ms	Autokoreliacija				Standartinė deviacija
		1	2	3	4	
248714	1321,4227	0,0889	0,0634	0,0687	0,0549	1638,0452
248709	1389,0642	0,0895	0,0558	0,0453	0,0425	2108,1244
247954	1222,3291	0,0618	0,0381	0,0227	0,0247	1369,7519
248224	1456,2249	0,1097	0,0948	0,0868	0,0832	2013,998
248775	2107,8428	0,0754	0,0547	0,0641	0,0688	2326,7859

Automodelis. Automodelio savybės, kurios reiškia, kad stebimo objekto pagrindinė struktūra gali būti surasta įvairiuose masteliuose, dažnai aptinkamos gamtoje, pavyzdžiui, paparčio lapas, medžio šakos bei tokiose mokslo srityse kaip astronomija, chemija, ekonomika, fizika ir t.t.. Terminą automodelis 1968 metais pasiūlė B. B. Mandelbrotas [94]. Pirmasis automodelio savybes duomenų perdavimo tinkluose 1993 metais tyrinėdamas Ethernet tinklo duomenų srautą aptiko W. E. Lelandas [91]. Po to daugelis mokslininkų ėmėsi srauto tyrinėjimo darbų, kurių metu buvo aptikta, kad žiniatinklio srautas turi automodelio savybių [95] dėl tam tikrų rinkmenų dydžių, jų paskirstymo ypatumų serveriuose, taip pat dėl tipinio vartotojų elgesio. Po to automodelio bruožai buvo aptikti LAN ir globaliuose (*angl. Wide Are Network* – WAN) tinklų [92], daugialypės terpės [96] bei vaizdo perdavimo sistemų [97] srautuose. Nustatyta, kad netgi telefono tinklų signalizacijos duomenų srautuose pasireiškia automodelio savybės [98, 99].

Automodelio aprašymas. Automodelio aprašymas parengtas remiantis [100, 101] darbais.

Nagrinėjamas stacionarus diskretinis stochastinis laiko procesas arba laiko serija *X(t)*, kai visiems $t \geq 0$, kuris nusako srauto intensyvumą – sumą paketų, baitų ar bitų laiko intervale *t*, *t*+1:

$$X_t = Y(t+1) - Y(t), \tag{4.2}$$

čia *Y(t)* tolydus (*angl. cumulative*) procesas.

Agreguotas procesas $X_s^{(m)}$ (*angl. aggregated process*) su bendrumo lygiu *m* užrašomas:

$$X_s^{(m)} = \frac{1}{m}\left[X_{sm-m+1} + X_{sm-m+2} + \ldots + X_{sm}\right] = \frac{1}{m}\sum_{t=m(i-1)+1}^{mi} X(t). \tag{4.4}$$

Formuojant agreguotą procesą $X_s^{(m)}$, pradinis procesas *X(t)* dalinamas į *m* žingsnių trukmės nepersidengiančius blokus ir iš tų blokų formuojamas vidurkis. Formulėje (4.4) *s* – bloko indeksas. Tada stacionarusis stochastinis procesas *X(t)*, kurio vidurkis μ, yra tikslus antros eilės automodelio procesas su Hersto parametru H (½<H<1), jei tenkinama tokia sąlyga:

$$\gamma(k) = \frac{\sigma^2}{2}\left((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H}\right), \text{ visiems } k \geq 1, \tag{4.5}$$

čia $\gamma^m(k)$ – autokoreliacinė $X^{(m)}$ funkcija, σ^2 – dispersija. Pagrindinis automodelio privalumas naudojant laiko serijų matavimams yra tas, kad proceso panašumo laipsnis automodeliui yra nusakomas vienu parametru – Hersto parametru, kuris apibūdina autokoreliacinės funkcijos mažėjimo greitį. Jei Hersto parametras yra intervale nuo 0,5 iki 1, tada procesas turi automodeliui būdingų savybių. Tuo tarpu *X(t)* yra asimptotiškas antros eilės autoprocesas, jei:

$$\lim_{m\to\infty}\gamma^m(k)=\frac{\sigma^2}{2}\left((k+1)^{2H}-2k^{2H}+(K-1)^{2H}\right),\text{ visiems k}\geq 1. \tag{4.6}$$

Automodelio sąlyga dar gali būti užrašoma ir tokia išraiška:

$$X^{(m)}=m^{H-1}X\text{ , kai visiems m}\geq 1; \tag{4.7}$$

$$\lim_{m\to\infty}X^{(m)}=m^{H-1}X\text{ , kai visiems m}\geq 1. \tag{4.8}$$

Automodelio variacinis koeficientas skaičiuojamas pagal išraišką:

$$\operatorname{var}\left(X^{(m)}\right)=\sigma^2 m^{-\beta}\text{ , kai visiems m}\geq 1; \tag{4.9}$$

čia $0<\beta<1$.

Hersto koeficientas randamas pagal:

$$H=1+\frac{\beta}{2}. \tag{4.10}$$

Autokoreliacinė funkcija, jei $0<H<1$, $H\neq ½$, randama pagal išraišką:

$$R(k)\sim H(2H-1)k^{2H-2}\text{ , kai k}\to\infty. \tag{4.11}$$

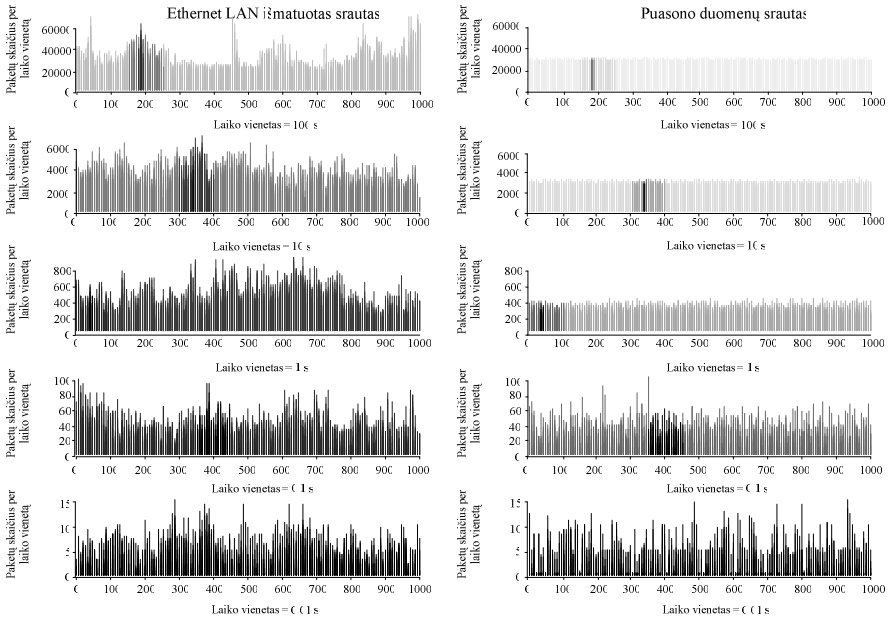
Esant Hersto parametrui ½ < H < 1 ribose, autokoreliacinė funkcija randama:

$$R(k)\sim ck^{-\beta}, \tag{4.12}$$

čia c – konstanta, c>0, $\beta = 2 - 2H$.

Stacionarus procesas *X(t)*, kurio autokoreliacinės funkcijos verčių suma diverguoja ($\sum_{k=-\infty}^{\infty} R(k) = \infty$), vadinamas procesu su tolima priklausomybe (*angl. long range depend*). Šis procesas nėra tapatus automodelio procesui, tačiau, jei tenkinama sąlyga ½ < H < 1, tai toks procesas priskirtinas ir automodelio, ir su tolima priklausomybe procesams. Darbuose [102 – 104] įrodyta, kad duomenų perdavimo srautas turi ir tolimąją priklausomybę.

Grafiškas automodelio ir Puasono srautų palyginimas pateikiamas 4.7 paveiksle.



4.7 pav. Automodelio a) ir Puasono b) srautų palyginimas.

Iš paveikslo matyti, kad automodelio atveju, keičiant laiko mastelį, srautų pliūpsniškumas išlieka, o Puasono srauto atveju, turint didelį imčių skaičių, srauto intensyvumas darosi tolydus.

Automodelio nustatymo būdai. Kaip buvo minėta, Hersto parametras yra naudojamas kaip automodelio savybių matas. Tiriamo proceso Hersto parametras nustatomas būdais, kurie priskiriami laiko srities arba dažnio/vilnelės srities analizei [105, 106]:

1. Laiko srities (*angl. domain*) analizė:
    a) R/S metodas, kuris nustato log(*R/S*) priklausomybę nuo log(*m*). Hersto parametrą šiame metode charakterizuoja linijos nuolydis (*angl. slope*). Čia R – koreliacija, S – variacijos koeficientas,

b) absoliučios vertės metodas (*angl. Absolute value method*), pagal kurį yra brėžiama logaritminė pirmo laipsnio $X^{(m)}$ momento priklausomybė nuo logaritminio bendrumo lygio *m*. Per gautus taškus nubrėžtos tiesės nuolydis lygus *H*–1, jei tiriamas procesas turi tolimą priklausomybę,

c) variacijos metodas, pagal kurį yra brėžiamas logaritminis bloko variacijos priklausomybės nuo bloko dydžio kiekvienam bendrumo lygiui *m* grafikas. Jei procesas turi tolimą priklausomybę, tada per gautus taškus nubrėžtos tiesės nuolydis yra β, $\beta > -1$. Hersto koeficientas šiuo atveju skaičiuojamas pagal (4.10) išraišką,

d) liekanų variacijos metodas (*angl. Variance of residuals*), pagal kurį brėžiamas logaritminis bloko liekanos variacijos vidurkio priklausomybės nuo bendrumo lygio *m* grafikas. Jei procesas turi tolimą priklausomybę, tada gauta tiesė turi nuolydį *H*/2.

2. Dažnio/vilnelės srities analizė:

a) Periodogramos grafinis metodas, kurio pagrindas – spektro tankio priklausomybė nuo dažnio logaritminiame mastelyje. Šios priklausomybės aproksimuojančios tiesės nuolydis nusako Hersto koeficientą,

b) Sumažinimo analizė (*angl. Whittle estimator*), paremta tikimybės funkcijos, kuri taikoma laiko serijos periodogramai, mažinimu. Šis metodas nėra grafinis,

c) Abry–Veitch (AV) metodas. Hersto koeficiento įvertinimui naudoja vilnelės transformaciją. Šis metodas taip pat nėra grafinis.

Kiekvienas iš šių metodų įvertina tik tam tikrą autoproceso savybę (variaciją, galios spektrą), todėl analizuojant tą patį procesą ir taikant skirtingus metodus gaunami skirtingi rezultatai. Naudojant keletą Hersto koeficiento nustatymo metodų, tiksliau apibūdinamos proceso automodelio savybės.

Planuojama, kad vartotojų tinkluose balsas ir duomenys perduodami tais pačiais bevielio ryšio kanalais, todėl svarbu nustatyti srauto pobūdį tiek ilguoju laiko periodu, kai yra perduodami tik duomenys, tiek trumpuoju laiko periodu, kada duomenys perduodami lygiagrečiai su balsu. Todėl IPT tinkle buvo tiriamos trumpos paketų serijos (iki 10 min; bendrumo lygis – 1 ms, srautas vidurkintas sumuojant perduodamą baitų kiekį per bendrumo lygio trukmę) ir ilgos paketų serijos (iki 15 valandų, bendrumo lygis – 1 s, srautas vidurkintas sumuojant perduodamą baitų kiekį per bendrumo lygio trukmę) tikrinat, ar srautas turi automodeliui būdingų savybių[4]. Tyrimai buvo vykdomi naudojant `Selfis` programinę

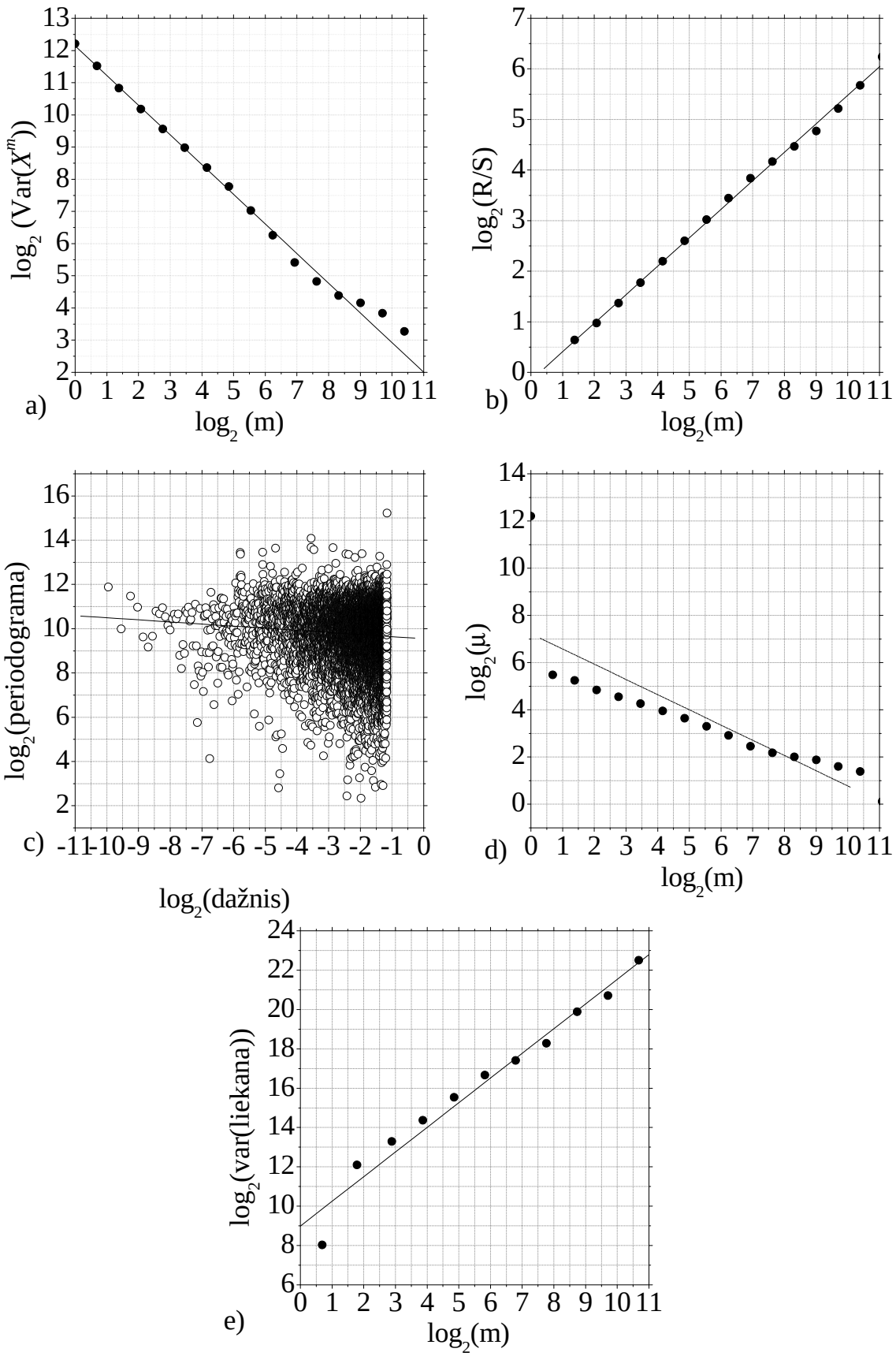
[4] 15 valandų sraute perdavimų įrašymas vyko nepriklausomai nuo pagrindinio paketų registravimo proceso. Kiekvieno įrašymo (jų buvo atlikta 5) metu buvo gaunama 2 GB dydžio rinkmena.

įrangą [107, 106] atsitiktinai parinktuose duomenų blokuose[5]. Trumpų paketų tyrimų rezultatai pateikiami 4.8 – 4.10 pav., ilgų – 4.11 paveiksle. Gautos Hersto parametro vertės pateikiamos 4.3 lentelėje, iš kurios matyti, kad trumpų paketų serijų atveju daugiausia nuo vidurkio nukrypę – absoliučios vertės ir liekanų variacijos metodų rezultatai, o ilgų paketų serijų atveju – liekanų variacijos ir periodogramų rezultatai.

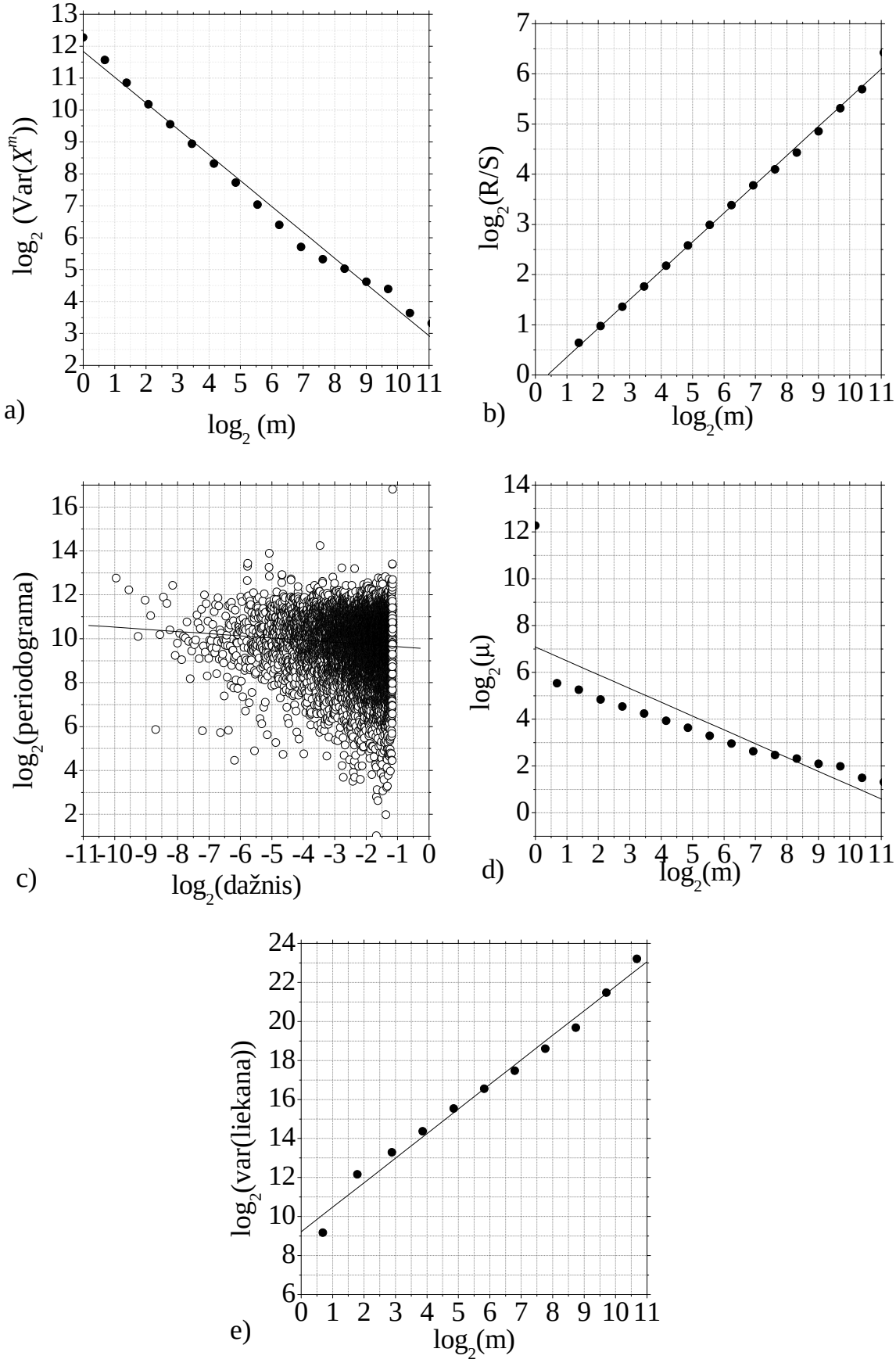
4.3 lentelė. Tirto IPT tinklo srauto Hersto koeficiento reikšmės

Trumpos paketų serijos, iki 10 min				
Metodas	Tirto bloko numeris			Standartinė deviacija
	2003.12.08 08:00	2003.12.08 12:00	2003.12.08 20:00	
R/S	0,5630	0,5740	0,5710	0,0057
Absoliučios vertės	0,3550	0,4100	0,4310	0,0392
Variacijos	0,5390	0,5940	0,6120	0,0380
Liekanų variacijos	0,6260	0,6290	0,6770	0,0286
Periodograma	0,5470	0,5490	0,5360	0,0070
Sumažinimo analizė	0,5330	0,5570	0,5570	0,0139
Abry–Veitch	0,5130	0,5010	0,5000	0,0072
Vidurkiai	0,5251	0,5449	0,5549	
Standartinė deviacija	0,0831	0,0714	0,0787	
Ilgos paketų serijos, iki 15 val.				
Metodas	Tirto bloko numeris			Standartinė deviacija
	2004.04.26 00:00	2004.04.30 18:00	2004.05.06 11:00	
R/S	0,712	0,689	0,691	0,013
Absoliučios vertės	0,564	0,527	0,537	0,019
Variacijos	0,944	0,910	0,918	0,018
Liekanų variacijos	0,901	0,994	0,920	0,049
Periodograma	0,995	0,995	0,934	0,035
Sumažinimo analizė	0,865	0,877	0,870	0,006
Abry–Veitch	0,909	0,934	0,932	0,014
Vidurkiai	0,841	0,847	0,829	
Standartinė deviacija	0,151	0,175	0,155	

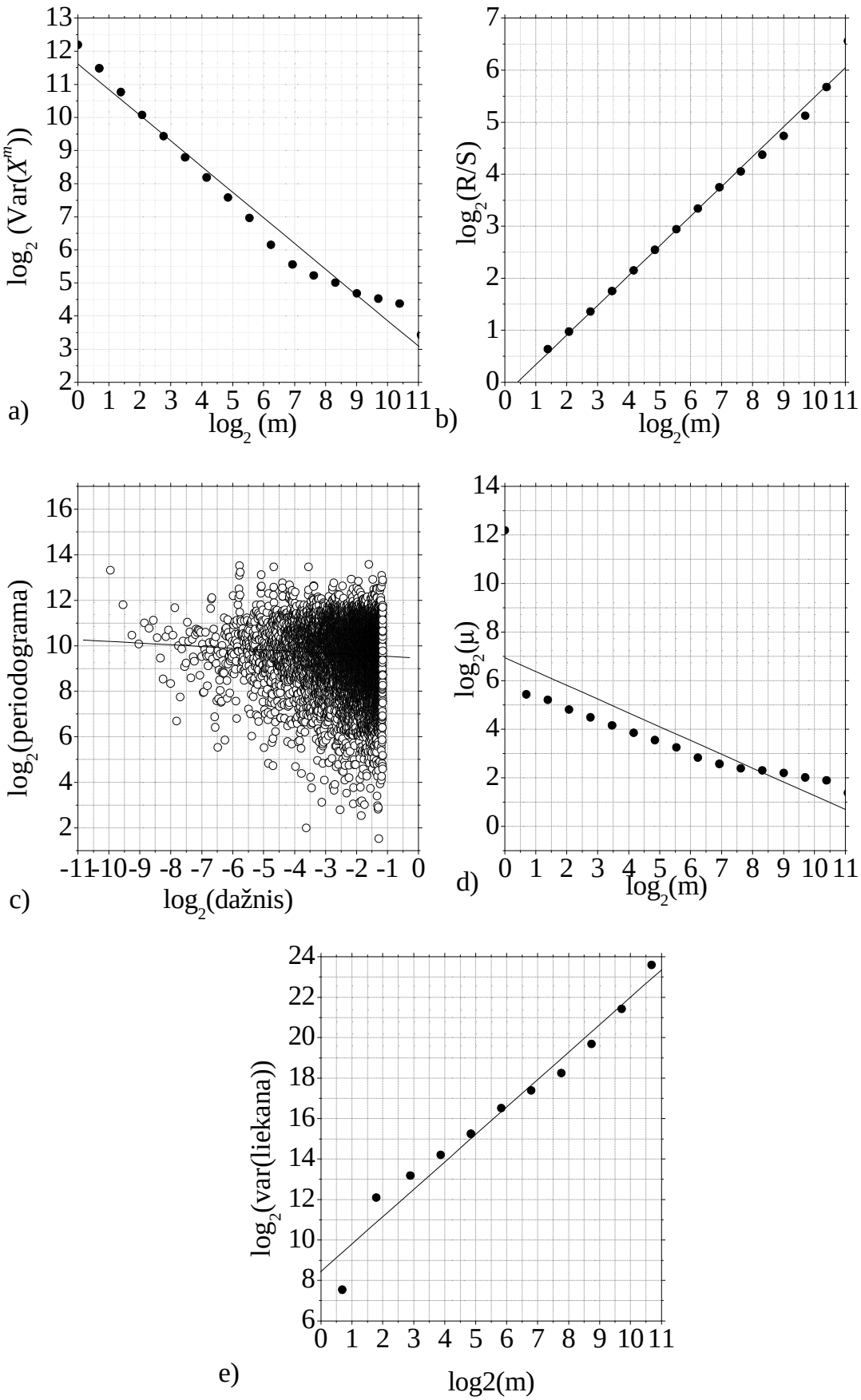
[5] Dėl programinės įrangos apribojimų nebuvo galima ištirti viso gauto duomenų masyvo. Buvo atsitiktinai pasirinkta keletas surinktų duomenų blokų ir buvo tikrinta, ar procesas turi automodelio savybių.



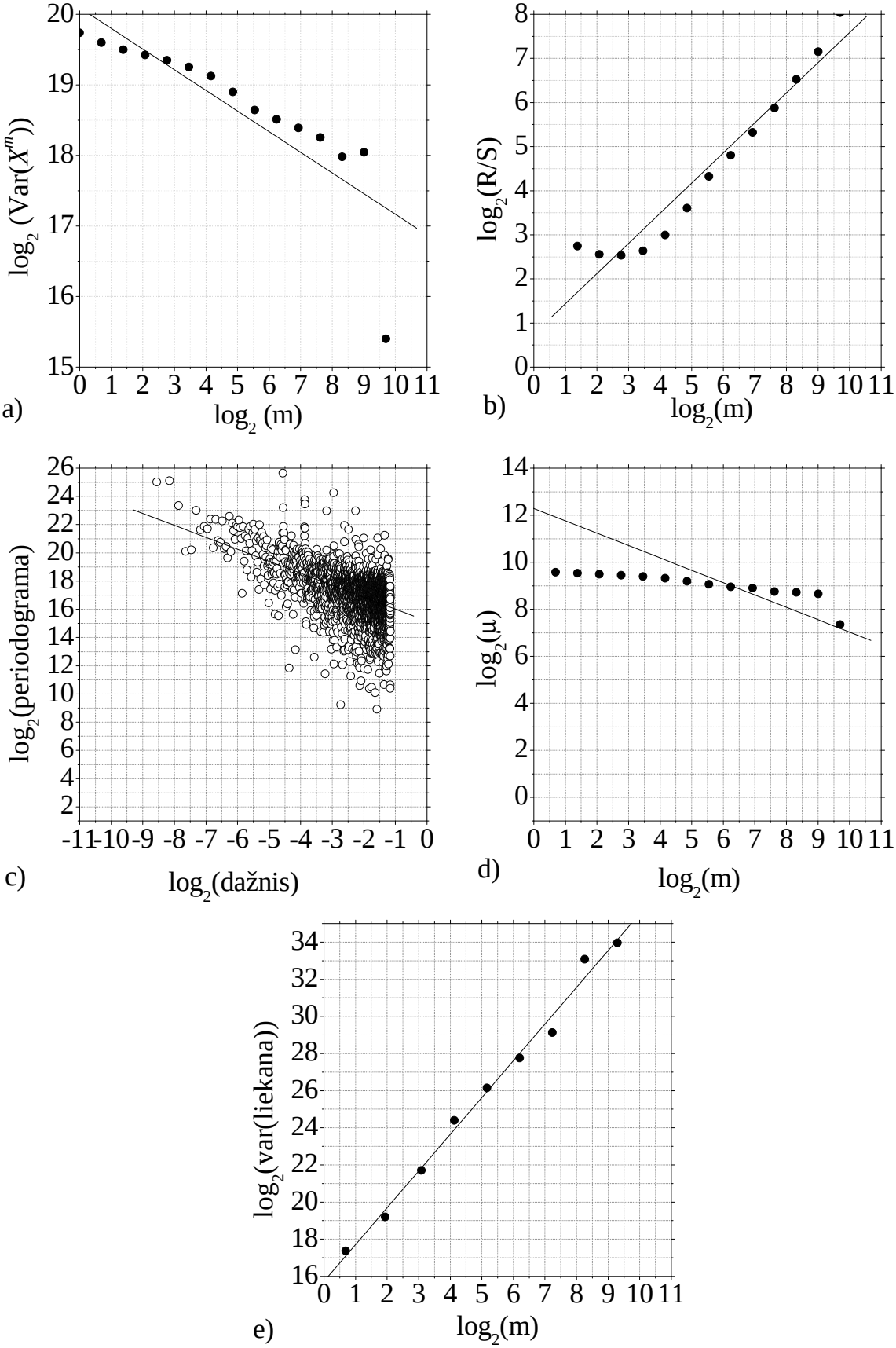
4.8 pav. Tirto IPT srauto automodelio tikrinimo rezultatai: a) variacijos metodas, b) R/S metodas, c) periodogramų metodas, d) absoliučios vertės metodas, e) variacijos liekanos metodas. Srautas matuotas 2003.12.06 08:00 val., trukmė 6 min



4.9 pav. Tirto IPT srauto automodelio tikrinimo rezultatai: a) variacijos metodas, b) R/S metodas, c) periodogramų metodas, d) absoliučios vertės metodas, e) – variacijos liekanos metodas. Srautas matuotas 2003.12.06 12:00 val., trukmė 7 min



4.10 pav. Tirto IPT srauto automodelio tikrinimo rezultatai: a) variacijos metodas, b) R/S metodas, c) periodogramų metodas, d) absoliučios vertės metodas, e) variacijos liekanos metodas. Srautas matuotas 2003.12.06 20:00 val., trukmė 10 min



4.11 pav. Tirto IPT srauto automodelio tikrinimo rezultatai: a) variacijos metodas, b) R/S metodas, c) periodogramų metodas, d) absoliučios vertės metodas, e) variacijos liekanos metodas. Srautas matuotas 2004.04.26 00:00 val. trukmė 15 val

Iš 4.3 lentelės matyti, kad gauta mažuose laiko intervaluose Hersto parametro vertė yra mažesnė nei pateikiama literatūroje [91], [95], [101], [108]. Tai galima paaiškinama tuo, kad matavimai vykdyti iš trumpos paketų serijos, kuri nebuvo procesas su stipria tolimąją priklausomybe, bei tai, kad didelę srauto dalį tirtame tinkle sudaro p2p srautas, kuris neturi labai ryškių automodelio bruožų [85], nes H<0,6. Tuo tarpu ilgų paketų serijų rezultatai panašus į literatūroje pateikiamus Hersto parametro vertes.

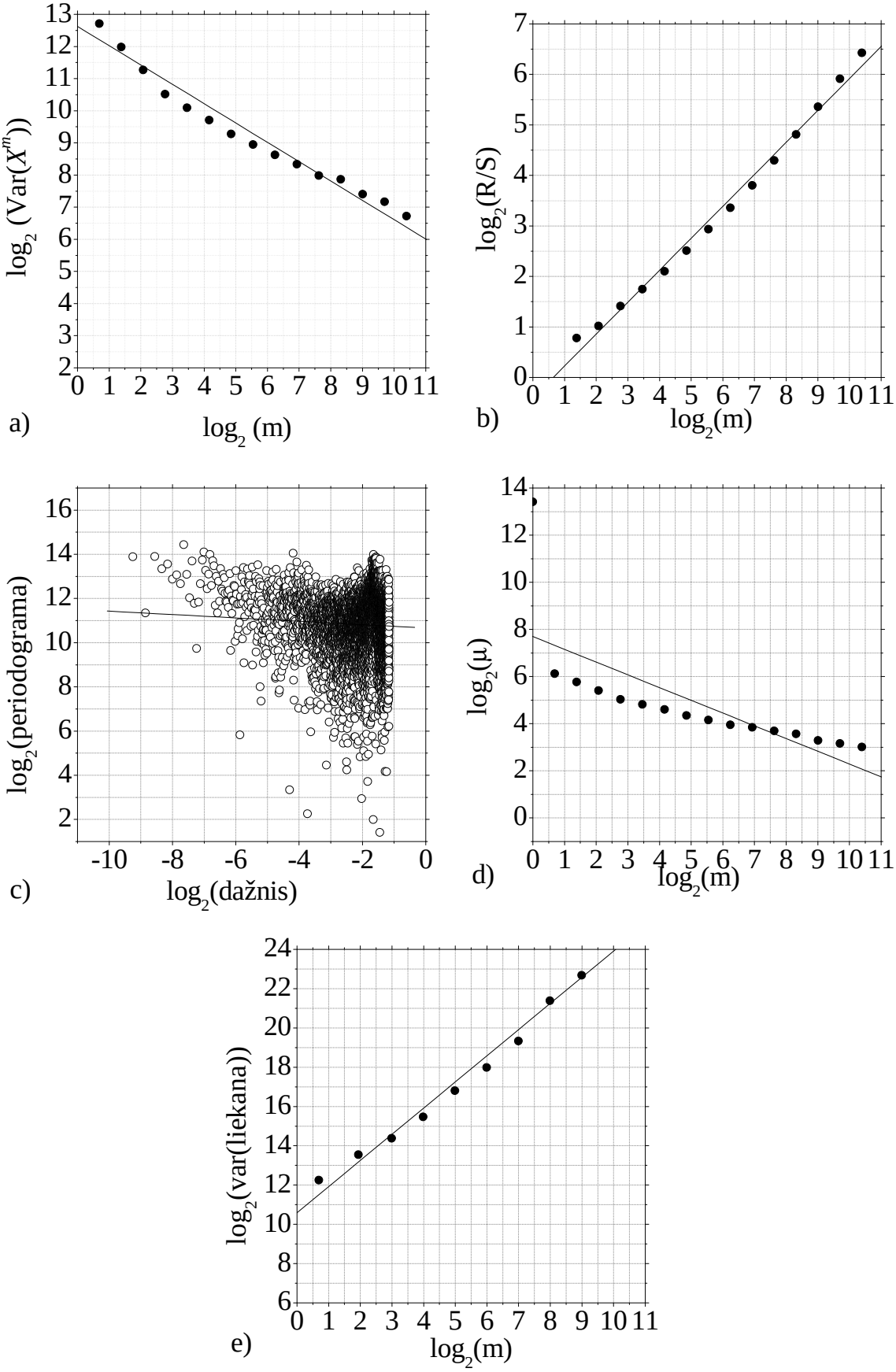
Gautų rezultatai rodo, kad tinkluose, savo struktūra ir vartotojų kiekiu panašiuose į numatomus vartotojų tinklus, srautas nėra pasiskirstęs pagal Puasono dėsnį, tačiau Hersto rodiklis, kuris charakterizuoja srauto automodeliškumą trumpose paketų serijose, nėra didelis. Tuo tarpu ilgose paketų serijose Hersto parametro reikšmė padidėja, o tai rodo, kad vartotojų tinklų srautas yra procesas su tolima priklausomybe.

Taigi modeliuojant bei projektuojant tokius tinklus būtina atsižvelgti į tai, kad srautas turės automodeliui būdingų savybių, įtakojančių QoS parametrus bei buferių dydžius.

4.1.3 Duomenų srautų generavimas

Eksperimentiniais tyrimais nustatyta, kad duomenų srautai tinkluose, savo struktūra panašiuose į vartotojų tinklus, paklūsta automodeliui. Todėl modeliavimo uždaviniams spręsti būtina turėti duomenų šaltinį, generuojantį automodelio srautą. Šiame darbe duomenų generavimui naudojama G. Kramerio sukurta programinė įranga „self–similar traffic generator ver. III“ `SSTG` [109], generuojanti pagal automodelį duomenų srautą pasirinktam šaltinių skaičiui ir kanalo apkrovai naudojant Pareto tinklą [110]. Šios programinės įrangos išeities kodas sukurtas Windows OS terpei, todėl duomenų srautų generavimui naudojamos Windows OS, arba Unix OS, kur ji veikia `Wine` [111] programinės įrangos aplinkoje, emuliuojančioje Windows OS. Tokį pasirinkimą lėmė programos išeities kodo prieinamumas bei galimybė keisti paketų dydžių dažnio tikimybių funkcijos pobūdį.

`SSTG` tyrimo metu generatorius generavo 30 duomenų šaltinių po 8500 paketų, esant kanalo intensyvumui 0,5 bei Hersto koeficientui 0,6. Paketų dydžių dažnio tikimybės funkcija panaudota iš 4.3 paveikslo. Duomenų srauto tyrimo rezultatai, panaudojant `Selfis` programinę įrangą, pateikiami 4.12 pav. bei 4.4 lentelėje. Toks srautas gali susidaryti vartotojų tinkle trumpuoju laiko periodu, kada duomenų srautas perduodamas lygiagrečiai su balsu. Iš pateikto grafiko bei lentelės matyti, kad pagal duomenų srauto generavimo programos rezultatus apskaičiuoto Hersto parametro vertė yra artima nustatytai. Todėl šią programą ateityje galima naudoti kaip duomenų srauto generatorių. Hersto parametro deviacijos reikšmės skirtingiems sugeneruoto srauto pavyzdžiams yra tos pačios eilės kaip ir eksperimentiškai tirtų duomenų.



4.12 pav. Modeliuoto srauto automodelio tikrinimo rezultatai: a) variacijos metodas, b) R/S metodas, c) periodogramų metodas, d) absoliučios vertės metodas, e) variacijos liekanos metodas. Generavimo pavyzdžio nr. 1.

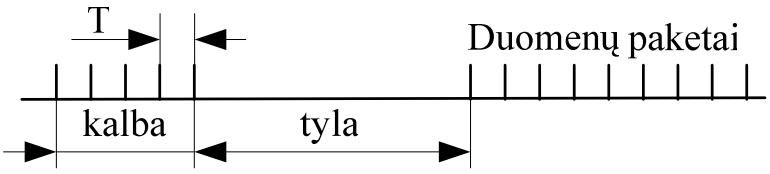
4.4 lentelė. Sugeneruoto duomenų srauto Hersto koeficiento reikšmės

Metodas	Generuoto srauto pavyzdžio numeris			Standartinė deviacija
	1	2	3	
R/S	0,632	0,602	0,577	0,028
Absoliučios vertės	0,459	0,506	0,581	0,062
Variacijos	0,699	0,636	0,695	0,035
Liekanų variacijos	0,666	0,604	0,674	0,038
Periodograma	0,538	0,518	0,528	0,010
Sumažinimo analizė	0,520	0.514	0,577	0,040
Abry–Veitch	0,501	0,500	0,517	0,010
Vidurkiai	0,574	0,554	0,593	
Standartinė deviacija	0,091	0,057	0,068	

4.2 Balso perdavimo paketais ypatumai

Kalbos kodavimo būdai. Seniai pastebėta, kad balsas, kaip duomenų šaltinis, yra nereguliarus procesas. Tokį procesą tikslinga išskaidyti į tam tikros trukmės laiko atkarpas, o tas atkarpas atvaizduoti duomenų paketais (4.13 paveikslas). Siekiant sumažinti duomenų kiekį pakete, duomenis dar tikslinga ir glaudinti. Atliekant duomenų kompresiją, įvertinama balso signalų vidinė struktūra, koreliacija bei išmetami tylos intervalai. Taip sukuriami įvairūs balso kodavimo algoritmai, kurie skirtingais būdais „suspaudžia" balso signalą. Tarp jų reikšmingiausi tie, kuriuos standartizuoja ITU. Tai gerai žinomi būdai:

1. G.711 – klasikinis balso kodavimo būdas – impulsinė kodinė moduliacija (*angl. Pusle Code Modulation* – PCM);
2. G.726 – adaptyvioji diferencinė impulsinė kodinė moduliacija (*angl. Adaptive Differential Pulse Code Modulation* – ADPCM);
3. G.728 – balso kompresija tiesinio prognozavimo būdu sužadinama mažo vėlinimo kodais (*angl. Low Delay–Code Excited Linear Prediction* – LD–CELP) [112];
4. G.729 – balso kompresija tiesinio prognozavimo būdu sužadinama suporintos struktūros algebriniais kodais (*angl. Conjugate Structure–Algebraic Code Excited Linear Prediction* – CS–ACELP) [113];
5. G.723.1 – balso kompresija, atliekama daugiaimpulsiu didžiausio tikėtinumo kvantavimo būdu (*angl. Multi–Pulse Maximum Likelihood Quantization* – MP–MLQ) [114].



4.13 pav. Koduoto kalbos signalo struktūra

Kokybės vertinimas. ITU yra priėmusi dvi kalbos kokybės vertinimo metodikas. Viena iš jų, žinoma kaip suvidurkinta nuomonės vertė (*angl. Mean Opinion Score* – MOS), yra pateikta ITU P.800 rekomendacijoje [115]. Ši vertinimo metodika pagrįsta subjektyviais vertinimais, gautais apklausos būdu. MOS vertinimų skalę sudaro balai nuo 5 iki 1. Balas 5 reiškia, kad kokybė yra puiki, 4 – gera, 3 – aiški, 2 – nepakankama, 1 – bloga. Pagal šią metodiką vartotojus tenkinančią bendravimo kokybę atitinka balai 4 – 3. Kai kokybė vertinama žemesniu balu nei 3, tai reiškia, kad kokybė nepakankama žmonių kalbai perduoti.

Kita metodika – suvokiamos kalbos kokybės matavimas (*angl. Perceptual Speech Quality Measurements* – PSQM) – aprašyta ITU P.861 rekomendacijoje [116]. Šioje metodikoje remiamasi originalaus ir atkurto balso realiomis sąlygomis, įskaitant įvairius išorinius triukšmus, palyginimu. Šioje metodikoje numatyta tokia vertinimų skalė: nuo 0 iki 6,5. Čia “0” yra aukščiausias kokybės rodiklis, t. y., kai atkurtas balsas nežymiai skiriasi nuo originalo.

4.4 lentelėje pateikiamos pagrindinės išvardintų kalbos kodavimo būdų charakteristikos.

4.4 lentelė. Pagrindinės kalbos kodavimo būdų charakteristikos

ITU rekomendacija	v_b, kb/s	t_0, ms	n_b, baitais	Kokybė MOS	Kokybė PSQM
G.711	64	0,75	80	4,3 – 4,4	0,23
G.723	6,4; 5,3	30	24; 20	3,65 – 4,0; 3,5 – 3,65	2,97 – 3,25
G.726	32 16	1	–	3,85; 4,0 – 4,2	–
G.728	16	3…5	–	3,61; 4,0 – 4,2	1,53
G.729	8	10	10	3,92 – 4,2	3,07

Čia: v_b – sukuriamo duomenų srauto sparta, t_0 – paketo formavimo laikas, lygus koduojamo signalo atkarpos trukmei, n_b – paketo dydis, MOS ir PSQM – balso kokybės rodikliai.

Šioje lentelėje kalbos kokybės vertinimų išvados surinktos iš įvairių šaltinių [117, 118], todėl nėra vienodos. Visi ITU rekomenduojami kalbos kodavimo algoritmai, vertinant

pagal MOS rodiklį, tenkina bendravimo kokybės lygio reikalavimus, nepaisant to, kad jų realizavimui reikalinga skirtinga bitų perdavimo sparta. VPT tikslams detaliau nagrinėti pasirenkamos rekomendacijos G.711, G.729 ir G.723.1 (6,4 kb/s), kurios pagal perduotinų duomenų spartą skiriasi žymiai, tačiau pagal MOS rodiklį užtikrina priimtiną kokybę.

Šiuo metu viešuosiuose telefono tinkluose balsas koduojamas G.711 protokolu. Taigi sąsajose su viešaisiais tinklais koduoto balso nereikia papildomai perkoduoti tik tuo atveju, jei jis koduotas G.711 protokolu. Visais kitais atvejais, jungiant VPT tinklą su viešuoju telefono tinklu, tenka pakeisti balso signalo kodavimo algoritmą. Kaip matyti iš 4.2 lentelės, balso kompresija kokybės nepagerina, apskritai bet koks papildomas balso perkodavimas jo kokybės negerina. Tai svarbus faktorius parenkant kalbos kodavimo protokolą.

4.2.1 Kalbos modelis

Tobulinant esamas ir kuriant naujas telekomunikacines sistemas, svarbu turėti pakankamai tikslų kalbos sukuriamo duomenų srauto modelį. Nors pirmųjų balso aktyvumo – tylos intervalų tyrimų rezultatai paskelbti jau 1965–68 m. [119, 120], tačiau šios krypties balso signalų tyrimai vis dar tęsiami. Viena iš priežasčių yra tai, kad iki šiol sukurti modeliai gerokai skiriasi vieni nuo kitų. Be to, priklausomai nuo naudojimo sričių gaunami rezultatai yra interpretuojami skirtingai.

Kalbos modelis. Ieškant būdų, kuriais galima mažinti balsui perduoti reikalingų duomenų kiekį, nustatyta, kad žmonėms kalbant pakaitomis kartojasi trumpi kalbos ir tylos intervalai. Tokią kalbos signalo struktūrą lemia žmogaus kalbos aparato savybės. Žmogus paprastai kalba iškvėpdamas orą ir tyli įkvėpdamas. Telefonu pašnekovai paprastai kalba pakaitomis – vienas kalba, kitas klauso. Tai kita priežastis, kodėl susidaro tylos intervalai. Visų – kalbos ir tylos – intervalų trukmės, be abejo, yra atsitiktinės.

Šiuolaikiniuose balso kodavimo – kompresijos algoritmuose, tokiuose kaip G.729, G.723.1, kartu su kitomis skaitmeniniu apdorojimu pagrįstomis priemonėmis duomenų kiekiui mažinti taikoma ir balso specifika paremta priemonė – balso aktyvumo detektorius. Šis detektorius išskiria kalbos laikotarpius (*angl. talkspurt*), kurių metu žmogus tikrai kalba, ir tylos laikotarpius (*angl. silence*), kada kalbantysis net trumpam laikotarpiui nutyla.

Pirmasis balso kompresijos telefono ryšių sistemose algoritmas, kuriame panaudotas balso aktyvumo detektorius, buvo laikinio paskirstymo naudojant kalbos interpoliaciją metodas (angl. *Time Assignment Speech Interpolation* – TASI). TASI–A (1959 m.), TASI–B (1976 m.) metodas sukurtas specialiai tolimajam ryšiui ir taikomas perduodant telefono pokalbių signalus tarpžemyniniais kabeliais.

Balso aktyvumo detektoriai taikomi ir moderniose paketinio perdavimo priemonėse. Neperduodant kalbos duomenų, tylos laikotarpiais lieka laisva dalis ryšio kanalo laidumo. Ją galima panaudoti kitų pokalbių signalams bei su balso signalais nesusijusiems duomenims perduoti. Mobiliojo ryšio sistemoje tylos laikotarpiais galima išjungti siųstuvus. Tokiu būdu galima taupyti energiją ir mažinti trukdžius kitoms ryšio priemonėms.

Balso aktyvumo tyrimų analitinė apžvalga. Vieni pirmųjų balso signalo struktūros tyrimai aprašyti darbe [120]. Šiame darbe kalbos intervalų vidutinė trukmė τ_{k0} lygi 352 ms, o tylos intervalų vidutinė trukmė τ_{t0} lygi 650 ms. Dešimtmečiu vėlesniame darbe [121] gauti visiškai kitokie duomenys: τ_{k0} = 2360 ms**,** τ_{t0} = 606 ms. Tokio akivaizdaus tyrimų rezultatų skirtumo priežastis – skirtingos matavimų metodikos bei skirtingi balso aktyvumo detektoriai, kurie tiriamą intervalą priskiria balsui ar tylai.

Taikant paprastus balso aktyvumo detektorius, priskyrimo balsui ar tylai požymis yra artimas energiniam kriterijui, kuris pirmą kartą buvo panaudotas [120] darbe. Pagal kitą šaltinį, kuriame naudojamas toks pat kriterijus (ITU rekomendacija P.59 [122]), τ_{k0} lygi 227 ms ir τ_{t0} lygi 596 ms. Energinis balso aktyvumo detektorius turi esminį trūkumą – kartais jis dirbtinai iškarpo kalbos intervalus ir dėl to blogėja atkurto balso kokybė. Be to, šie detektoriai neefektyvūs triukšmingoje aplinkoje.

Kita rezultatų grupė, kurioje balso intervalai žymiai ilgesni už tylos intervalus, gaunama taikant sudėtingesnius balso aktyvumo detektorius, kurie kalbai nuo tylos atskirti naudoja inertiškus, nuo signalo atkarpos priklausančius algoritmus. Šie detektoriai apdoroja tam tikros trukmės signalo atkarpą, atsižvelgdami į prieš tai buvusią, ir tik tada pateikia išvadą, kaip tą atkarpą traktuoti: kaip tylą, ar kaip kalbą. Šis procesas apibūdinamas kaip „paveldo funkcija“ (*angl. hangover* – HF). Dažniausiai HF funkcija realizuojamas tada, kai trumpi tylos intervalai, kurių trukmė trumpesnė už tam tikrą reikšmę *h*, priskiriami balsui [121]. Pavyzdžiui, balso kodavimo protokole G.729 *h* trukmė yra 200 ms. Tais laikotarpiais, kai tylos intervalo trukmė trumpesnė už *h*, HF kiekvieną kalbos intervalą pailgina dydžiu *h*. Tyrimai, kuriuose kalbos bei tylos intervalai nustatomi taikant HF, aprašyti [121], [123] bei ITU rekomendacijoje P.59 [122]. Kompresijos algoritmų su HF balso kokybė yra aukštesnė nei energetinį kriterijų naudojančių kalbos kompresijos algoritmų, tačiau tai sukuria didesnę kanalo apkrovą, nes yra „išmetama“ mažiau tylos intervalų.

Susisteminti kalbos ir tylos intervalų vidutinių trukmių duomenys pateikiami 4.5 lentelėje. Pirmųjų dviejų skilčių duomenys gauti naudojant paprastus – energinius balso aktyvumo detektorius, o kitų – naudojant skirtingus balso aktyvumo detektorius, atliekančius HF funkciją.

4.5 lentelė. Kalbos ir tylos intervalų vidutinių trukmių duomenys

Šaltinis	[122]	[120]	[122]	[123]	[121]
τ_{t0}, ms	596	650	1587	1800	606
τ_{k0}, ms	227	352	1004	1200	2360
Periodas, ms	823	1002	2591	3000	2966
q	0,2758	0,3513	0,3875	0,4000	0,7957

Lentelėje taip pat pateikiamas balso aktyvumo rodiklis q, išreikštas kalbos intervalo vidutinės trukmės ir vidutinės periodo trukmės santykiu:

$$q = \frac{\tau_{k0}}{\tau_{t0} + \tau_{k0}}. \tag{4.13}$$

Pagal lentelę priklausomai nuo tyrimų priemonių bei metodikos vidutinė kalbos ir tylos periodo trukmė ($\tau_{t0} + \tau_{k0}$) kinta nuo 823 ms iki 3000 ms. Balso aktyvumo rodiklis kinta nuo 0,2758 iki 0,7957, tai yra maždaug tris kartus.

Paprasčiausias ir dažniausiai taikomas balso signalo struktūros modelis pagrįstas prielaida, kad kalbos ir tylos intervalų trukmių tikimybių skirstiniai yra eksponentiniai:

$$w_k(\tau) = \frac{1}{\tau_{k0}} e^{\left(-\frac{\tau}{\tau_{k0}}\right)}, \tag{4.14}$$

$$w_t(\tau) = \frac{1}{\tau_{t0}} e^{\left(-\frac{\tau}{\tau_{t0}}\right)}. \tag{4.15}$$

Čia τ_{k0} – vidutinė kalbos intervalo trukmė, o τ_{t0} – vidutinė tylos intervalo trukmė.

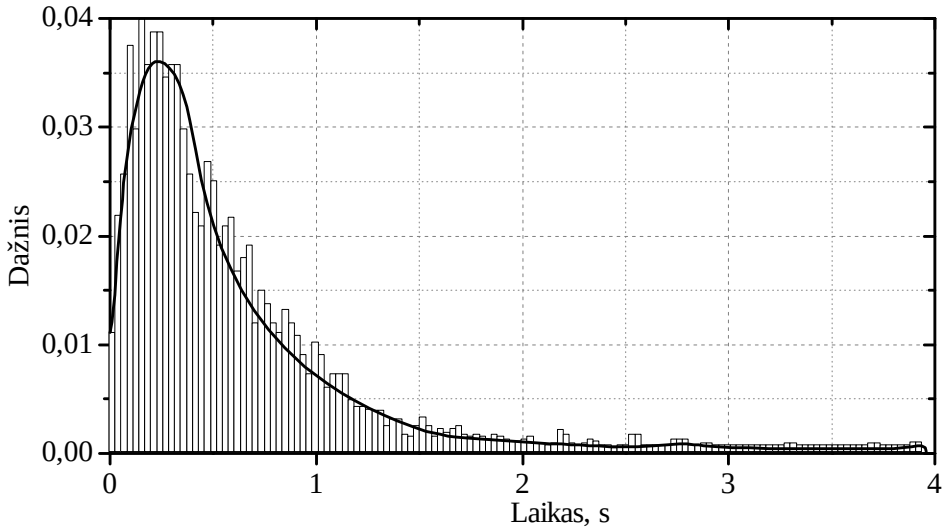
Remiantis šiuo modeliu, kalbos ir tylos proceso kaita modeliuojama Markovo grandine. Pagal Markovo grandinės modelį straipsnyje [124] parodyta, kad esant n balso šaltinių (n kalbančiųjų), tikimybė, jog vienu metu susigrupuos k kalbos intervalų, išreiškiama binomo formule:

$$p_k = \frac{n!}{k!(n-k)!} q^k (1-q)^{n-k}, \tag{4.16}$$

čia q – balso aktyvumo rodiklis (4.13).

Tačiau jau balso signalų tyrimų pradininko P. T. Brady darbe [120] pažymima, kad kalbos ir tylos intervalų tikimybių pasiskirstymo funkcijų aproksimacija eksponentėmis (4.14) ir (4.15) nėra tiksli. Eksponentinio modelio netikslumai nurodomi ir kituose darbuose, pavyzdžiui [121] bei [122]. Remiantis eksperimentiniais duomenimis patikslinti balso kalbos ir tylos trukmių pasiskirstymo modeliai aprašyti darbuose [125, 126]. Naudojami šie modeliai: dviejų eksponenčių [126] bei logaritminių – normalinių kreivių suma [125]. Analizuojant šiuos darbus, aiškėja, kad skirtingų autorių sukurti modeliai pateikia skirtingus rezultatus. Pagal [125] darbe pateiktas matematines išraiškas bei nurodytus jų parametrus negalima atkurti tame pačiame straipsnyje atvaizduotų grafikų.

Anksčiau pateikti duomenys ir nuorodos apie kalbos ir tylos intervalų statistiką buvo gauti analizuojant monologus. Dialogo atveju gauta empirinė tylos intervalų pasiskirstymo funkcija pateikiama 4.14 pav. [125], iš kurio matyti, kad šiuo atveju tylos intervalų trukmė gali siekti 50–100 s. ir dar daugiau. Todėl telefonijos tikslams tylos intervalų modelį turi sudaryti dvi dalys – mikro ir makro intervalai.



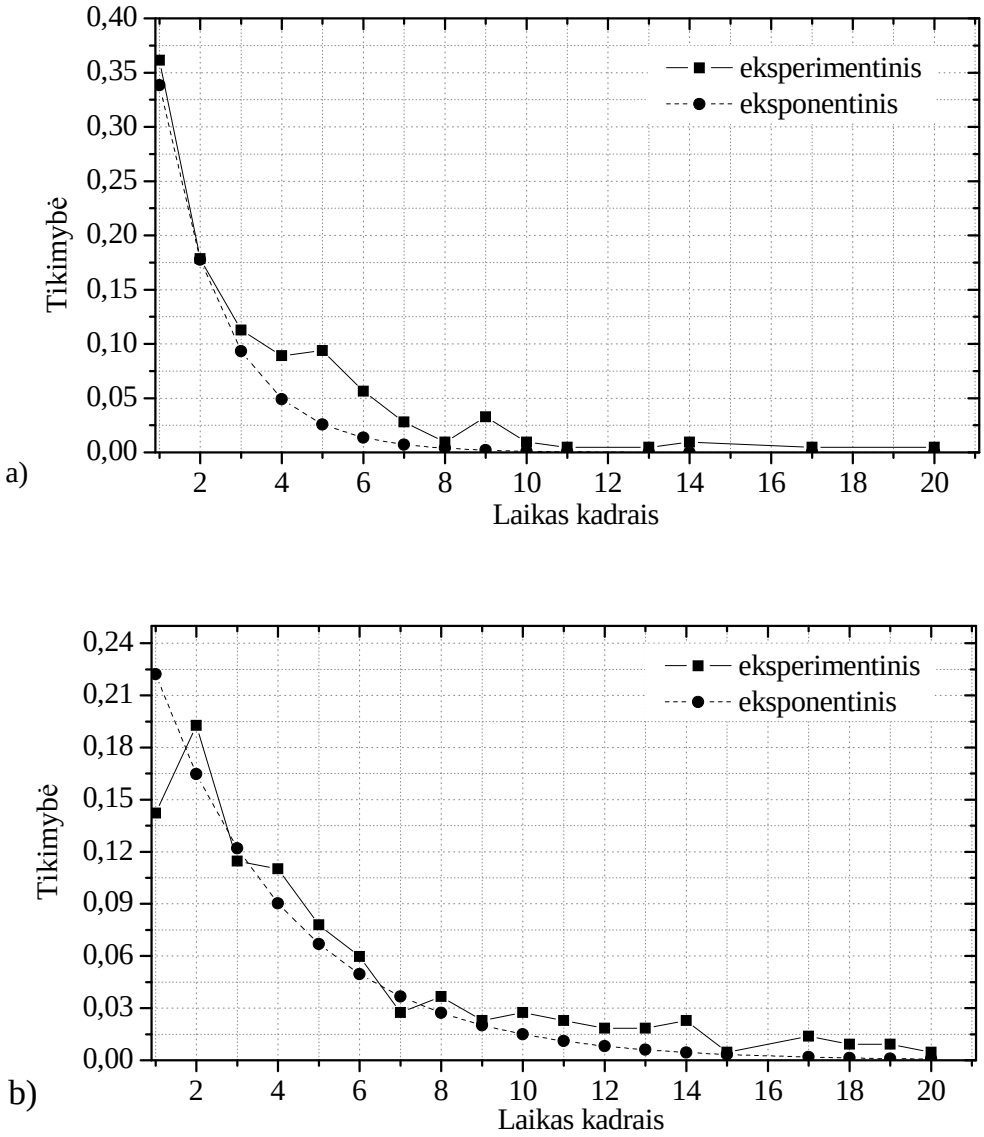
4.14 pav. Tylos intervalų pasiskirstymo funkcija dialogų metu

Literatūros šaltiniuose dėl duomenų įvairovės vis dar nėra aprašyti bendri balso aktyvumą apibūdinantys modeliai. Šią įvairovę lemia tokie veiksniai: skirtingi kalbos ir tylos atskyrimo kriterijai, skirtingi kalbantieji, skirtinga jų emocinė būsena. Tikslesnių rezultatų galima tikėtis tik atlikus išsamią specifinių balso savybių analizę. Tokios analizės pavyzdys pateiktas darbe [127].

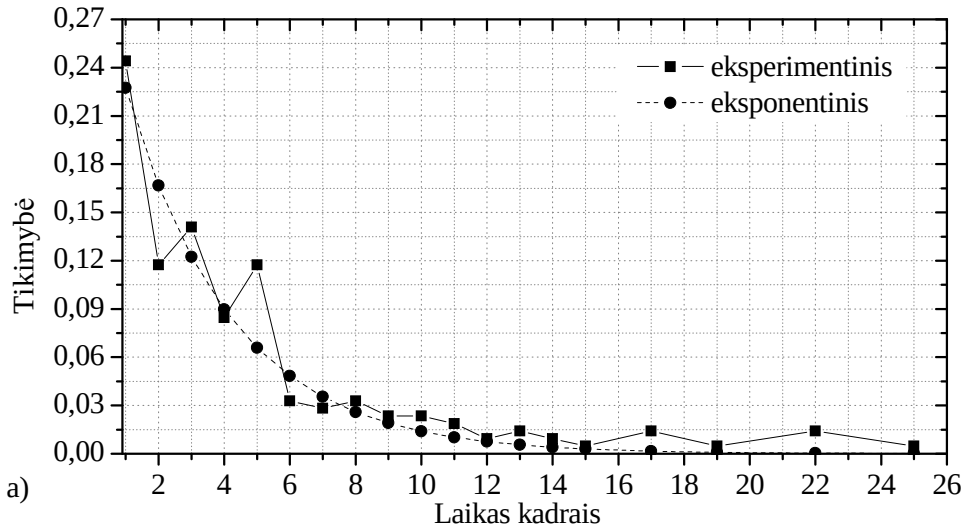
4.2.2 Eksperimentiniai balso signalų tyrimai

Šio darbo metu buvo atlikti eksperimentiniai kalbos ir tylos procesų tyrimai. 3GPP AMR algoritmas [128] buvo naudotas kaip balso aktyvumo detektorius, kuriame kadro dydis 20 ms.

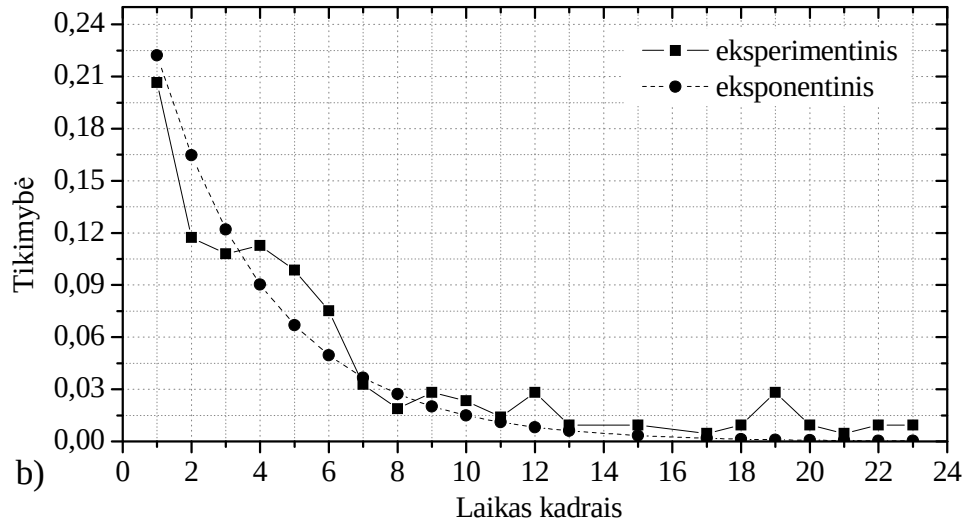
Tyrimų metu buvo analizuojami trumpi (apie 200 kalbos ir tylos periodų) monologai. 4.15 pav., a ir b, pateikiami skirtingų autorių kalbos intervalų pasiskirstymai, o 4.16 pav., a ir b, tų pačių autorių tylos intervalų pasiskirstymai. Tuose pat paveiksluose pateikiami aproksimacijų, apskaičiuotų pagal (4.14) ir (4.15) išraiškas, grafikai, kurie sudaryti apdorojant atskiro monologo 200 kalbos ir tylos periodų trukmės įrašus. Atliktų eksperimentų metu gauti kalbos ir tylos intervalų trukmių vidurkiai žymiai skiriasi nuo pateikiamų 4.5 lentelėje.



4.15 pav. Kalbos intervalų pasiskirstymai

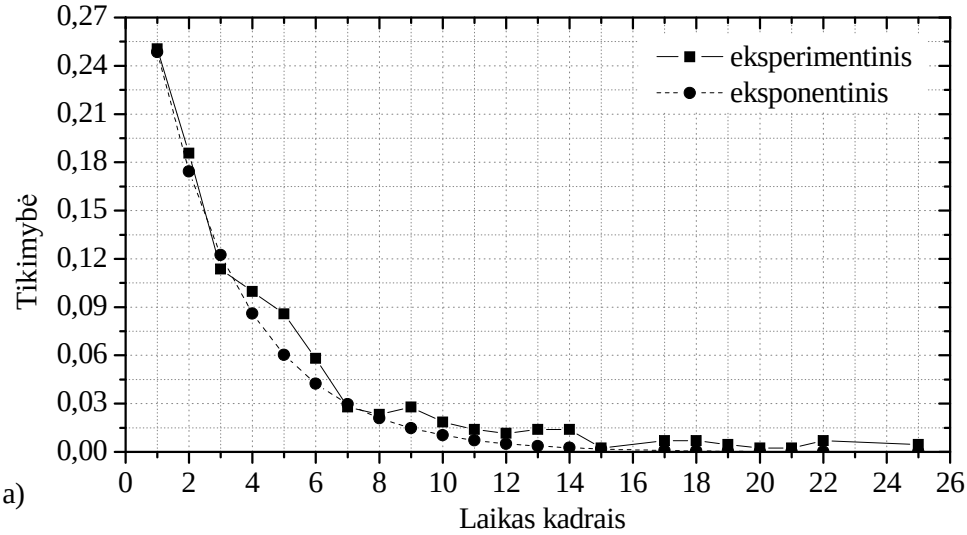


a)

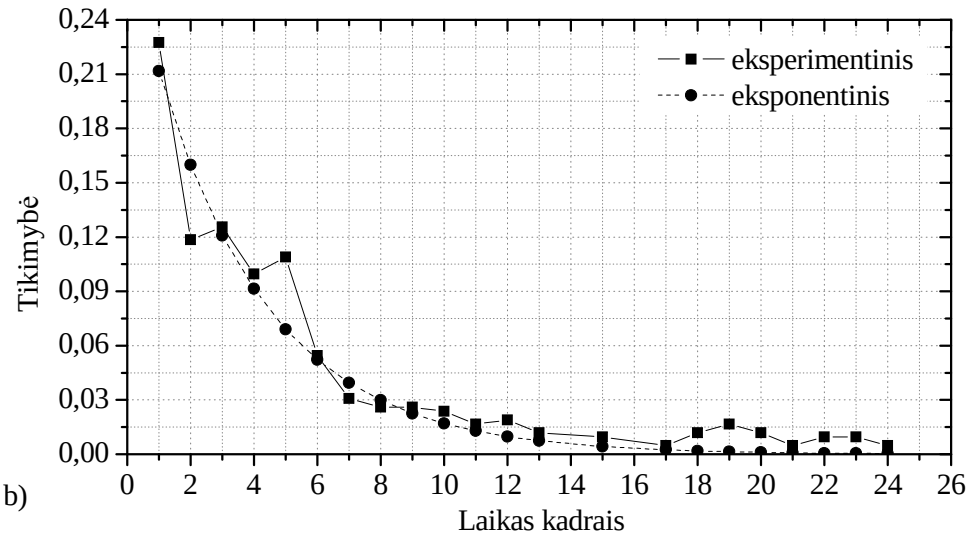


b)

4.16 pav. Tylos intervalų pasiskirstymai



a)



b)

4.17 pav. Dviejų autorių kalbos intervalų pasiskirstymas (a) ir tų pačių autorių tylos intervalų pasiskirstymas (b)

Tų pačių diktorių ir tų pačių monologų kalbos ir tylos intervalų, kaip vieno duomenų masyvo, pasiskirstymai pateikiami 4.17 pav., a ir b., iš kurių matyti, kad padidėjus duomenų kiekiui, abu pasiskirstymai tiksliau aproksimuojami eksponentiniais dėsniais. Sudarant balso signalų kalbos ir tylos modelius, atlikto tyrimo sąlygomis tokia aproksimacija visiškai priimtina.

4.2.3 Balso modelio patikslinimai

Kalbos ir tylos intervalai laike dėstosi pakaitomis: kalba, tyla, kalba, tyla ir pan. Visų kalbos ir tylos intervalų trukmės atsitiktinės.

Šiame darbe *j*–ojo balso šaltinio kalbos intervalo pradžios laikas žymimas t_0^j. Šio kalbos intervalo pabaiga žymima t_1^j. Atitinkamai pažymėjus kitų būvio pokyčių laikus t_2^j, t_3^j,..., t_i^j, gaunama tokia laiko žymių seka:

$$T^j = t_0^j, t_1^j, t_2^j, ..., t_i^j, ...,\ t_0^j < t_1^j < t_2^j < ... < t_i^j < ..., \qquad (4.17)$$

kurioje lyginiais skaičiais pažymėtos kalbos intervalų pradžios, o nelyginiais - kalbos intervalų pabaigos, kurios kartu yra ir tylos intervalų pradžios.

Kadangi kalboje išskiriami balso ir tylos intervalai, prasminga nagrinėti balso - tylos poras. Pirmą porą apibūdina žymės t_0^j, t_1^j, t_2^j. Šios poros kalbos intervalo trukmė išreiškiama:

$\kappa_0^j = t_1^j - t_0^j$,

o tylos:

$$\theta_0^j = t_2^j - t_1^j .$$

Apibendrinant j – ojo balso šaltinio k – osios poros kalbos intervalo trukmė išreiškiama:

$$\kappa_k^j = t_{2k+1}^j - t_{2k}^j , \; k = 0, 1, 2, 3,..., \tag{4.18}$$

o k – osios poros tylos intervalo trukmė atitinkamai:

$$\theta_k^j = t_{2k+2}^j - t_{2k+1}^j , \; k = 0, 1, 2, 3, ... \tag{4.19}$$

Kalbos ir tylos intervalų pora $\{\kappa_k^j, \theta_k^j\}$, – dvimatis atsitiktinis dydis, kurio statistinės savybės sietinos su perdavimo sistemos kokybės charakteristikomis. Per laikotarpį $\kappa_k^j + \theta_k^j$ sukuriamas balso duomenų srautas yra proporcingas κ_k^j, o vidutinė per šį laikotarpį kalbos duomenų sparta yra proporcinga momentiniam balso aktyvumo rodikliui:

$$q_k^j = \frac{\kappa_k^j}{\theta_k^j + \kappa_k^j} . \tag{4.20}$$

Užimta ryšio kanalo dalis yra proporcinga dydžiui q_k^j.

Laiko sekų T^j sudarymas bei formavimas priklauso nuo balso kodavimo algoritmo. Visi balso kompresiją atliekantys algoritmai siejami su tam tikra balso apdorojimo intervalo trukme, arba kitaip – laiko skalės žingsniu. Tipiška apdorojimo trukmė T yra lygi 5, 10, 20 ar 30 ms. Kalbos intervalo laikotarpiu per kiekvieną žingsnį suformuojamas vienas duomenų paketas (4.12 paveikslas).

Koreliacija. Kalbos ir tylos intervalų trukmių $\{\kappa_k^j, \theta_k^j\}$ modeliai buvo sudaromi manant, kad šie dydžiai yra nepriklausomi. Šiame darbe bandoma išsiaiškinti ar balso ir tylos intervalai yra statistiškai priklausomi dydžiai. Siekiant šio tikslo, buvo atlikti eksperimentiniai balso signalų tyrimai.

Eksperimentų duomenų rezultatų, kurie pateikiami 4.2 skyriuje, analizė leidžia teigti, kad koreliacija tarp gretimų balso ir tylos intervalų yra. Tačiau ji nėra didelė, dažniausios pasitaikančios koreliacijos koeficiento vertės yra nuo –0,05 iki –0,2 (4.6 lentelė).

4.6 lentelė. Eksperimentinių balso tyrimų rezultatai

Autorius	Duomenų dydis, kadrais	Balso intervalo vidurkis	Tylos intervalo vidurkis	Balso aktyvumo rodiklis	Koreliacija
1	1400	2812,86	52,86	0,98	–0,23
2	7390	354,48	112,95	0,76	–0,13
3	1185	290,36	114,29	0,72	–0,08
4	1361	119,40	145,11	0,45	–0,05

Balso ir tylos pasiskirstymo dėsnis. Patikslintas kalbos modelis gaunamas sukuriant statistinį ryšį tarp atsitiktinių dydžių κ_k^j ir θ_k^j. Daroma prielaida, kad *k*–ojo tylos intervalo trukmė θ_k yra susijusi su prieš jį buvusio *k*–ojo kalbos intervalo trukme κ_k pagal tokią išraišką:

$$\theta_i - \tau_{t0} = (\zeta_i - \tau_{t0}) + r(\kappa_i - \tau_{k0}), \tag{4.21}$$

čia r – koreliacijos koeficientas, ζ_i *ir* κ_i yra nepriklausomi atsitiktiniai dydžiai. Šią išraišką galima lengvai pertvarkyti į tokio pavidalo lygtį:

$$\theta_i = \zeta_i + r(\kappa_i - \tau_{k0}). \tag{4.22}$$

Tada bendra balso ir tylos intervalo trukmė yra:

$$\theta_k + \kappa_k = \zeta_k + (1+r)\kappa_k - r\tau_{k0}. \tag{4.23}$$

Dviejų atsitiktinių dydžių sumos tikimybių tankio funkcija *W(y)*, kaip žinoma, išreiškiama atskirų dydžių dvimate funkcija $w_2(x,y)$:

$$W(y) = \int_{-\infty}^{\infty} w_2(u, y-u)du\,. \tag{4.24}$$

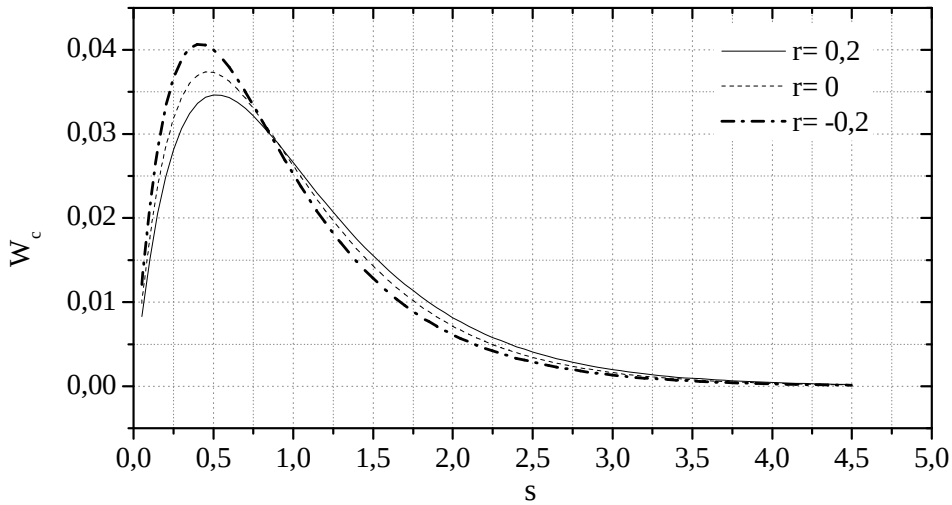
Norint šią formulę pritaikyti balso ir tylos intervalo trukmei, apskaičiuotai pagal išraišką (4.12), išreikšti, reikia atlikti tam tikrą korekciją, t. y. atmesti vidurkio pataisą ($-r\tau_{k0}$). Modifikuota balso ir tylos ciklo išraiška atrodo taip:

$$\chi_k = \zeta_k + (1+r)\kappa_k. \tag{4.25}$$

Manant, kad dydžių ζ ir κ tikimybių tankio funkcijos atitinkamai yra (4.14) ir (4.15) išraiškos (kalbos intervalo trukmės vidurkis yra $\tau_{k0} = 1/\mu$, o tylos ζ vidurkis yra $\tau_{t0}=1/\lambda$), tada atsitiktinio dydžio χ tikimybių tankio funkcija išreiškiama šia formule:

$$
\begin{aligned}
W_c(t) &= \int_0^t \lambda \exp\{-\lambda u\} \frac{\mu}{1+r} \exp\{-\frac{\mu}{1+r}(t-u)\} du = \\
&= \frac{\lambda\mu}{1+r} \exp\{-\frac{\mu}{1+r} t\} \int_0^t \exp\{-\lambda u + \frac{\mu}{1+r} u\} du = \\
&= \frac{\lambda\mu}{1+r} \exp\{-\frac{\mu}{1+r} t\} \frac{1}{\lambda - \mu/(1+r)} \{1 - \exp\{-\lambda t + \frac{\mu}{1+r} t\}\} = \\
&= \frac{\lambda\mu}{(1+r)\lambda - \mu} \{\exp(-\frac{\mu}{1+r} t) - \exp(-\lambda t)\}.
\end{aligned}
\tag{4.26}
$$

Šios funkcijos grafikai, kuriuose $\tau_{t0} = 650$ ms ir $\tau_{k0} = 352$ ms, pateikiami 4.18 paveiksle. Čia matyti, kad šiuose grafikuose vaizduojamos kreivės yra panašios į ilgalaikių tylos intervalų pasiskirstymo grafikus (4.13 paveikslas). Keičiant koreliacijos indeksą, gaunamos tokios standartinės deviacijos reikšmės: σ = 1,5069 s, kai r = 0, σ = 1,643 s, kai r = 0,2, σ = 1,3896 s, kai r = – 0,2. Matyti, kad neigiama balso ir tylos intervalų tarpusavio koreliacija mažina periodo trukmės sklaidą.



4.18 pav. Balso – tylos periodų pasiskirstymo funkcija

Dydžio χ vidurkis skaičiuojamas pagal išraišką:

$$
M\{\chi\} = \int_0^\infty t W_c(t) dt = \frac{\lambda\mu}{(1+r)\lambda - \mu} \left\{ \frac{(1+r)^2}{\mu^2} - \frac{1}{\lambda^2} \right\} = \frac{1}{\lambda\mu} [(1+r)\lambda + \mu]. \tag{4.27}
$$

Tylos ir balso intervalų vidutinės trukmės, kaip minėta, nagrinėtos daugelyje šaltinių ir šiame darbe pažymėtos atitinkamai $\tau_{t0} = 1/\lambda$ ir $\tau_{k0} = 1/\mu$. Atsitiktinio dydžio χ vidurkis, išreiškiamas per τ_{t0} ir τ_{k0} vertes, yra lygus:

$$M\{\chi\} = (1+a)\tau_{k0} + \tau_{t0}\,. \tag{4.28}$$

Įvertinus formulės (4.26) korekciją ($-\,r\,\tau_{k0}$), balso ir tylos periodo vidutinė trukmė yra:

$$M\{\Theta + \kappa\} = M\{\chi\} - r\,\tau_{ko} = \tau_{k0} + \tau_{t0}\,. \tag{4.29}$$

Tai akivaizdus rezultatas, nes atsitiktinių dydžių vidurkiai nepriklauso nuo koreliacijos.

4.2.4 Balso srautų generavimas

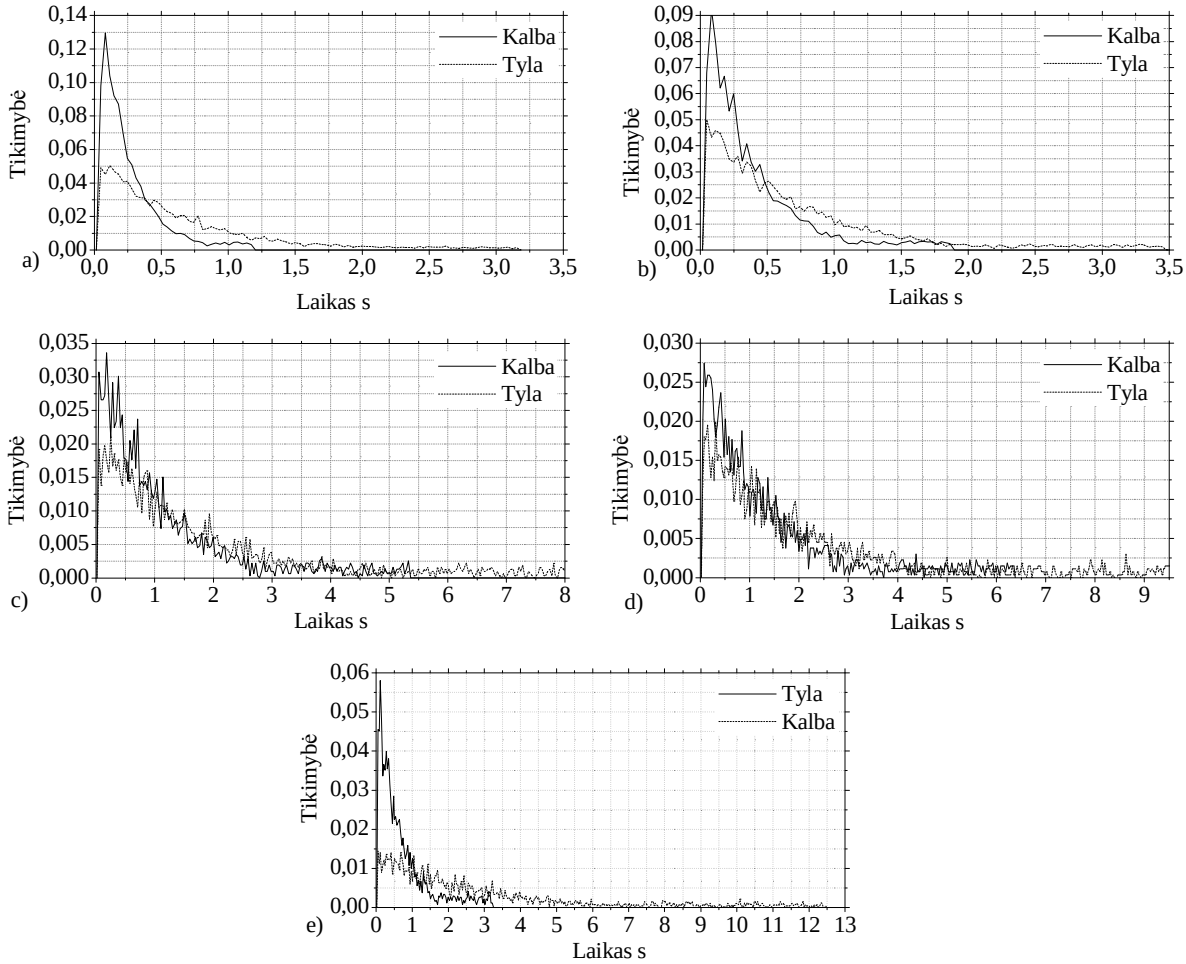
Balso paketų srautų generavimui šio darbo metu sukurta programinė įranga `voicesim`, kurios išeities tekstas, bei naudojimosi instrukcija pateikiama 1 priede. Programa parašyta C programavimo kalba Unix operacinės sistemos terpei. Programą sudaro virš 2000 išeities teksto eilučių

Programa generuoja balso paketų srautą nustatytam kanalų skaičiui bei įvairiems balso kodavimo algoritmams. Balso srautas generuojamas naudojant kalbos aktyvumo detektorių su užsiduotu kalbos aktyvumo rodikliu bei koreliacija. Generuojant balso srautą su VAD detektoriumi, kalbos ir tylos intervalų trukmės yra pasiskirsčiusios pagal eksponentinį dėsnį. Atsitiktinis eksponentinis pasiskirstymas yra generuojamas naudojantis atvirkštinės transformacijos (*angl. inverse transoformation*) metodu. Tokį pasirinkimą lėmė metodo paprastumas, nes yra žinoma pasiskirstymo matematinė išraiška. Kiti atsitiktinių skaičiaus generavimo pagal tam tikrą dėsnį metodai, tokie kaip: atmetimo (*angl. rejection*), skaldymo (*angl. decomposition)* ir t. t., yra arba sudėtingi, arba naudojami tada, kai matematinė pasiskirstymo funkcijos išraiška nežinoma [129].

Su `voicesim` sugeneruoti kalbos srautų balso ir tylos pasiskirstymai pateikiami 4.17 pav. Modeliavimo pradiniai parametrai yra tokie: kalbos trukmė 5 min, balso šaltinių skaičius 30, visos kalbos prasideda 5 s laiko tarpe, atsitiktine tvarka ir atsitiktiniu vėlavimu, balso kodavimo algoritmas G.723.1 6,3 kb/s, balso ir tylos vidutinės trukmės paimtos iš 4.3 lentelės 2–6 stulpelio, koreliacija tarp balso ir tylos –0,05, modeliavimo rezultatai pagal šiuos duomenis atitinkamai pateikiami 4.19 pav. a–e grafikuose.

Kaip matyti iš pateiktų histogramų, `voicesim` programos generuojamų balso paketų srauto balso ir tylos intervalai pasiskirstę pagal eksponentinį dėsnį, o pasiskirstymo

trukmės priklauso nuo pasirinkto kalbos aktyvumo rodiklio. Šią programą tinka naudoti kaip kalbos paketų generatorių sprendžiant tolimesnius modeliavimo uždavinius. Siaurinant tyrimų objektą, duomenų kiekis buvo sumažintas iki 4.19 pav. c) variante aprašyto balso duomenų srauto, nes jo kalbos aktyvumo rodiklis atitinka P.59 rekomendacijoje pateikiamą vertę, kurią taip pat rekomenduoja straipsniai [130 – 132].



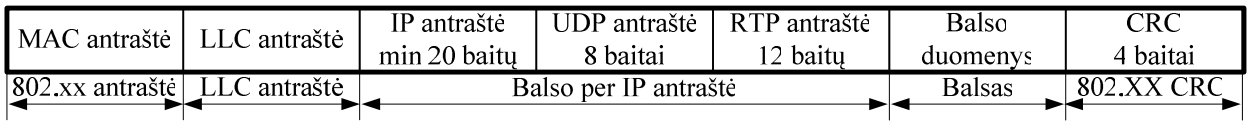
4.19 pav. Balso paketų trukmių pasiskirstymas: a) atveju τ_{k0} = 0,2554, τ_{t0} = 0,6381, q = 0,2859; b) atveju τ_{k0} = 0,3897, τ_{t0} = 0,6995, q = 0,3578, c) atveju τ_{k0} =1,1235, τ_{t0} = 1,7855, q = 0,3862; d) atveju τ_{k0} =1,3725, τ_{t0} = 2,0339, q =0,4029; e) atveju τ_{k0} =2,6629, τ_{t0} = 0,6903, q = 0,7941

4.2.5 Balso perdavimo WLAN tinklu efektyvumo tyrimai

Balso paketai po vieną ar po kelis įterpiami į konkretaus tinklo protokolais nustatytus rėmus, t. y. į tinklo paketus. Į tuos pačius rėmus dar įterpiami ir kiti duomenys, reikalingi ryšio seansui sukurti bei valdyti. Kadangi perduodant balsą toleruojamas tam tikras prarastų

paketų kiekis, tai perduodant balsą IP tinklais kaip transportinis protokolas yra naudojamas UDP [133].

Apibendrinta balso paketo, perduodamo IEEE 802.3x ar 802.11x tinklais, struktūra pateikiama 4.20 paveiksle. Prie kalbos duomenų paketo dar pridedami papildomi duomenys: MAC antraštė (protokolo MAC 802.xx antraštė kartu su fizinio lygmens preambule bei antrašte), LLC bei tinklinių IP, UDP ir RTP protokolų antraštės, kurios vadinamos vienu bendru pavadinimu – IP antraštė, ir klaidų aptikimui reikalinga kontrolinė suma (*angl. Cyclic Redundancy Check* – CRC). Apibendrinta paketo struktūra, kai naudojamas realaus laiko duomenų transportavimo protokolas su paketų antraščių kompresija (*angl. Commpresses Real Time Protocol* – CRTP) [134], pateikiama 4.21 pav. Šiuo atveju vietoje IP, UDP ir RTP paketų perduodamas CRTP paketas, kurio dydis sudaro vos 4 baitus, jei naudojama klaidų korekcija, ir 2 baitus, jei nėra. Būtina pažymėti, kad CRTP protokolą galima taikyti tik „taškas – taškas“ sujungimui. Jei balso paketas turi keliauti per keletą stočių, tada kiekviename maršruto punkte kiekvienas paketas turi būti atskirai išpakuojamas ir supakuojamas iš naujo prieš siunčiant jį į kitą stotį.



4.20 pav. Balso perdavimo IEEE 802.3x ir 802.11x tinklais paketų struktūra, nenaudojant paketų antraščių kompresijos

4.21 pav. Balso perdavimo IEEE 802.3x ir 802.11x tinklais paketų struktūra, naudojant paketų antraščių kompresiją

Kaip teigia gerai žinoma ITU G.114 rekomendacija, leistinas balso vėlinimas į vieną pusę gali būti 0–150 ms (toks vėlinimas priimtinas daugumai vartotojų [135]). Todėl, projektuojant VPT bene svarbiausiu tinklo apkrovą ribojančiu faktoriumi tampa leistina balso paketų perdavimo vėlinimų riba. Skaičiuojant maksimalų balso kanalų skaičių (o pagal jį galima vertinti ir perdavimų vėlinimą) tikslinga pasinaudoti (2.3–2.6) išraiškomis. Balso perdavimo atveju $t_{TCP/IP}$ laikas nusakomas balso paketo antraščių perdavimo trukme, kuri lygi:

$$t_{TCP/IP} = t_{VoIP} = t_{IP}+t_{UDP}+t_{RTP}; \text{ nenaudojant kompresijos,} \quad (4.30)$$

ir

$$t_{TCP/IP} = t_{VoIP} = t_{CRTP};\ \text{naudojant kompresiją,} \tag{4.31}$$

čia: t_{IP}, t_{UDP}, t_{RTP}, t_{CRTP} – IP, UDP, RTP ir CRTP paketų antraščių perdavimo laikai.

Balso perdavimo WLAN tinklu efektyvumo tyrimai. Pasirinkto kodavimo būdu (žr. 4.4 lentelė) suformuotus balso paketus į nagrinėjamo standarto tinklo paketus galima įterpti po vieną arba po kelis – N_b. Kadangi balsas, kaip procesas, vyksta realiame laike, tai įterpiant po keletą paketų, svarbu atsižvelgti į jų vėlinimą. Planuojant, kad VPT gali tapti tarptautinių tinklų dalimi, leistiną maksimalią vėlinimo normą būtina riboti iki 150 ms. Šiame darbe pagal pasirinktą kalbos kodavimo algoritmą perduodamų kalbos intervalų trukmė yra 30 ms. Tačiau kalbos kodavimui bei dekodavimui ir paketų perdavimui yra būtini papildomi laiko intervalai, todėl bendras vėlinimas VPT tinkle yra didesnis už 30 ms.

Vienam kalbos paketui perduoti būtino laiko intervalo trukmė T_p išreiškiama formule (3.6). Padauginus šią trukmę iš konkretaus kalbos kodavimo algoritmo reikalaujamų perduoti kalbos paketų dažnio, V_p , gaunamas bendras laikas a_s:

$$a_s = V_p \cdot T_p, \tag{4.32}$$

kuris, išreikštas sekundės dalimis, parodo, kokią nagrinėjamo tinklo laidumo dalį tenka išskirti vienam kalbos signalui perduoti. Šis parametras gali būti traktuojamas kaip vieno balso signalo sukuriama tinklo apkrova. Atvirkštinis dydis C_t:

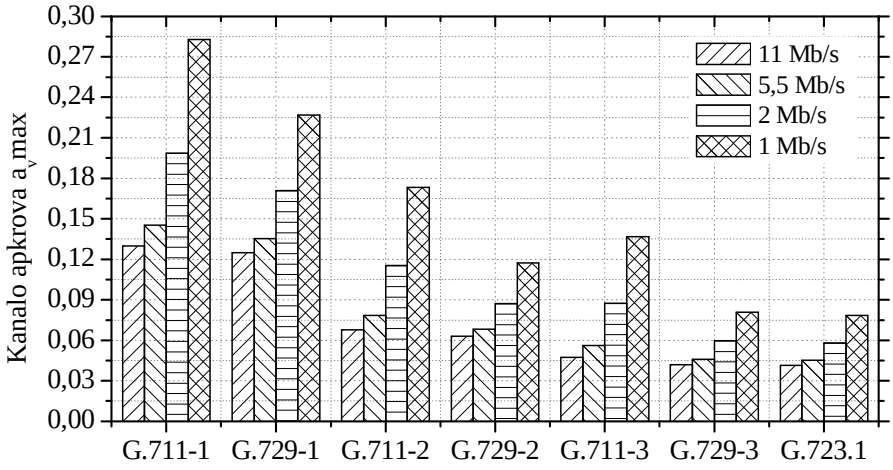
$$C_t = \frac{1}{a_s} \tag{4.33}$$

gali būti laikomas nagrinėjamo tinklo teorine laidumo riba, t. y. vienu metu perduotinų kalbos signalų kiekiu. Realistiškesnė laidumo išraiška gaunama įvertinus empirinius koeficientus [136]:

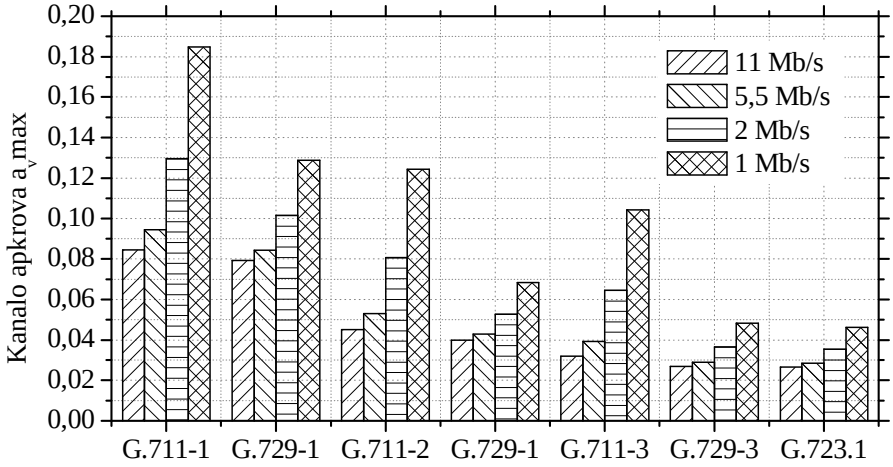
$$C_t = \frac{(0,5\ -\ 0,7)}{a_s}. \tag{4.34}$$

Didžiausia kanalo apkrova a_{vmax} atsiranda tuo atveju, kai, perduodant kalbą, nėra naudojamas CRTP protokolas. Kanalo apkrovos priklausomybė nuo kalbos kodavimo algoritmų parodyta 4.22 pav., pagal kurį kanalo apkrova labiau priklauso nuo paketo formavimo laiko τ_0, t. y. siunčiamų paketų skaičiaus nei nuo kalbos kodavimo algoritmo. Iš

paveikslo matyti, kad kai paketų formavimo laikas trumpas, t. y. 10 ms (G.711–1), kanalo apkrova padidėja 2,75 karto lyginant su ilgu formavimo laiku (G.711–3).



4.22 pav. IEEE 802.11b kanalo apkrova a_v, naudojant RTS/CTS be CRTP



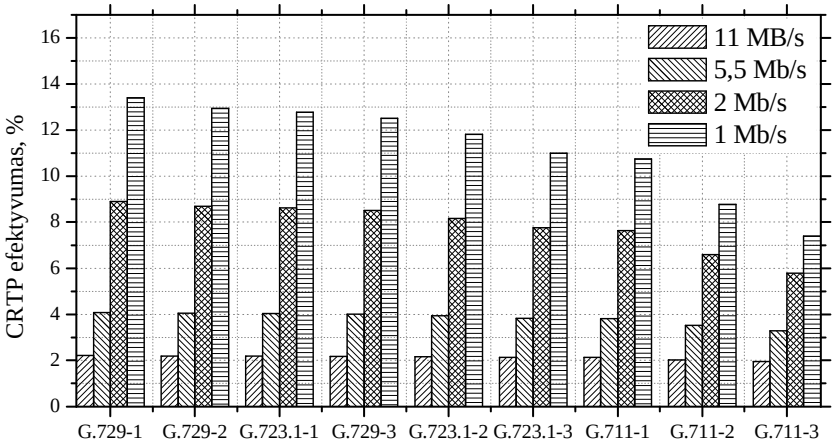
4.23 pav. IEEE 802.11b kanalo apkrova a_v be RTS/CTS su CRTP

Mažos apimties tinkluose yra įmanoma eksploatuoti IEEE 802.11 standarto tinklą, nenaudojant RTS/CTS rezervavimo protokolo, bet naudojant CRTP kompresavimo algoritmą. Šiuo atveju susikuria minimali kanalo apkrova pavaizduota 4.23 paveiksle. Pagal šį paveikslą kanalo apkrova yra mažesnė nei didelės apimties vartotojų tinkluose.

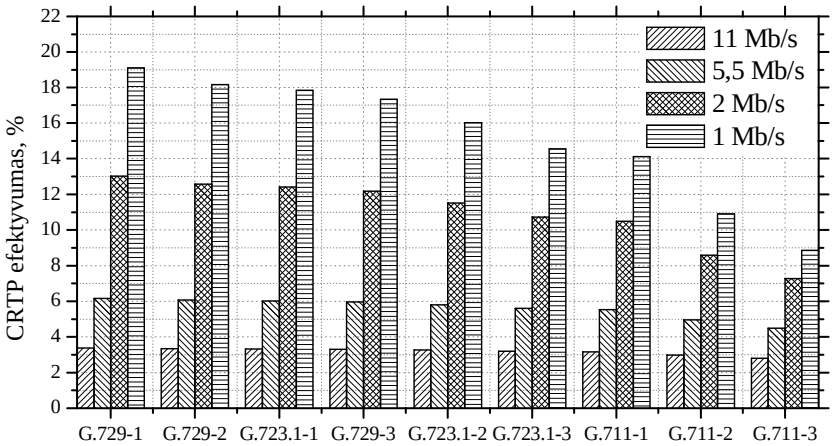
Pateiktame grafike akivaizdžiai matosi CRTP protokolo efektyvumas. Jis apskaičiuojamas pagal žemiau pateiktą išraišką:

$$E = \frac{a_v - a_{vCRTP}}{a_v} 100 . \tag{4.35}$$

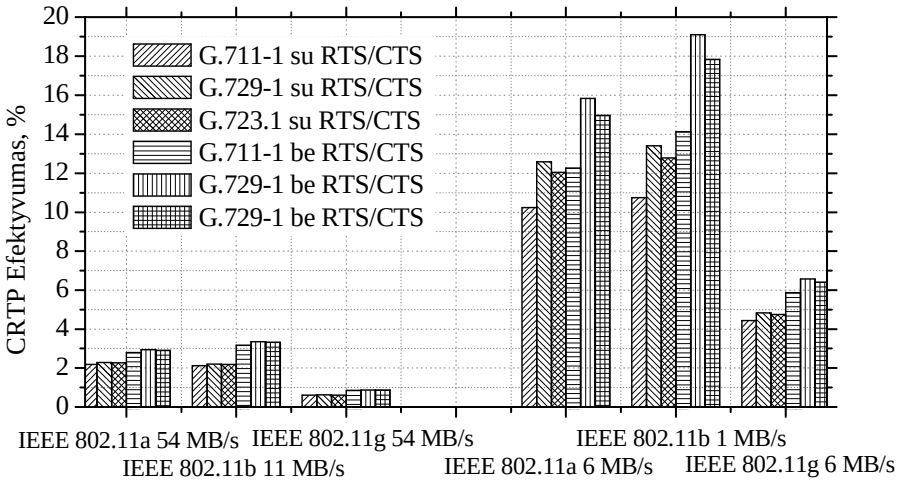
Grafikuose 4.24 ir 4.25 vaizduojamas CRTP protokolo efektyvumas IEEE 802.11 tinkle, kai RTS/CTS mechanizmas naudojamas (4.24 pav.) ir kai nenaudojamas (4.25 pav.).



4.24 pav. CRTP protokolo efektyvumas IEEE 802.11b tinkle naudojant RTS / CTS

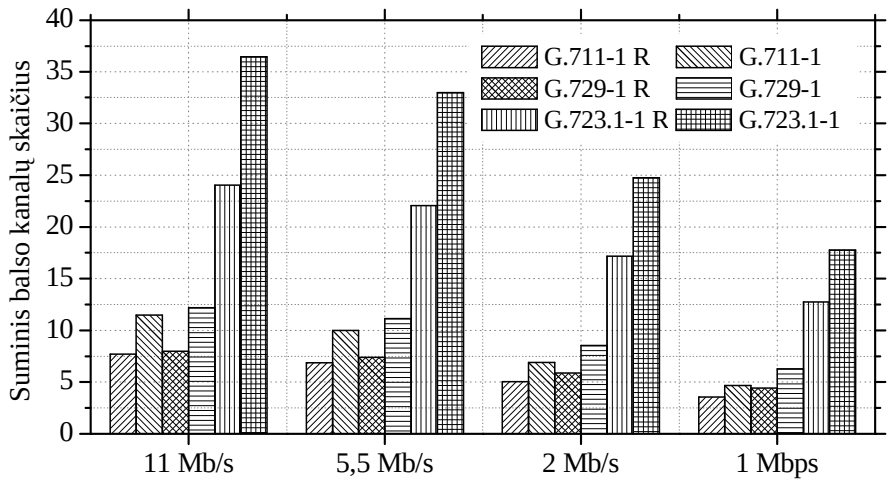


4.25 pav. CRTP protokolo efektyvumas IEEE 802.11b tinkle nenaudojant RTS / CTS

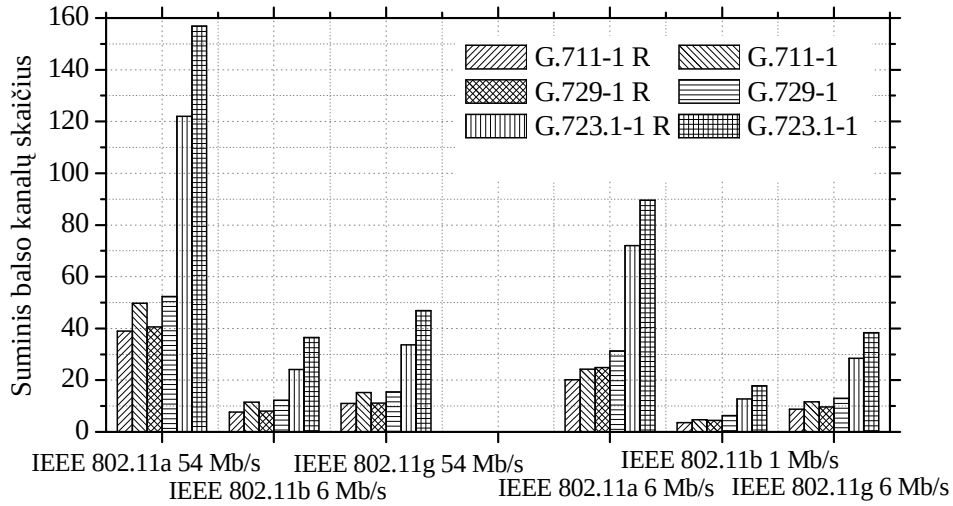


4.26 pav. CRTP protokolo efektyvumo priklausomybė nuo fizinio lygmens protokolo[6]

[6] Šiame skyriuje IEEE 802.11g standarto skaičiavimuose naudota CCK/OFDM moduliacijos schema. Kai šis standartas naudojamas su OFDM moduliacijos schema, tai jo rezultatai yra tapatūs IEEE 802.11a standarto rezultatams.



4.27 pav. IEEE 802.11b kanalo pralaidumas



4.28 pav. IEEE 802.11a ir b bei g kanalo pralaidumas

Iš šių grafikų matyti, kad, kai balsas perduodamas IEEE 802.11x tinklais naudojant CRTP protokolą, kanalo apkrova sumažėja nuo 4 iki 20 %. Šio protokolo santykinis efektyvumas didėja mažėjant perdavimo spartai. Tačiau CRTP protokolas gali būti naudojamas tik „taškas - taškas“ sujungimuose.

Teorinio tinklo laidumo arba suminio kalbos kanalų skaičiaus priklausomybė nuo kanalo spartos ir balso kodavimo algoritmo apskaičiuojama pagal (4.33) išraišką pateikiama 4.27–4.28 paveiksluose. Perdavimai, kurie atliekami naudojant RTS/CTS kanalo rezervavimą, yra pažymėti simboliu „R“. Iš grafikų matyti, kad didėjant perdavimo spartai, didėja ir kanalo pralaidumas. Tačiau IEEE 802.11g standarto tinkluose, net naudojant 54 Mb/s perdavimo

spartą, kanalo laidumas yra 3,5 karto mažesnis nei IEEE 802.11a tinkluose dėl ilgos preambulės, perduodamos 1 Mb/s sparta.

4.3 Skyriaus išvados

Šioje darbo dalyje detaliai nagrinėjamas kalbos ir duomenų perdavimas WLAN tinklais. Tyrimo metu buvo atlikta duomenų šaltinių, jų modelių ir charakteristikų analizė bei kalbos šaltinių, jų specifikos, modelių ir talpumo vertinimai. Be to, siekiant nustatyti duomenų ir kalbos šaltinių charakteristikas, atlikti eksperimentai tinkle, panašiame į vartotojų prieigų tinklą. Tyrimų pagrindu daromos šios išvados:

1. vartotojų prieigų tinkluose sukuriamas duomenų srautas gali būti aprašytas „paketų traukinio“ ir automodeliais, bet ne Puasono modeliu;
2. eksperimentiškai ištirtuose tinkluose 50% perduodamų paketų skaičiaus sudaro paketai, kurių dydis yra iki 100 baitų. Taigi daroma išvada, kad vartotojų prieigų tinkluose perduodama daug mažų paketų;
3. vartotojų prieigų tinklų duomenų srautams santykinai mažuose laiko intervaluose būdingos automodelio savybės, nors Hersto parametras nėra didelis. Dideliuose laiko intervaluose (valandų eilės) Hersto parametro vertė tampa tipiška, kaip ir kituose duomenų perdavimo tinkluose;
4. ištyrus automodelio duomenų srautus generuojančią programinę įrangą, nustatyta, kad dirbtinai sintezuojamo srauto automodelio charakteristikos yra artimos eksperimentiškai tirtų srautų charakteristikoms;
5. išnagrinėjus balso aktyvumo intervalų modelius ir atlikus eksperimentinius tyrimus, nustatyta, kad prielaidos apie eksponentinius balso bei tylos intervalų trukmių skirstinius yra iš dalies pagrįstos;
6. nustatyta, kad gretimų balso signalų kalbos ir tylos intervalų trukmės yra koreliuotos, koreliacijos koeficientas dažniausia yra neigiamas, dėl to mažėja balso ir tylos periodo dispersija;
7. sukurta ir ištirta programinė įranga, pagal patikslintą modelį generuojanti balsą imituojantį srautą. Nustatyta, kad dirbtinai generuojamo srauto charakteristikos yra tokios pat, kaip ir eksperimentiško tirto balso;
8. perduodant balsą IEEE 802.11 tinklais, kanalų laidumas naudojamas labai neefektyviai;
9. perduodant balsą IEEE 802.11b protokolo tinklu, sudėtingi balso kodavimo algoritmai (G.723.1, G.729) yra mažai efektyvūs, kanalo apkrova, lyginant su G.711 algoritmu, mažėja nežymiai;

10. rekomenduotina VPT tinkluose taikyti G.711 balso kodavimo būdą, o balso paketus perduoti sublokuotus po 240 ir daugiau baitų;

11. apibendrinus atliktus tyrimus, galima teigti, kad vartotojų prieigų tinklai WLAN technologijų pagrindu gali funkcionuoti, tačiau tinklo resursai naudojami neefektyviai Siūloma paplitusią WLAN įrangą papildyti perduodamų duomenų srautų apdorojimo (rūšiavimo, grupavimo bei multipleksavimo) priemonėmis, gerinančiomis kanalo laidumo panaudojimą.

5 WLAN ADAPTACIJA VARTOTOJŲ TINKLAMS

5.1 Geresnio ryšių kanalo naudojimo būdai

Antrame skyriuje parodyta, kad pagrindinis WLAN rodiklis yra fizinis kanalo laidumas, kuris realiai gana ribotas (ženklią jo dalį užima MAC antraštės, laiko intarpai SIFS, DIFS, RTS/CTS bei ACK paketai) ir yra žymiai mažesnis už analogiškų fiksuoto ryšio tinklų laidumą. Be to, dėl WLAN specifikos ryšio kanalo naudojimo efektyvumas labai priklauso ir nuo perduodamų duomenų paketų apimties. Efektyvumas didesnis perduodant didelės apimties paketus ir akivaizdžiai sumažėja perduodant trumpus paketus.

Trečio skyriaus medžiaga rodo, kad šiuolaikinių informacinių technologijų vartotojai sukuria bendruose duomenų srautuose kaip tik daug trumpų paketų, kuriuos perduodant tiesiogiai kanalo laidumas labai neracionaliai panaudojamas. Kita vertus, didėjant kanalo apkrovai, didėja perduodamų paketų vėlinimai. Deja, vėlinimų pokyčiai (nuokrypos nuo periodinės sekos) neigiamai veikia balso kokybę (ITU normos nustato leistiną 150 ms vėlinimų ribą).

Ankstesniuose skyriuose išsakytos mintys – tai motyvai WLAN įrenginių racionalesnio panaudojimo galimybių paieškai. Šiame skyriuje nagrinėjamos galimybės bei nepanaudoti būdai, leidžiantys sumažinti perduodamų paketų kiekį, o taip pat siūlomas specialus paketų multipleksavimo būdas, grupuojantis mažus balso ir duomenų paketus į bendrus perdavimo kadrus.

Sprendžiant taikomuosius uždavinius WLAN, įrangos naudojimo efektyvumą galima pagerinti perduodamų duomenų srautus pritaikant WLAN specifikai, t. y. koreguoti aukštesnių OSI lygmenų (pradedant nuo tinklo lygmens) protokolus.

WLAN tinklais duomenys perduodami kadrais. Kiekvieno kadro struktūra identiška: antraštė ir duomenų paketas. Tokia struktūra nulemia ir galimas adaptacijos priemones: duomenų kompresiją, panaikinant perteklinę informaciją, ir multipleksavimas. Kompresuoti galima tiek antraštes, tiek pačius duomenis. Multipleksuojami kadrai stambinami, maži duomenų paketai apjungiami į vieną kadrą, taip mažinamas perduodamų antraščių kiekis ir kartu didinamas kanalo išnaudojimo efektyvumas.

Fizinis WLAN ryšių kanalas apibūdinamas perdavimo sparta. Perduodant atskirą kadrą, fizinis kanalas užimamas laikotarpį T_f. Į jį įskaičiuojami visi su paketo perdavimu susiję laikai, todėl jis vadinamas kartotinio perdavimo laiku (*angl. repetition time*). Nagrinėjant multipleksavimo bei kompresijos priemones, laikai $T_{mux}(n)$ ir T_{pkomp} atitinkamai išreiškia kanalo užėmimo laikus perduodant n apjungtų paketų ir viena kompresuotą paketą.

Papildomų priemonių panaudojimo efektyvumą tikslinga vertinti tam tikru santykiniu rodikliu, parodančiu, kiek kartų panaudota priemonė (multiplekseris ar kompresavimo priemonė) padidina realią tinklo (kanalo) talpą.

5.1.1 Duomenų srautų kompresijos būdai

Kompresijos objektu gali būti vartotojų duomenys ir-arba protokolų antraštės. Šiuolaikiniuose modemuose jau senai naudojami V.42bis ir V.44 duomenų kompresijos standartai. Balsui perduoti taip pat naudojami kodavimo-kompresijos algoritmai [112 – 114], mažinantys balso duomenų srautą nuo 64 kb/s iki 32–5.3 kb/s. WWW duomenų srauto, perduodamo HTTP/1.1 protokolu, mažinimui yra naudojami specialūs duomenų kompresijos algoritmai [137, 138]. Interneto srauto mažinimui yra sukurtas ipcomp protokolas [139], kompresuojantis IP pakete esančius duomenis, šio protokolo efektyvumo analizė pateikiama [140].

Paketų antraščių pertekliškumui mažinti naudojama antraščių kompresija. Jos veikimo principas yra pagrįstas antraščių laukų, kurie duomenų perdavimo sesijos metu nesikeičia, pakeitimu trumpesne bitų seka. Tai ypač aktualu lėtuose ryšio kanaluose [141, 142].

Labiausiai paplitęs paketų antraščių kompresavimo protokolas, naudojamas perduodant balsą per IP tinklus, yra CRTP. Šis protokolas remiasi ta aplinkybe, kad, perduodant balsą, pokalbio metu, IP ir UDP paketų antraščių laukai nekinta, todėl vienos sesijos metu juos galima pakeisti trumpesne bitų seka. Tokiu būdu CRTP protokolas iš 40 baitų IP/UDP/RTP paketų antraščių padaro 2 baitų antraštę, kai nenaudojama klaidų korekcija, ir 4 baitų antraštę, kai klaidų korekcija yra. Naudojant CRTP protokolą, antraščių dydis sumažėja 10 – 20 kartų. Tačiau CRTP turi keletą esminių trūkumų: pirma, jis veikia tik „taškas – taškas“ sujungimuose, ir antra, jo efektyvumas mažėja, didėjant kanalo klaidų dažniui [143]. Todėl standartas tobulinamas tam, kad būtų mažinamas jo jautrumas paketų dingimui bei galima būtų perdavinėti duomenis per keletą stočių [144 – 146].

5.1.2 Paketų multipleksavimas

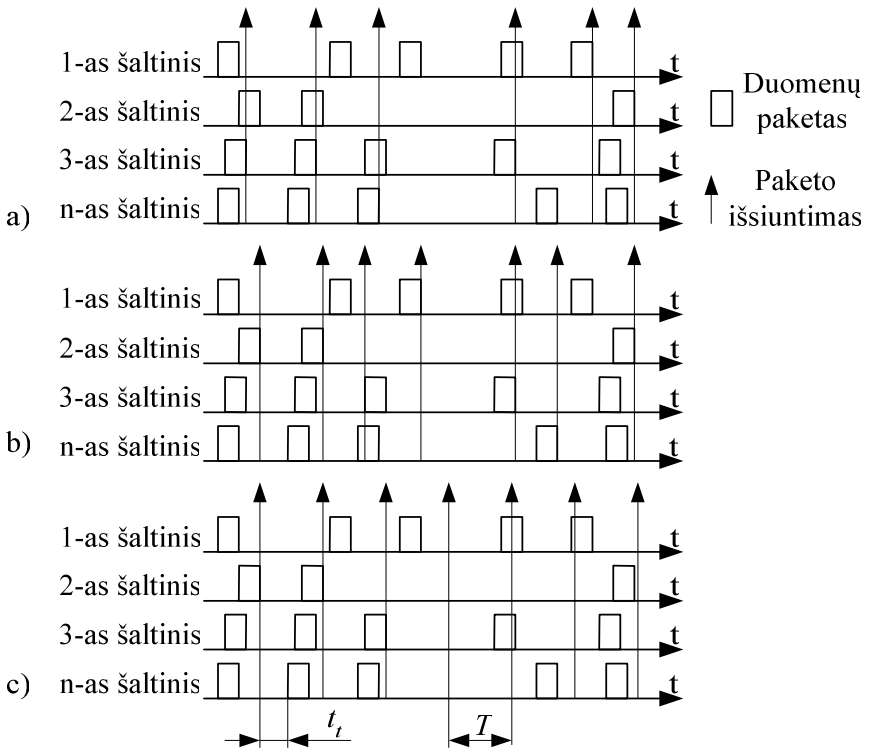
Multipleksavimas – *n* mažesnių paketų apjungimas į vieną paketą, kuris talpinamas į tinklo kadrą ir perduodamas ryšio kanalu. Tokiu būdu mažinamas tinklo kadrų skaičius. Kadangi kiekvienam kadrui perduoti reikalinga antraštė, tai multipleksuojant perduodamų kadrų ir jų antraščių skaičius mažinamas. Radijo kanalo naudojimo efektyvumas multipleksuojant didėja ne tik dėl mažesnio kadrų antraščių kiekio, bet ir dėl sumažėjusių laiko tarpų tarp kadrų.

Multipleksavimo idėja nėra nauja. Telefonijoje multipleksavimo metodai buvo pradėti naudoti 6–ajame dešimtmetyje ir iki šiol yra plačiai taikomi. Iš pat pradžių buvo naudojamas dažninis sutankinimas, vėliau jį pakeitė laikinis sutankinimas. Labiausiai paplitę kanalų multipleksavimo standartai telefonijoje yra T1/E1 [147]. Tuo tarpu pirmieji multipleksavimo protokolai, skirti duomenų perdavimui, sukurti tik 1979 metais [148, 149]. Tačiau šie protokolai neprigijo ir nebuvo vartojami.

Multipleksavimo principai ir metodai. Multipleksavimo metodus galima sisteminti pagal kadro formavimo taisykles (požymius), grupuojamų duomenų šaltinių kiekį, duomenų šaltinių tipą bei jų veikimo vietą OSI modelio lygmenyse. Pagal požymius, kuriais remiantis paketai yra formuojami ir išsiunčiami, multipleksavimo metodus galima skirstyti į [150]:

1. fiksuoto kadro dydžio (požymis – buferio dydis *L* yra fiksuotas);
2. kintančio kadro dydžio (požymis – buferio dydis *L(M,A)* yra dinamiškai kintantis);
3. periodinės sekos (požymis – laikas *T* yra fiksuotas);
4. kombinuotas būdas, apjungiantis 1–ą ir 3–ią požymius kartu.

Čia *M* – paketų skaičius, *A* – srauto intensyvumas, kuris, perduodant balsą, atitinka kalbos aktyvumo rodiklį. Visi išvardinti metodai yra naudotini, tačiau jie turi ir savitų, specifinių trūkumų, ribojančių jų tinkamumą vartotojų tinklams.



5.1 pav. Multipleksavimo buferio išsiuntimo variantai: a) esant fiksuotam buferio dydžiui *L*, b) dinamiškai keičiant maksimalų buferio dydį *L(M,A)*, c) išsiunčiant buferio turinį periodiniais laiko tarpais)

Pirmu atveju paketas yra išsiunčiamas tada, kai multipleksavimo buferio dydis viršija reikšmę *L* (5.1 paveikslas, a). Kai duomenų srautas nėra intensyvus, reikia ilgo laiko tarpo tam, kad buferis užsipildytų. Taigi esminis šio metodo trūkumas – ženklus vėlinimas, kuris priklauso nuo tinklo apkrovos kitimo.

Antras variantas šiuo atžvilgiu yra lankstesnis, nes čia kadro dydis keičiasi priklausomai nuo funkcijos *L(M,A)* reikšmės, kuri nusako mažų paketų, sugeneruotų per tam tikrą periodą (pavyzdžiui, balso kodavimo algoritmo periodą), skaičių taip, kad vėlinimo laikas būtų minimalus (5.1 paveikslas, b).

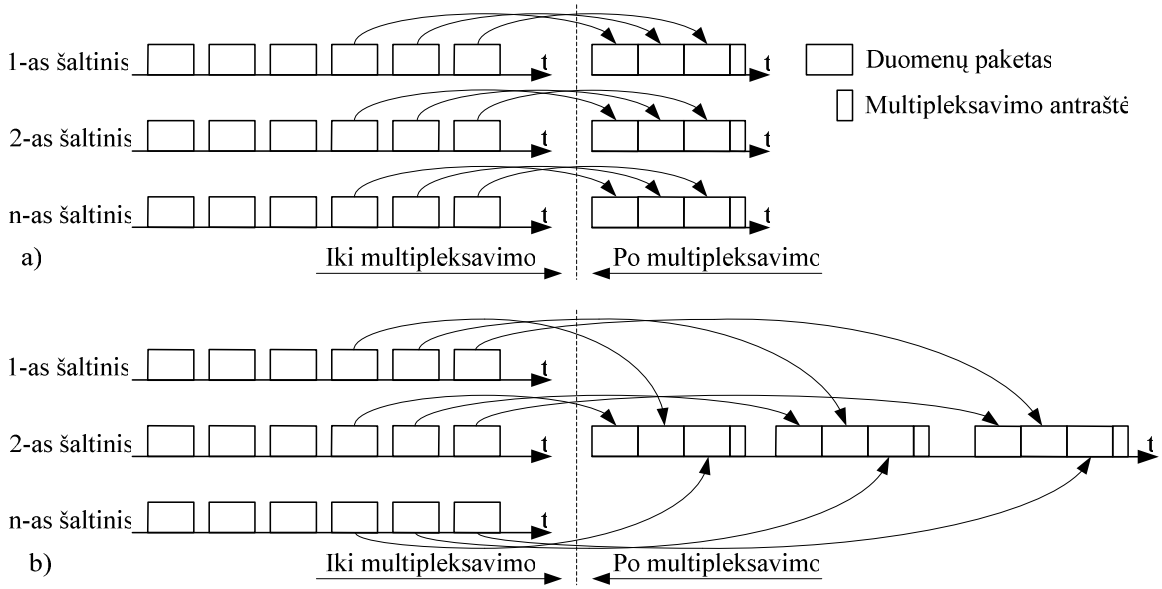
Trečiuoju atveju, apsprendžiant kadro išsiuntimo laiką, yra naudojami periodiniai laikmačiai (5.1 paveikslas, c). Dažniausiai yra naudojamos fiksuotos laiko vertės *T*. Laikmačiui baigus skaičiuoti šį laiką, multipleksavimo buferio turinys yra išsiunčiamas. Yra apskaičiuota, kad, perduodant balsą, antras arba trečias metodai yra efektyviausi [150].

Ketvirto metodo veikimo principas pasižymi tuo, kad paketas išsiunčiamas esant bent vienai iš šių sąlygų: arba kai buferio dydis pasiekia reikšmę *L*, arba kai pasibaigia laikmačio laikas *T*. Anksčiau minėtame darbe teigiama, kad ketvirto metodo efektyvumas yra mažesnis dėl griežtai periodinių laiko tarpų, kadangi net buferiui esant tuščiam, taimeris vis tiek skaičiuoja laiką t_t. Tačiau šis metodas garantuoja mažiausią vėlinimą esant didelei apkrovai.

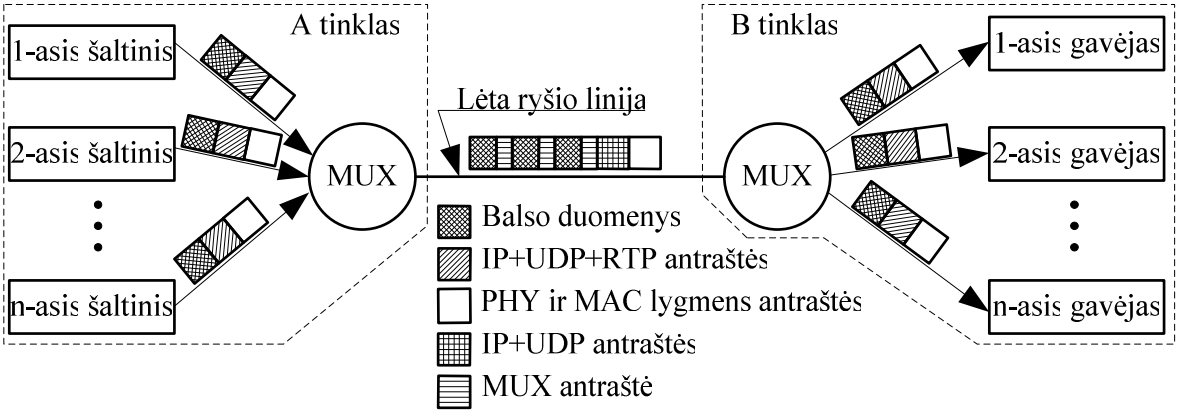
Kitas požymis, pagal kurį galima klasifikuoti multipleksavimo metodus, yra grupuojamų duomenų šaltinių kiekis. Grupuojami vieno arba daugelio šaltinių paketai. Toks grupavimas, kai grupuojami tik vieno šaltinio paketai, vadinamas „surišimu“ (*angl. bundled*) (5.2 paveikslas, a). Jis naudojamas standartiniame RTP protokole. Šiuo atveju į vieną paketą yra talpinami keli sugrupuoti to paties šaltinio duomenų blokai [133]. Tam, kad susikauptų reikiamas to paties šaltinio paketų kiekis, kartais tenka laukti ilgą laiko tarpą, o tai didina vėlinimą [151]. Siekiant pagerinti kanalo išnaudojimą ir nepabloginti kalbos kokybės, tenka riboti sugrupuotų kanalų kiekius.

Grupuojant skirtingų šaltinių paketus (5.2 paveikslas, b), pasiekiamas žymiai didesnis efektyvumas [133], tačiau dėl srautų, generuojamų skirtingų šaltinių, gaunama tirtis (*angl. jitter*). Be to, perduodant multipleksuojamus paketus tinklu, jų IP antraštės paslaugų tipo laukai yra ignoruojami, nes juos pakeičia vienas sugrupuoto kadro IP antraštės laukas. Detali tokio multipleksavimo schema su paketų struktūra pateikiama 5.3 paveiksle.

Multipleksavimo įrenginiai gali būti įrengiami VoIP telefonuose bei kelvedžiuose arba balso sąsajose (*angl. Voice gateway*). Jie privalo būti abiejuose ryšio kanalo galuose bei dirbti tuo pačiu multipleksavimo protokolu. Per tokį įrenginį perduodami balso paketai yra grupuojami į vieną bendrą paketą ir perduodami ryšio linija kitam įrenginiui, kuris balso duomenis sudėlioja atgal į individualius paketus ir perduoda gavėjams.



5.2 pav. Multipleksavimo variantai: a) to paties šaltino duomenų multipleksavimas, b) skirtingų šaltinių duomenų multipleksavimas)



5.3 pav. Multipleksavimo schema

Multipleksavimo metodus galima sisteminti ir pagal duomenų šaltinio tipą. Yra sukurti algoritmai, kurie sugeba multipleksuoti to paties arba skirtingų tipų duomenis. Plačiausiai taikomas to paties tipo duomenų paketų multipleksavimo metodas. Tokio taikymo pavyzdžiai yra duomenų paketinio perdavimo multipleksavimo algoritmai, aprašyti [149], [152–154]. Visuose juose aiškinama, kaip į vieną bendrą paketą grupuojami maži paketai, kuriuos dideliais kiekiais generuoja dvi komunikuojančios tarnybinės stotys, ir kaip tas bendras paketas perduodamas ryšio kanalu. Pirmuose straipsniuose aprašyti algoritmai taikytini tik vieno tipo duomenims, o paskutiniame multipleksavimo protokolas yra skaidrus (*angl. transparent*), t. y. jis gali transportuoti įvairių tipų duomenų paketus (pvz. telnet, rlogin, ssh ir pan.). Interneto standartus tvirtinanti organizacija IETF (*angl. The Internet Engineering Task Force*) yra pripažinusi jį oficialiu standartu.

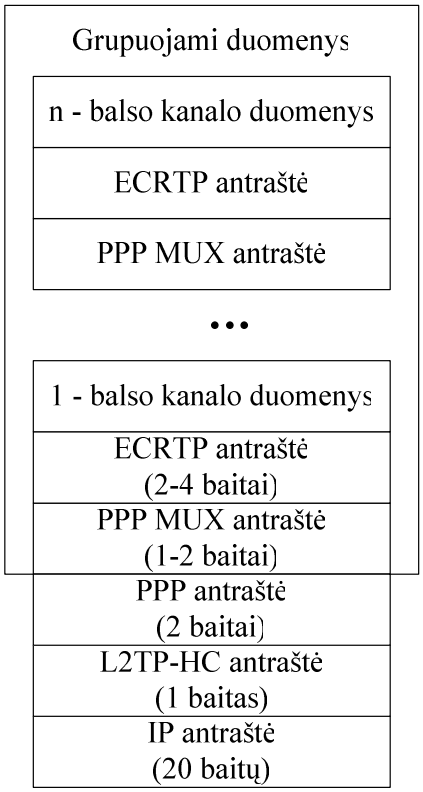
Tuo tarpu balso paketų multipleksavimo standartas patvirtintas dar nėra, nors IETF audio ir video duomenų perdavimo grupė organizavo srautų multipleksavimo algoritmų, kurių santrauka pateikiama 5.1 lentelėje, kūrimą. Tuo siekiama sukurti vieningą standartą, leidžiantį, perduodant balsą IP tinklais, efektyviau išnaudoti esamus perdavimo kanalus.

5.1 lentelė. Multipleksavimo bei paketų antraščių kompresijos algoritmų palyginimas

Parametras	Otavos universitetas [155]	Nokia [156]	Bell Labs / Kolumbijos universitetas [157, 158]	TCRTP [159]	Hitachi [160]	GeRM [161]
Antraštės dydis baitais	2/4	2	2/4	4–7	12	1–13
Maksimalus multipleksuojamo paketo dydis baitais	128/65536	64	65536	Nėra ribojama	Nėra ribojama	Nėra ribojama
Ne RTP paketų multipleksavimas	Taip	Taip	Ne	Taip	Ne	Ne
Sudėtingumas	Paprastas	Paprastas	Paprastas	Paprastas	Paprastas	Sudėtingas
Srautų skaičiaus ribojimas	iki 256	iki 256	iki 128	Nėra ribojama	Nėra ribojama	Nėra ribojama
RTP laiko žymės išsaugojimas	Galima	Ne	Ne	Galima	Taip	Taip
RTP sekos numerio išsaugojimas	Galimas	Ne	Ne	Galima	Taip	Taip
Prarastų paketų įtaka darbui	Galima	Galima	Galima	Galima	Ne	Ne
Papildomo paketo formavimas	Ne	Ne	Taip	Ne	Ne	Ne
Dirba tik tarp kraštinių kelvedžių	Taip	Taip	Taip	Taip	Ne	Ne
RTP kompresija	Taip	Ne	Ne	Taip	Ne	Taip

Trumpai apžvelgiant šiuos multipleksavimo algoritmus, verta paminėti, kad Otavos universiteto pasiūlytas multipleksavimo metodas labiausiai primena ATM tinklo veikimo būdą. Iš pradžių kuriamas virtualus kelias, jam priskiriamas kelio indeksas. Virtualiu keliu perduodami tie paketai, kuriems priskirtas atitinkamas indeksas. Šiuo būdu grupuojami tik IP/UDP/RTP paketai. Algoritmas yra pritaikytas perdavinėti balso duomenis tarp dviejų terpių sąsajų. Kaip teigiama [162], šis metodas turi neapibrėžtą sinchronizacijos protokolą.

Firmos „Nokia“ pasiūlyme maksimalus grupuojamo paketo dydis tik 64 baitai, be to, grupuotame sraute visų paketų RTP laiko ir eilės numeriai nustatomi vienodi. Firmos „Lucent“ pasiūlymas yra efektyvus tuo atveju, kad visų kalbos srautų kodavimo algoritmai yra vienodi. Firmos „Hitachi“ pasiūlyme yra tik srautų multipleksavimas, nėra paketų antraščių kompresijos. Firmų: „Nokia“, „Bell Labs“ bei „Hitachi“ pasiūlymus įgyvendinant reikia tobulinti egzistuojančias signalizacijos sistemas (H.323 ar SIP) [156, 157], [160]. Bendrasis multipleksavimo transportavimo realaus laiko protokolas (*angl. Generic RTP Multiplexing* – GeRM) yra pats efektyviausias [133] iš visų pateiktų, tačiau kartu ir sudėtingiausias. Efektyvumas yra pasiekiamas ne spaudžiant atskirai kiekvieną paketą, bet perduodant skirtumą tarp gretimų multipleksuotų paketų. Čia efektyvumas mažėja, jei naudojami skirtingi balso kompresijos algoritmai bei nėra klientų laiko sinchronizavimo. Tuo tarpu tunelinis kompresavimo realaus laiko perdavimo protokolas (*angl. Tunneling multiplexed Compressed RTP* – TCRTP) paremtas jau egzistuojančiais CRTP [134], PPPMUX [163] ir L2TP [146], [164, 165] standartais. Būtent dėl to šis protokolas yra labiausiai tobulinamas tam, kad ateityje įgytų oficialaus protokolo statusą [151], [166]. TCRTP protokolo paketo struktūra pateikiama 5.4 paveiksle.



5.4 pav. TCRTP protokolo paketo struktūra

Multipleksavimo algoritmus klasifikuoti galima ir pagal jų veikimo vietą OSI modelio lygmenyse, pavyzdžiui, kanaliniame, tinkliniame, transportiniame arba taikomajame [7]. Dažniausiai multipleksavimo protokolai naudojami taikomajame lygmenyje. Šiame lygmenyje veikia visi balso multipleksavimo protokolai, papildantys tiek RTP standartą, tiek ir balso perdavimo signalizacijos sistemas. Kuo aukštesniame lygmenyje veikia multipleksavimo algoritmas, tuo mažiau sistema yra universali. Ir atvirkščiai, apatiniuose lygmenyse multipleksavimas daro sistemą universalią ir skaidrią didelei daliai duomenų šaltinių. Tačiau mažėja efektyvumas, nes tenka perduoti didesnį paketų antraščių kiekį. Be to, multipleksavimo diegimas į žemesnį lygmenį sudaro papildomų problemų, nes reikia modernizuoti arba keisti įrenginių techninę dalį ir/arba juos valdančią programinę įrangą. Teorinis multipleksavimo kanaliniame ir fiziniame lygmenyje modelis pateikiamas [167]. Praktiškai multipleksavimo kanaliniame lygmenyje yra realizuota programa „KarlNet“ [168], kurios veikimas paremtas modernizuotu IEEE 802.11b standartu. Tačiau ši sistema yra brangi ir nestandartizuota, be to, ji veikia tik centralizuotame 802.11 tinkle.

Visi minėti duomenų multipleksavimo būdai yra skirti didelio balso kanalų kiekio perdavimui magistraliniais ryšio kanalais arba didelio mažų paketų kiekio apsikeitimui tarp dviejų tarnybinių stočių. Lyginant vartotojų tinklus ir didelės aprėpties tinklus, tarp jų galima pastebėti esminį skirtumą: vartotojų tinkluose nėra magistralinių perdavimo kanalų, nes juos atstoja vartotojų prieigų kanalai, t. y. tas pats kanalas tarnauja ir galutinio vartotojo duomenų srauto, ir kitų vartotojų duomenų perdavimui. Dėl to yra tikslinga kurti naują multipleksavimo protokolą, pritaikytą vartotojų tinklams. Kadangi VPT nėra centrinės perdavimo įrangos, kiekviename vartotojo prieigos įrenginyje reikia įdiegti atskiras multipleksavimo sistemas. Kuriamas multipleksavimo algoritmas turi būti skaidrus ir galintis multipleksuoti ne tik balso, bet ir kitų duomenų šaltinius, generuojančius mažų paketų duomenų srautus (4.3 paveikslas).

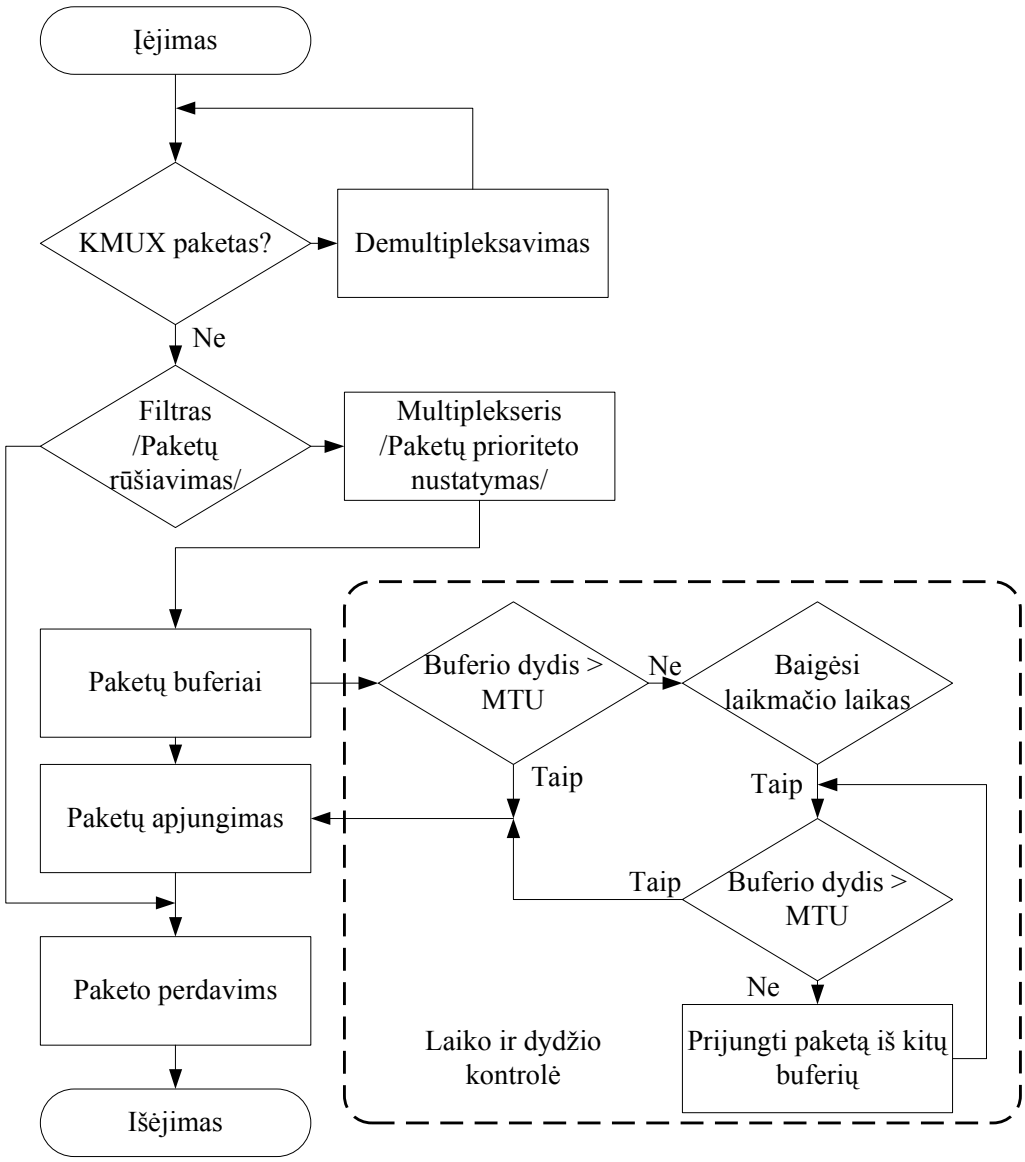
5.1.3 Kompleksinis multipleksavimo protokolas.

Pagal anksčiau išsakytas pastabas naujam protokolui yra formuluojami tokie reikalavimai:

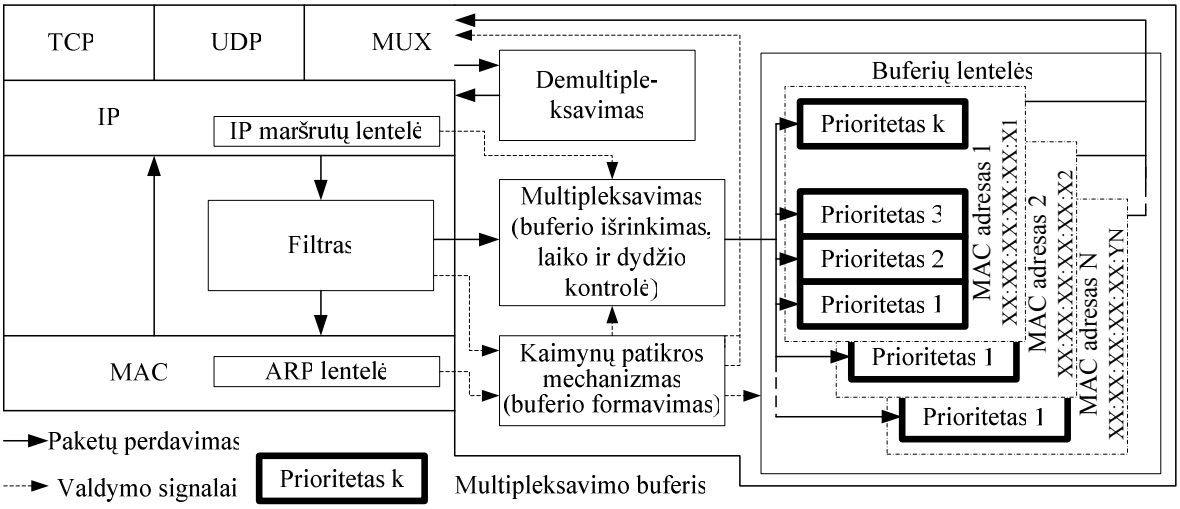
1. grupuoti įvairių šaltinių ir tipų duomenų paketus, tarp jų ir balso;
2. turėti galimybę keisti buferio formavimo laiką;
3. būti skaidriam TCP, UDP ir dar aukštesniems protokolams;
4. būti skaidriam tinkliniams įrenginiams, veikiantiems tinklo lygmenyje;
5. turėti paslaugos kokybės sistemą.

[7] Kadangi TCP/IP tinklo modelis skiriasi nuo OSI septynių lygmenų modelio, čia sesijos, vaizdavimo ir taikomasis lygmenys yra vadinami taikomuoju lygmeniu.

Reikalavimas „protokolas turi būti skaidrus įvairiems duomenų tipams (protokolams)“, iš karto eliminuoja jo kūrimą taikomuosiuose OSI modelio lygmenyse. Pasirenkant žemesnius lygmenis reikia atsižvelgti į tai, kad ne tik stotyse, bet ir kituose tarpiniuose tinkliniuose įrenginiuose, jei jie dirba tame pačiame lygmenyje, kaip ir multiplekseris, turi būti įdiegti multipleksavimo ir demultipleksavimo algoritmai. O tai ne visada įmanoma, nes tinkle gali būti tokių standartinių įrenginių, kurių modernizavimas sudarytų papildomų problemų (5.10 paveikslas). Kadangi šiuo metu pagrindiniai tinkliniai įrenginiai veikia kanaliniame ir tinklo lygmenyse, todėl kompleksiniam multipleksavimo algoritmui (KMUX) pasirenkamas transportinis lygmuo (šiame lygmenyje taip pat veikia TCP ir UDP protokolai), o IP naudojamas kaip tinklo protokolas. Taip užtikrinamas suderinamumas su egzistuojančiais tinklais ir tinklo įrenginiais.



5.6 pav. KMUX funkcinė schema



5.7 pav. Multipleksavimo protokolo architektūra

Kompleksinio multipleksavimo protokolo architektūra. Multipleksavimo algoritmo funkcinė schema pateikiama 5.6 pav., o jo struktūra išskaidyta OSI tinklo modelyje pateikiama 5.7 paveiksle. Multipleksavimo algoritmas yra įdiegiamas atskirame KMUX sublygmenyje. Paketai, patekę į ši sublygmenį, yra rūšiuojami ir atrenkami grupavimui pagal tam tikrus IP, UDP, TCP bei kitų protokolų antraščių požymius. Pagrindinis požymis – tai paketo dydis; kiti požymiai gali būti tokie: siuntėjo ar gavėjo adresas arba prievado (*angl. port)* numeris, protokolo tipas ir t. t. Jei nusprendžiama, kad paketas nėra multipleksuotinas, iš KMUX sublygmens jis patenka į žemesnį kanalinį lygmenį, iš kurio per fizinį lygmenį perduodamas į kaimyninę stotį.

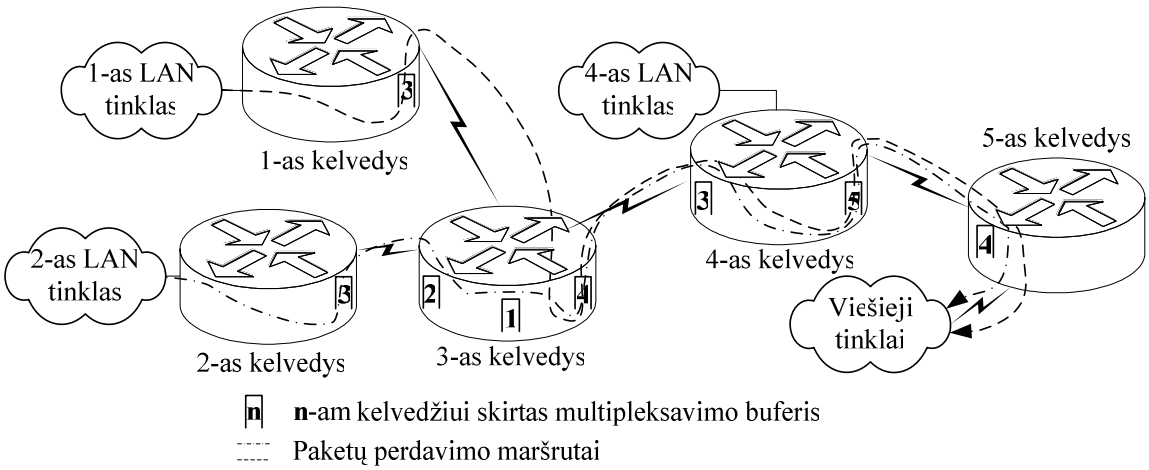
Kai filtras nustato, kad paketas grupuotinas, jis nukreipiamas į multiplekserį, iš kurio pagal gavėjo IP adresą (kelvedžio lentelių reikšmes (*angl. routing tables*)) ir filtro paketui suteiktą prioritetą jis talpinamas į atitinkamą buferį. Prioriteto suteikimas priklauso nuo paketo duomenų tipo. Balsui ar kitiems realaus laiko duomenims suteikiamas aukščiausias prioritetas, kitiems duomenims žemesnis. Kuo aukštesnis prioritetas, tuo mažesnė buferio laikmačio vertė, nusakanti maksimalią laiko atkarpą, kurią paketas gali išbūti buferyje.

Aukštesnis prioritetas garantuoja mažesnį multipleksavimo vėlinimą. Kai suveikia buferio išsiuntimo mechanizmas (jis aptariamas tekste žemiau), buferio turinys perduodamas į transportinį multipleksavimo lygmenį. Čia jis inkapsuliuojamas į multipleksavimo paketą, t. y. prie buferio turinio pridedama multipleksavimo paketo antraštė. Iš šio lygmens naujai suformuotas paketas perduodamas į tinklinį lygmenį, iš kurio per MUX sublygmenį bei kanalinį ir fizinį lygmenis pasiekia kaimyninę stotį.

Iš ten gautas paketas per žemesniuosius lygmenis yra perduodamas į tinklo lygmenį, kuriame pagal stoties maršrutų lentelę yra nusprendžiamas jo tolesnis maršrutas. Kai paketas yra adresuotas kitai stočiai, jis perduodamas į MUX sublygmenį. Kai paketas pasiekia

adresatą, iš tinklo lygmens jis patenka į transportinį lygmenį. Jei transportinio lygmens protokolas yra TCP arba UDP, tada paketas yra persiunčiamas į stoties taikomąsias programas. Jei gautas paketas yra KMUX, tada jis perduodamas į multipleksavimo transportinį lygmenį, iš kurio patenka į demultiplekserį. Čia duomenų paketai yra išgrupuojami ir perduodami į tinklinį lygmenį tolesnei maršrutizacijai. Po to išgrupuoti paketai vėl patenka į filtrą ir gali būti iš naujo multipleksuojami, tačiau priklausomai nuo įrašų IP maršrutų lentelėse gali būti patalpinti į skirtingus buferius.

Šioje sistemoje ypatingą svarbą atlieka filtras, kuris turi sekti ir analizuoti duomenų perdavimą, t. y. paketų analizė atliekama ne tik pagal apdorojamo paketo antraščių, bet ir duomenų perdavimo sesijos, kuriai paketas priklauso, informaciją. Pavyzdžiui, perduodant balsą H.323 protokolu [169] srauto perdavimo prievado numeris nėra reglamentuojamas, ir jis kinta kiekvieno pokalbio metu, todėl tik turint visą informaciją apie balso perdavimo sesiją yra įmanoma susekti duomenų srautų paketus ir juos teisingai multipleksuoti.



5.8 pav. Multipleksavimo buferių išsidėstymo schema

Tipiniu atveju, kai duomenys yra perduodami magistraliniais ryšio kanalais, grupavimo buferiai multipleksavimo įrenginyje kuriami tik tinklo sąsajoms arba tik tiems kaimyniniams (demultipkesuojantiems) mazgams, kuriems siunčiamas magistralinis srautas. Kadangi VPT tinkluose griežtai apibrėžtus magistralinio tipo kanalus atstoja visi galimi sujungimai su kaimyninėmis stotimis, todėl kiekvienai iš jų sukuriamas individualus multipleksavimo buferis (5.8 paveikslas).

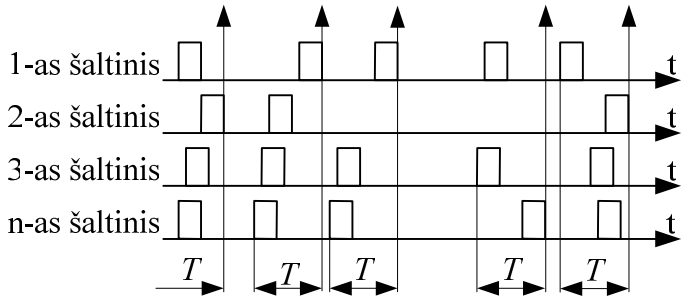
Tuo atveju, kai naudojamos 802.3 arba 802.11 tipo tinklinės sąsajos, buferių skaičius lygus stoties atmintinėje esančių kaimyninių stočių MAC adresų skaičiui (5.7 paveikslas). Kiekvienas buferis turi savo indeksą, tapatų kaimyninės stoties, kuriai skirti buferyje sugrupuoti paketai, MAC adresui. Tuo atveju, kai paketo gavėjas yra tame pačiame IP

potinklyje, buferio indeksu yra gavėjo MAC adresas. Kai paketas yra skirtas ne tame pačiame IP potinklyje esančiai stočiai, tada buferio indeksas yra tapatus kelvedžio, per kurį yra pasiekiamas gavėjas, MAC adresui. Kelvedžių IP maršrutų lentelės yra pildomos rankiniu būdu arba OSPF [170] ar RIP [171] protokolų pagalba.

Buferio turinio išsiuntimo sąlygos. Siūlomas protokolas naudoja kombinuotą buferio turinio išsiuntimo sąlygų būdą, kuris užtikrina mažiausią vėlinimą, esant didelei tinklo apkrovai.

Pirmas paketo išsiuntimo požymis yra buferio dydis L. Jei atėjus naujam paketui, buferio dydis viršija tam tikrą reikšmę L_{MAX}, buferio turinys be paketo, perpildžiusio buferį, yra išsiunčiamas į transportinį multipleksavimo lygmenį. Likęs paketas dedamas jau į tuščią buferį. Rekomenduojama, kad L_{MAX} reikšmė būtų pasirinkama kaip ir maksimalaus transportavimo vieneto (*angl. Maximum Transfer Unit* – MTU) reikšmė, kuri IEEE 802.11 standarte yra lygi 2312 baitų, o IEEE 802.3 – 1500 baitų tam, kad būtų pasiektas maksimalus multipleksavimo efektyvumas.

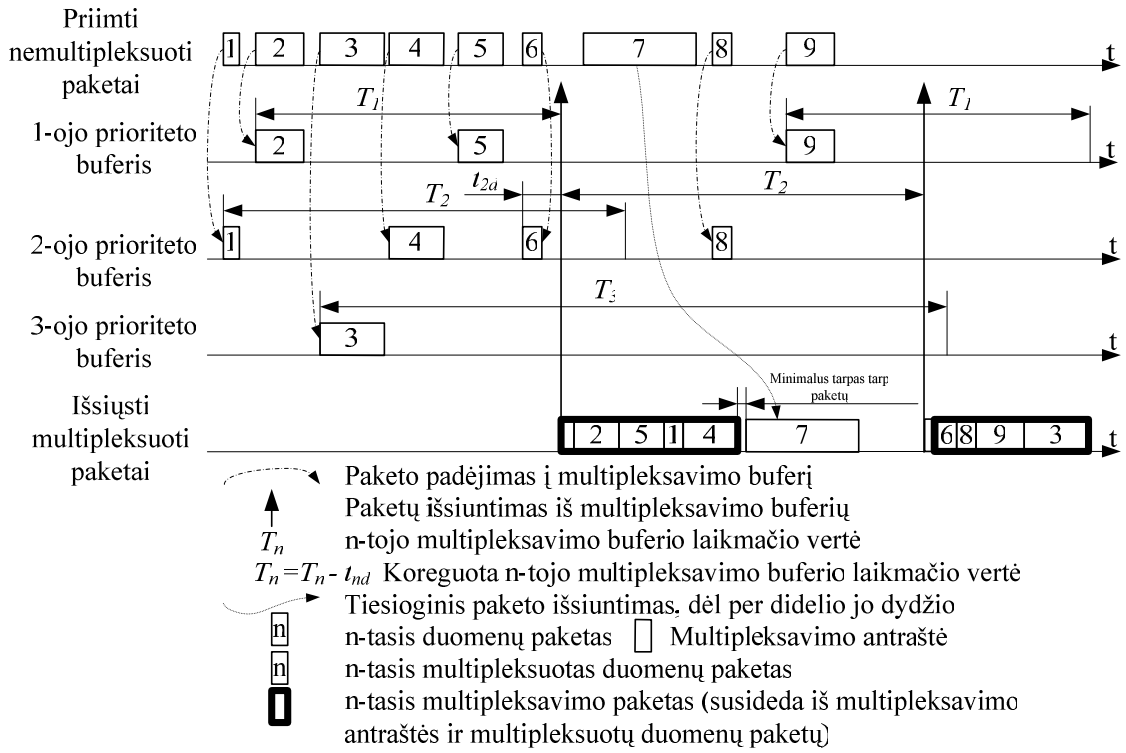
Kitas požymis – tai laikmačio laikas. Literatūroje yra aprašomi metodai, pagal kuriuos laikmačio laikas yra perkraunamas griežtai periodiškai, t. y. pasibaigus laikmačio skaičiavimo laikui, pradinė skaičiavimo reikšmė T yra įrašoma iš naujo, ir laikmatis paleidžiamas iš naujo, nepriklausomai nuo paketų srauto intensyvumo. Kompleksiniame multipleksavimo protokole yra siūlomas naujo tipo laikmačio paleidimo mechanizmas. Laikmatis pradeda skaičiuoti tik tada, kai pirmas paketas yra padedamas į buferį (5.9 paveikslas). Jei buferis yra laisvas, laikmatis sustabdomas. Atėjus pirmam paketui, į laikmatį įrašoma pradinė skaičiavimo reikšmė, ir jis yra paleidžiamas. Pirmas paketas, patekęs į buferį, vėlinamas daugiausia verte T, o paketai, patekę į buferį vėliau, automatiškai vėlinami mažiau. Tokia laikmačio paleidimo schema padeda išvengti pagrindinio šio buferio išsiuntimo požymio trūkumo – griežtai periodinių laiko tarpų, kurie mažina multipleksavimo efektyvumą. Paketas yra išsiunčiamas tenkinant vieną iš dviejų požymių. Dvigubo požymio panaudojimas leidžia net tik efektyviai išnaudoti kanalo resursą, bet ir kartu garantuoja paketų vėlinimų kontrolę.



5.9 pav. Modernizuotas multipleksavimo buferio išsiuntimo variantas

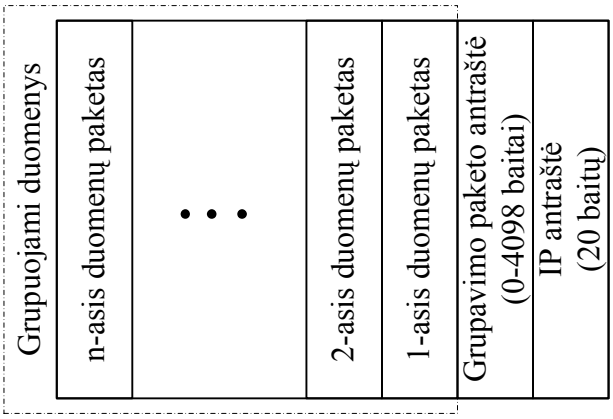
Tam, kad paketų vėlinimas dėl multipleksavimo dar būtų labiau sumažintas, tai pačiai kaimyninei stočiai sukuriami skirtingų prioritetų buferiai. Duomenys, kurie yra jautresni vėlinimui, pavyzdžiui, balsas, yra dedami į didesnio prioriteto buferius, o duomenys, mažiau jautrūs vėlinimui, dedami į mažesnio prioriteto buferius (5.7 paveikslas). Didesnį prioritetą turinčio buferio laikmačio trukmė yra mažesnė, todėl paketas išbūna buferyje trumpesnį laiko tarpą, o tai reiškia, kad jo vėlinimas yra mažesnis. Jei suveikus laikmačiui, multipleksuojamame pakete yra laisvos vietos, prie jo prijungiami paketai iš didesnį prioritetą turinčių buferių. Jei tokių nėra, jungiami mažesnį prioritetą turinčių buferių paketai. Taip jungiami tol, kol bendro paketo dydis tampa maksimalus. Tokiu būdu buferių turiniai, nors laikmačiai nebaigė skaičiuoti nustatyto laiko, išsiunčiami paankstintai. Taip mažinamas paketų vėlinimas ir didinamas išsiunčiamų paketų dydis, ir taip užtikrinamas efektyvus kanalo išnaudojimas. Tokią multipleksavimo buferių turinių išsiuntimo schemą galima vadinami adaptyvia, jos veikimo schema pateikiama 5.10 paveiksle. Tada, kai dėl vietos trūkumo ne visi buferyje esantys paketai gali būti paankstintai išsiunčiami, buferio laikmačio vertė nustatoma iš naujo pagal pirmo likusio paketo buvimo buferyje likutinę vertę T_n` (5.10 paveikslas), t. y. laikmačio vertė yra nustatoma taip, kad pirmas buferyje likęs paketas nebūtų vėlinamas daugiau nei leistina atitinkamo buferio paketui.

Multipleksavimo paketo struktūra. Kai yra išpildoma bet viena iš buferio išsiuntimo sąlygų, iš multipleksavimo buferiuose esančių paketų formuojamas naujas multipleksavimo



5.10 pav. Adaptyvi multipleksavimo schema

paketas, o buferiuose buvę paketai tampa duomenimis, prie kurių yra pridedamos multipleksavimo antraštė transportiniame lygmenyje ir IP antraštė tinklo lygmenyje. Multipleksuotų paketų duomenyse ir jų antraštėse nedaromi jokie pakeitimai. Multipleksavimo paketo struktūra pateikiama 5.11 paveiksle. Išsiunčiamo paketo IP antraštės siuntėjo adreso lauke yra įrašomas siunčiančiosios stoties, o gavėjo lauke – stoties, į kurią paketas perduodamas, IP adresai. IP antraštės versijos laukui suteikiama iš RFC protokolų lentelės [172] paimta laisva reikšmė, kuri naudojama kaip multipleksavimo paketo žymė, pavyzdžiui „135“. Panašų mechanizmą naudoja standartas RFC 1692 [149].



5.11 pav. Multipleksavimo paketo struktūra

a)

	Bito Nr.							
Baito Nr.	7	6	5	4	3	2	1	0
1	0	0	0	1	0	0	0	0

b)

	Bito Nr.							
Baito Nr.	7	6	5	4	3	2	1	0
1	0	0	1	0	0	0	0	0

5.12 pav. Kontrolės paketų struktūra: a) multipleksavimo užklausos, b) multipleksavimo patvirtinimo paketo

Prie informacijos, siunčiamos iš buferio, pridedamos multipleksavimo paketo antraštės, kurių dydis gali būti nuo 0 iki 4096 baitų. Antraštės tipas ir jos dydis priklauso nuo to, kokio tipo paketas yra perduodamas. Paketų tipai yra du: kontrolinis ir duomenų perdavimo. Kontroliniai paketai yra skirti užtikrinti multipleksavimo sistemos funkcionalumą. Šiam tipui priklauso multipleksavimo užklausos paketas (5.12 paveikslas, a), kuris yra siunčiamas, siekiant sužinoti, ar kaimyninė stotis atlieka multipleksavimo funkciją, ir multipleksavimo patvirtinimo paketas, kuriuo kaimyninė stotis patvirtina, kad ji grupuoja (5.11 paveikslas, b). Abiem atvejais paketo dydis yra lygus vienam baitui.

Multipleksavimo buferiai kuriami MUX agento pagalba (5.7 paveikslas). Kai tam tikros stoties adresų raiškos protokolo (*angl. Address Resolution Protocol* – ARP) lentelėje atsiranda įrašai apie kaimyninės stoties MAC ir IP adresus, agentas šiai stočiai siunčia

specialų multipleksavimo užklausos paketą (5.12 paveikslas, a). Tuo atveju, kai kaimyninė stotis atgal atsiunčia multipleksavimo patvirtinimo paketą (5.12 paveikslas, b), abiejose stotyse sukuriami buferiai su jų MAC adresų indeksais. Buferis naikinamas tada, kai iš ARP lentelės panaikinamas MAC ir IP adreso įrašas.

Paslaugos kokybės sistema. Kitas multipleksavimo paketų tipas, skirtas duomenų perdavimui, yra dviejų rūšių: su QoS funkcija ir be jos. Nuo QoS funkcijos priklauso, ar paketas gali būti dedamas į multipleksavimo buferį (taigi kartu ir vėlinamas) ar negali. Tuo atveju, kai ši funkcija naudojama (5.13 paveikslas), kiekvienam siunčiamam duomenų paketui multipleksavimo antraštėje suteikiamas skaitiklis, užimantis vieną baitą. Skaitiklis rodo, kiek kartų konkretus paketas gali būti grupuojamas arba kiek laiko jis gali būti laikomas buferyje, priklausomai nuo sistemos konfigūracijos. Kai naudojama laiko funkcija ir kai 1 bito vertė lygi 1 ms, maksimalus vėlinimo laikas yra 254 ms. Kai suteikiama maksimali, 255 ms, vėlinimo reikšmė, atitinkamam paketui funkcija išjungiama. TMUX standarte [149] nurodoma, kad multipleksavimo buferių sąlygojamas vėlinimo laikas neturėtų viršyti 20–30 ms. Įvertinus tai, kad VPT tinklais perdavinėjami ir duomenys, ir balsas, bei tai, kad multipleksuojama ne vienoje, o keliose stotyse, pasirenkama minimali vėlinimo trukmė, kuri lygi 1 ms. Tai visiškai atitinka ir duomenų vėlinimo [122], [149], ir VPT reikalavimus. Po kiekvieno multipleksavimo veiksmo skaitiklio reikšmė sumažėja vienetu. Gavusi paketą su nuline skaitiklio reikšme, stotis pakeičia jo IP antraštės paslaugos rūšies lauko prioriteto reikšmę maksimalia. Tai jau yra požymis, pagal kurį stotis tokio paketo negali talpinti į buferį ir privalo išsiųsti jį kaip galima greičiau. Yra dvi multipleksuotų paketų, palaikančių

a)

	Bito Nr.							
Baito Nr.	7	6	5	4	3	2	1	0
1	1	Paketų skaičius n (max 127)						
2	1-ojo paketo QoS reikšmė							
3	2-ojo paketo QoS reikšmė							
	• • •							
n+1	n-ojo paketo QoS reikšmė							
n+2	1-ojo paketo pradžia, dydis s_1							
	• • •							
$n+s_1+1$	1-ojo paketo pabaiga							
$n+s_1+2$	2-ojo paketo pradžia, dydis s_2							
	• • •							
$n+s_1+s_2+1$	2-ojo paketo pabaiga							
	• • •							
$Start_n$	n-ojo paketo pradžia, dydis s_n							
	• • •							
$Stop_n$	n-ojo paketo pabaiga							

b)

	Bito Nr.							
Baito Nr.	7	6	5	4	3	2	1	0
1	0	0	0	0	Paketų			
2	skaičius n (max 4097)							
3	1-ojo paketo QoS reikšmė							
4	2-ojo paketo QoS reikšmė							
	• • •							
n+2	n-ojo paketo QoS reikšmė							
n+3	1-o paketo pradžia, dydis s_1							
	• • •							
$n+s_1+2$	1-ojo paketo pabaiga							
$n+s_1+3$	2-ojo paketo pradžia, dydis s_2							
	• • •							
$n+s_1+s_2+2$	2-ojo paketo pabaiga							
	• • •							
$Start_n$	n-ojo paketo pradžia, dydis s_n							
	• • •							
$Stop_n$	n-ojo paketo pabaiga							

5.13 pav. Duomenų perdavimo paketai su QoS funkcija: a) trumpas paketas (k=1), b) ilgas paketas (k=2). Kintamieji $Stop_m$ ir $Start_n$ skaičiuojami pagal 5.1 išraišką

paslaugos kokybės funkciją, antraščių rūšys: trumpo paketo (5.13 paveikslas, a), kuriame telpa iki 127 grupuotų duomenų paketų, ir ilgo paketo (5.13 paveikslas, b), kuriame gali būti iki 4097 grupuotų duomenų paketų. Pirmu atveju multipleksavimo antraštę sudaro iš eilės einantys: informacinis baitas, kurio 7 bitai turi informaciją apie perduodamų multipleksuotų paketų kiekį, ir paketų QoS reikšmės. Po antraštės perduodami multipleksuoti duomenų paketai. Antru atveju multipleksavimo antraštės informacinę dalį sudaro 2 baitai, iš kurių 12 bitų yra skirti perduodamų paketų skaitikliui, o visų likusių baitų reikšmės identiškos trumpam paketui. Bendru atveju multipleksuoto paketo dydis apskaičiuojamas pagal (5.1) išraišką. Ilgas paketas naudojamas tuo atveju, kai buferyje esančių paketų skaičius viršija 127. Taip atsitikti gali tada, kai tinkle MTU dydis yra didelis, pavyzdžiui, 1000BASE–T standarto [173] įrenginiai palaiko iki 9000 baitų MTU dydį.

Tais atvejais, kai paslaugos kokybės funkcija nenaudojama, multipleksuoto paketo antraštės iš viso nėra (5.14 paveikslas). Toks duomenų paketų perdavimo būdas yra efektyviausias dėl pertekliškumo nebuvimo. Šio multipleksuoto paketo antraštė sutampa su jame esančių duomenų paketų IP antraštėmis. Iš kitų paketų jie yra išskiriami pagal pirmo duomenų paketo IP antraštės pirmojo baito 4–7 bitus. Kai jie lygus „0100b“, tai reiškia IPv4 [174], o jei „0110b“ – IPv6 [175] paketą. Skirtingų versijų duomenų paketai gali būti perduoti tame pačiame multipleksavimo pakete (5.14 paveikslas). Duomenų paketai į multipleksavimo paketą yra dedami vienas paskui kitą eilute, tačiau jie nėra indeksuojami, t. y. jame nėra informacijos apie esančių duomenų paketų dydžių reikšmes bei jų padėtis paketo pradžios atžvilgiu. Kadangi duomenų paketai yra perduodami nuosekliai, todėl kito duomenų paketo pradžios adresas yra prieš jį esančio duomenų paketo pradžios adreso ir jo paties IP antraštės ilgio laukų suma pagal išraišką (5.2). Kai multipleksavimo paketas pasiekia kaimyninės stoties tinklinę sąsają, perduodami duomenų paketai yra atstatomi pagal juose pačiuose esančią informaciją – paketo dydis yra sužinomas iš IP paketo dydžio lauko reikšmės. Duomenų vientisumą garantuoja MAC lygmens CRC lauko reikšmė, kuri parodo, ar paketas gavėją pasiekė nesugadintas.

Taigi perduodant multipleksavimo kadrus transportiniu lygmeniu (pagal OSI modelį) ir naudojant aprašomąjį MUX protokolą, o ne jau esančius TCP ar UDP, galima turėti mažesnes antraštes ir taip sumažinti perduodamų baitų skaičių bei padidinti kanalo išnaudojimą.

Tiesa, egzistuoja dar viena galimybė labiau padidinti kanalo išnaudojimo efektyvumą. Tai pasiekiama atsisakant IP antraštės ir multipleksavimo paketą formuojant tinklo, o ne transporto lygmenyje. Tai leidžia sutaupyti mažiausiai 20 baitų nuo kiekvieno išsiųsto paketo. Tačiau šis variantas turi esminį trūkumą – neskaidrumą. Tai reiškia, jog jei tinkle egzistuotų

kiti tarpiniai įrenginiai, veikiantys tinklo lygmenyje, ir kuriuose multipleksavimo protokolo nebūtų galima įdiegti, tai šie įrenginiai paketų be IP antraštės perduoti negalėtų. Tokio scenarijaus pavyzdys pateikiamas 5.15 paveiksle.

	Bito Nr.								
Baito Nr.	7	6	5	4	3	2	1	0	Paketo tipas
1	0	1	0	0	1-ojo paketo				*IPv4*
2	pradžia, dydis s_1								
	• • •								
s_1	1-ojo paketo pabaiga								
s_1+1	0	1	1	0	2-ojo paketo				*IPv6*
s_1+2	pradžia, dydis s_2								
	• • •								
s_1+s_2	2-ojo paketo pabaiga								
	• • •								
$Start_n$	0	1	0	0	n-ojo paketo				*IPv4*
$Start_n+1$	pradžia, dydis s_n								
	• • •								
$Stop_n$	n-ojo paketo pabaiga								

5.14 pav. Duomenų perdavimo paketas be QoS funkcijos. Kintamieji $Stop_m$ ir $Start_n$ skaičiuojami pagal 5.2 išraišką

n **n**-am kelvedžiui skirtas multipleksavimo buferis

5.15 pav. Multipleksavimo protokolo naudojimas viešuose tinkluose

$$Stop_n = \sum_{i=1}^{n} s_i + n + k, \quad Start_n = Stop_{n-1} + 1. \tag{5.1}$$

$$Stop_n = \sum_{i=1}^{n} s_i, \quad Start_n = Stop_{n-1} + 1. \tag{5.2}$$

Vartotojų tinkluose toks multipleksavimo algoritmas gali būti realizuojamas stotyse, kurios yra valdomos naudojant atviro kodo operacines sistemas – Linux bei BSD atmainas dėl jų paplitimo, mažos kainos bei jau sukurtų didelių tinklinių galimybių. Siūlomą multipleksavimo protokolą gali įgyvendinti arba sistemos tvarkyklė (*angl. driver*), arba paketų perėmimo mechanizmai (tokie kaip „iptables“, „Divert socket“ ar „BSD Packet Filter“)

kartu su vartotojo lygmenyje dirbančia programine įranga. Tokiam darbui atlikti reikia didelių laiko ir žinių resursų, todėl darbe yra pateikiami tik šio algoritmo modeliavimo rezultatai.

5.2 Paketų multipleksavimo efektyvumo tyrimai

Šiame darbe balso multipleksavimo efektyvumas yra tiriamas ir analitiškai, ir skaitmeniniu būdu modeliuojant sistemą. Duomenų multipleksavimo efektyvumas tiriamas tik modeliavimo būdu, nes dėl duomenų šaltinio modelio sudėtingumo analitiniu būdu gaunami netikslūs efektyvumo vertinimai.

5.2.1 Analitinis balso multipleksavimo tyrimas

Multipleksavimo efektyvumo γ apibrėžimas pateiktas IETF darbuose [156], [160] kaip:

$$\gamma = 1 - \frac{t_{mux}}{nt_{vp}}, \tag{5.3}$$

čia n – multipleksuotų balso kanalų skaičius, t_{vp} – vieno balso kanalo perdavimo laikas, $t_{mux}(n)$ – n multipleksuotų kanalų perdavimo laikas. Kaip matyti, formule (5.3) apibūdintas efektyvumas – tai sutaupyto $(nt_{vp} - t_{mux}) / nt_{vp}$ arba kitiems perdavimams išlaisvinamo laiko santykinė dalis. Akivaizdu, kad γ<1.

Minėtas efektyvumas naudojamas ir kituose darbuose, pavyzdžiui, [176]. Tačiau reikia atkreipti dėmesį į tai, kad [156], [160] ir [176] darbuose nagrinėjamas aukštesnių OSI lygmenų efektyvumas neatsižvelgiant į kanalinio lygmens parametrus. O šiame darbe efektyvumas skaičiuojamas pagal (5.3) išraišką, įvertinant ne tik trečią ir ketvirtą, bet ir antrą OSI lygmenį. Literatūroje pasitaiko ir kitokių efektyvumo skaičiavimo metodikų, pvz., [177, 178]. IEEE 802.xx standartų tinklams (5.3) formulės parametrai išreiškiami taip:

$$t_{vp} = t_f + \frac{n_{MAC} + n_{IP} + n_{UDP} + n_{RTP} + n_b}{v_f}, \tag{5.4}$$

$$t_{mux} = t_f + \frac{n_{MAC} + n \cdot n_b + f_{mux}(n)}{v_f}, \tag{5.5}$$

čia t_f – fizinio kanalo papildomas laikas (IEEE – 802.3 – tai laikas tarp paketų, IEEE 802.11 – tai SIFS ir DIFS laikų bei RTS, CTS ir ACK paketų perdavimo laikų suma pagal 2.4 lentelę), n_{MAC}, n_{IP}, n_{UDP}, n_{RTP} – MAC, IP, UDP, RTP paketų antraščių dydžiai, n_b – balso duomenų kiekis pagal 4.4 lentelę, v_f – kanalo perdavimo sparta, n – kalbančiųjų skaičius, $f_{mux}(n)$ –

funkcija, skirta konkrečiam multipleksavimo metodui, parodanti, kiek papildomų baitų yra panaudojama *n* balso kanalų perdavimui pagal 5.2 lentelę.

5.2 lentelė. Multipleksavimo paketo antraštės skaičiavimo metodika

Grupavimo metodas	Funkcijos $f_{mux}(n)$ reikšmė baitais	Paaiškinimas	Pastabos
Otavos universitetas	$40+4\cdot n$	$n_{IP}+n_{UDP}+n_{RTP}+ n_{MUX} \cdot n$[8]	$n_{MUX}=4$
Nokia	$40+2\cdot n$	$n_{IP}+n_{UDP}+n_{RTP}+ n_{MUX} \cdot n$[8]	$n_{MUX}=2$; Maksimalus balso duomenų kiekis iki 64 baitų
TCRTP	$22+4\cdot n$	$n_{IP}+n_{L2TP}+n_{PPP}+ +(n_{PPP_MUX}+n_{ECRTP}) \cdot n$[8]	$n_{L2TP}=1$; $n_{PPP}=1$; $n_{PPP_MUX}=2$; $n_{ECRTP}=2$
Hitachi	$28+12\cdot n$	$n_{IP}+n_{UDP}+n_{RTP}*n$	
GeRM	$40+n-1$	$n_{IP}+n_{UDP}+n_{RTP} +n_{MUX} \cdot (n-1)$[8]	$n_{MUX}=1$; Visi kanalai turi būti koduoti tuo pačiu kodavimo algoritmu
Bell Labs	$40+4\cdot n$	$n_{IP}+n_{UDP}+n_{RTP}+ n_{MUX} \cdot n$[8]	$n_{MUX}=4$; Visi kanalai turi būti koduoti tuo pačiu kodavimo algoritmu
KMUX	$20+1+40\cdot n$	$n_{IP}+n_{MUX}+(n_{IP}+n_{UDP}+n_{RTP}) \cdot n$[8]	$n_{MUX}=1$; $n_{MUX}=0$ (jei nėra naudojama QoS)

Kai balso kodavimo įrangoje yra balso aktyvumo detektoriai (VAD), skaičiuojant multipleksavimo efektyvumą, reikia įvertinti tai, kad perduodamų balso kanalų kiekis *i* yra atsitiktinis (tikimybė p_i išreiškiama formule (3.16)). Tada vidutinis efektyvumas yra

$$\gamma = 1 - \frac{T_{mux}}{T_{vp}}, \tag{5.6}$$

čia T_{MUX} ir T_{VP} apskaičiuojami pagal:

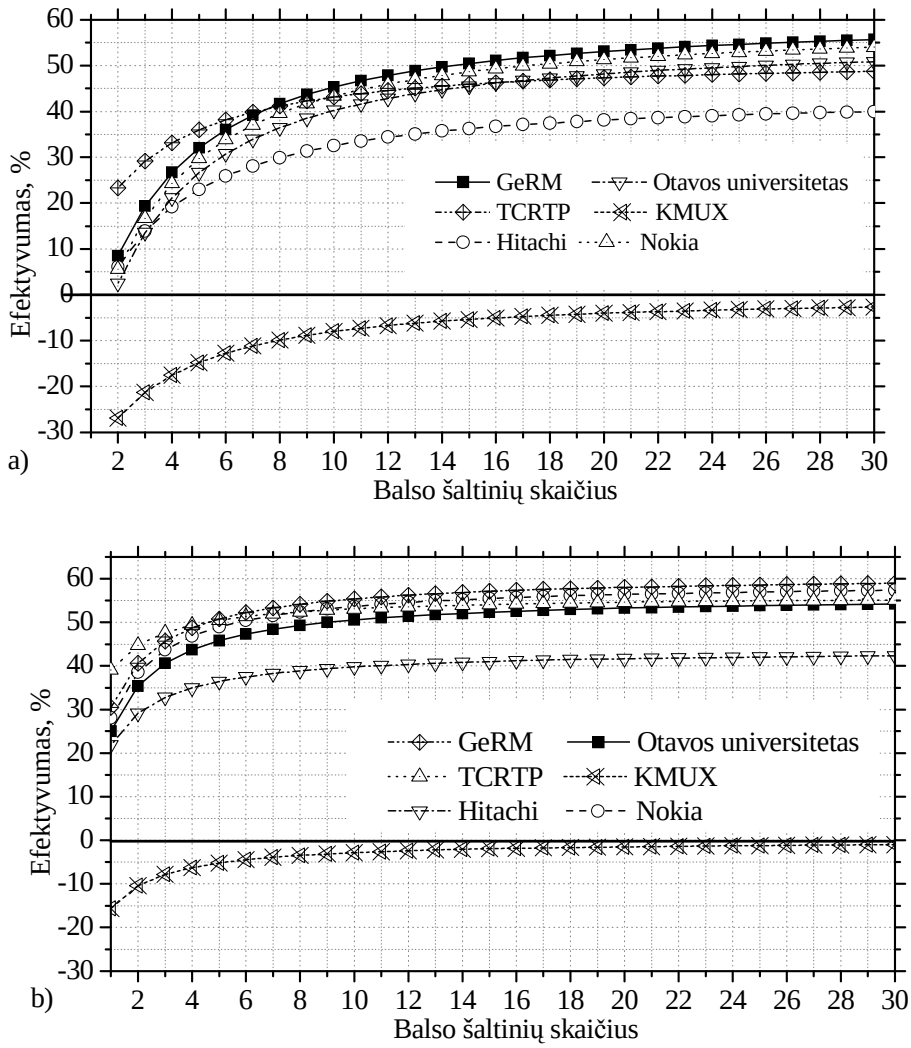
$$T_{MUX} = \sum_{i=1}^{n} p_i t_{mux}(i), \tag{5.7}$$

$$T_{VP} = \sum_{i=1}^{n} p_i t_{vp} i, \tag{5.8}$$

[8] Čia: n_{MUX} – multipleksavimo antraštė, n_{L2TP}, n_{PPP}, n_{PPP_MUX}, n_{ECRTP} – L2TP, PPP, PPP MUX, ECRTP protokolų antraščių dydžiai

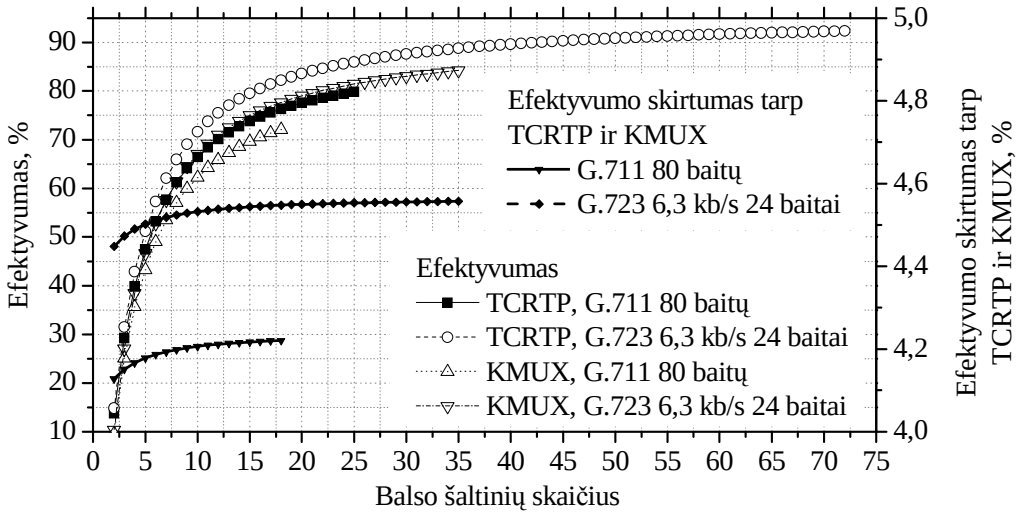
čia n – kalbančiųjų skaičius.

Multipleksavimo algoritmų, išvardintų 5.1 lentelėje, efektyvumo palyginimas pateikiamas 5.16 paveiksle. Palyginimas atliktas neįvertinus dviejų apatinių OSI lygmenų parametrų. Iš grafiko matyti, kad, didėjant multipleksuotų balso šaltinių kiekiui, efektyvumas didėja, nes vis daugiau balso šaltinų yra perduodama viename multipleksavimo kadre. Galima pastebėti, kad, kai kalbos aktyvumo detektorius įjungtas (5.16 paveikslas, a), efektyvumas yra mažesnis nei tada, kai kalbos aktyvumo detektorius išjungtas (5.16 paveikslas, b). Tai paaiškinama tuo, kad kalbos aktyvumo detektorius tylos intervalų metu balso paketų neperduoda, o multipleksavimo efektyvumas tiesiogiai priklauso nuo perduodamų paketų skaičiaus. Kai kanalų skaičius neviršija 10, efektyviausiu yra TCRTP multipleksavimo



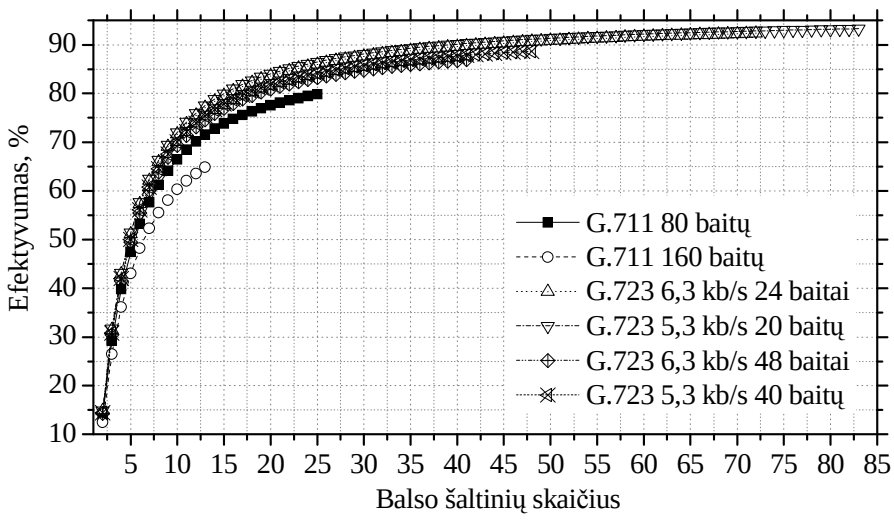
5.16 pav. Balso multipleksavimo algoritmų efektyvumo palyginimas 3 lygmenyje, naudojant G.723 6,3 kb/s balso kodavimo algoritmą: a) kai kalbos aktyvumo detektorius įjungtas, kalbos aktyvumo rodiklis lygus 0,385, b) kai kalbos aktyvumo detektorius išjungtas

protokolas. Kanalų skaičiui viršijus 10, efektyvesniu tampa GeRM multipleksavimo mechanizmas. Hitachi protokolas neprilygsta nei TCRTP, nei GeRM, nes jame nėra įdiegtas RTP paketų kompresavimo algoritmas. Darbe siūlomo KMUX mechanizmo efektyvumas, neįvertinus fizinio ir kanalinio lygmens parametrų, yra neigiamas, nes, perduodant kiekvieno balso šaltinio IP, UDP ir RTP paketų antraštes, yra užimama tam tikra kanalo dalis, o tai ženkliai mažina efektyvumą. Tačiau toks multipleksavimo mechanizmas leidžia atlikti duomenų multipleksavimą visose tarpinėse stotyse ir tada, kai balso siuntėjo ir gavėjo adresai kiekvienam kanalui yra skirtingi. Tai būdinga vartotojų tinklams, kuriuose nėra vieningos krypties, perdavinėjančios duomenų srautus.

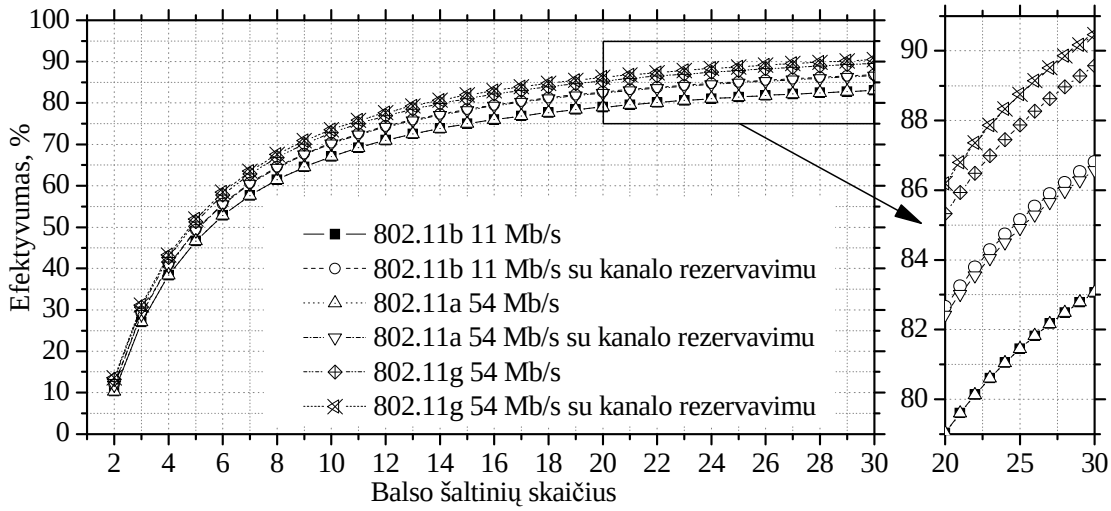


5.17 pav. TCRTP ir MUX multipleksavimo mechanizmų palyginimas IEEE 802.11b 11Mb/s be kanalo rezervavimo tinkle. Kalbos aktyvumo detektorius įjungtas, kalbos aktyvumo rodiklis lygus 0,385

TCRTP ir MUX multipleksavimo protokolų palyginimas IEEE 802.11b tinkle, t. y. įvertinus apatinių dviejų lygmenų parametrus, pateikiamas 5.17 paveiksle. Iš grafiko matyti, kad efektyvumo skirtumas yra tik apie 4 %, o, neįvertinus apatinių lygmenų, efektyvumo skirtumas tarp šių protokolų siekia net 50 % (5.16 paveikslas). Tai paaiškinama tuo, kad IEEE 802.11 bevielės kreipties tinkluose didelę tinklo laidumo dalį užima tarnybiniai laiko tarpai bei tarnybinė informacija. Duomenys, pateikti 5.17 pav., rodo, kad perduodant balsą IEEE 802.11 tinklais ir naudojant nesudėtingus multipleksavimo mechanizmus galima ženkliai sutaupyti tinklo kanalo resursą. Multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo paketų dydžio bei balso kodavimo algoritmo pateikiama 5.18 paveiksle. Matyti, kad jis didėja, kai mažėja paketo dydis, nes tada daugiau balso šaltinių telpa viename multipleksavimo kadre. Skaičiavimo metodikoje, pagal kurią yra gauti 5.17–5.18 paveikslai, yra įvertintas IEEE 802.11 standarto MTU dydis.



5.18 pav. Balso multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo balso paketų dydžio IEEE 802.11b 11Mb/s tinkle be kanalo rezervavimo. Kalbos aktyvumo detektorius įjungtas, kalbos aktyvumo rodiklis lygus 0,385, multipleksavimo algoritmas TCRTP



5.19 pav. KMUX multipleksavimo algoritmo efektyvumo palyginimas, įvertinus 1–3 lygmenis, naudojant G.723 6,3kb/s, balso kodavimo algoritmas su HF, kalbos aktyvumo rodiklis lygus 0,385

Siūlomo multipleksavimo algoritmo efektyvumo priklausomybė nuo tinklo standarto pateikiama 5.19 paveiksle. Matyti, kad multipleksavimo efektyvumas didžiausias IEEE 802.11g standarto tinkluose. Tai susiję su didžiausiu šio standarto perteklinės informacijos kiekiu. Efektyvumas taip pat padidėja, jei tinkle naudojamas kanalo rezervavimo mechanizmas, nes prieš perduodant kiekvieną balso paketą dalis kanalo resurso naudojama kanalo rezervavimui. Multipleksuojant mažinamas kanalo rezervavimo kartų skaičius, o tai mažina kanalo resurso išnaudojimą ir didina multipleksavimo efektyvumą.

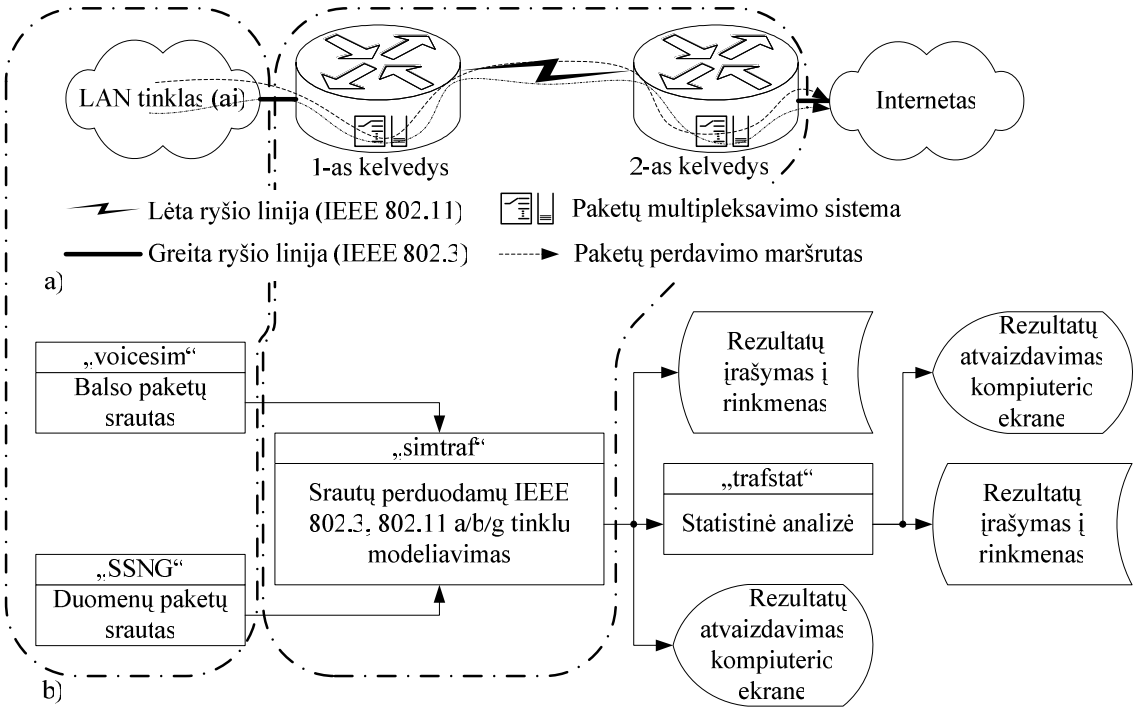
Iš analitinio tyrimo aišku, kad perduodant balsą IEEE 802.11a, b bei g protokolo bevielės kreipties tinklais ir naudojant vieną iš minėtų multipleksavimo protokolų, kanalo resurso išnaudojimas sumažėja nuo 10 iki 90 %. Atsilaisvinusi kanalo dalis gali būti naudojama duomenų perdavimui.

5.2 Multipleksavimo protokolo modeliavimas

Siūlomo multipleksavimo algoritmo tyrimai buvo atliekami modeliuojant balso ir duomenų paketų perdavimą ryšio kanalu, jungusiu dvi stotis, kuriuose buvo įdiegtas MUX protokolas. Balsas buvo generuojamas pagal eksponentinį kalbos ir tylos trukmių pasiskirstymo, o duomenys – pagal auto modelį. Modeliavimo tikslais buvo sukurta programinė įranga C kalba, virš 5000 programos eilučių ir veikianti Unix OS terpėje.

5.2.1 Tyrimų metodika

Ketvirtame skyriuje aptartos balso ir duomenų srautų generavimo programos buvo panaudotos kaip duomenų šaltiniai. Abiejų srauto generavimo programų rezultatai, tokie, kaip paketų šaltinio eilės numeris, paketo starto laikas, jo dydis, prioritetas ir programos kodas[9], yra įrašomi į rinkmenas. Po to šios rinkmenos yra apdorojamos šio darbo metu sukurta `simtraf` programine įranga, kurios išeities tekstas pateikiamas 1 priede. Ši programinė



5.21 pav. Modeliavimo schema: a) modeliuojamo tinklo topologija, b) naudojamų programų tarpusavio ryšiai

[9] Programos kodas yra suprantamas kaip TCP arba UDP paketo gavėjo sąsajos numeris.

įranga modeliuoja paketų perdavimą IEEE 802.3 arba 802.11a ir b bei g[10] ryšio kanalais viena kryptimi, „taškas - taškas“ sujungimuose naudojant multipleksavimą. Modeliavimo schema pateikiama 5.21 paveiksle.

Programos darbo algoritmas paremtas diskretinių įvykių modeliavimu [179, 180]. Modeliuojant paketų perdavimą `simtraf` programa, galima keisti fizinio kanalo standartą, perdavimo spartą bei siuntimo buferių dydį, be to, įjungti ar išjungti kanalo rezervavimo mechanizmą, įjungti ar išjungti tam tikrą multipleksavimo tipą, keisti multipleksavimo buferių kaupimo laikus įvairiems duomenų tipams, keisti duomenų šaltinio duomenų srauto intensyvumą bei siuntimo buferių dydį. Tyrimų metu, keičiant šiuos parametrus, buvo tiriamas kuriamo multipleksavimo efektyvumas.

5.2.2 Modeliavimo rezultatai

Balso perdavimo IEEE 802.11 tinklais modeliavimo metu buvo analizuojama balso perdavimo WLAN tinklais galimybės bei analizuojama siūlomo multipleksavimo algoritmo įtaka kanalo našumui. Pradiniai modeliavimo duomenys pateikiami 5.3 lentelėje.

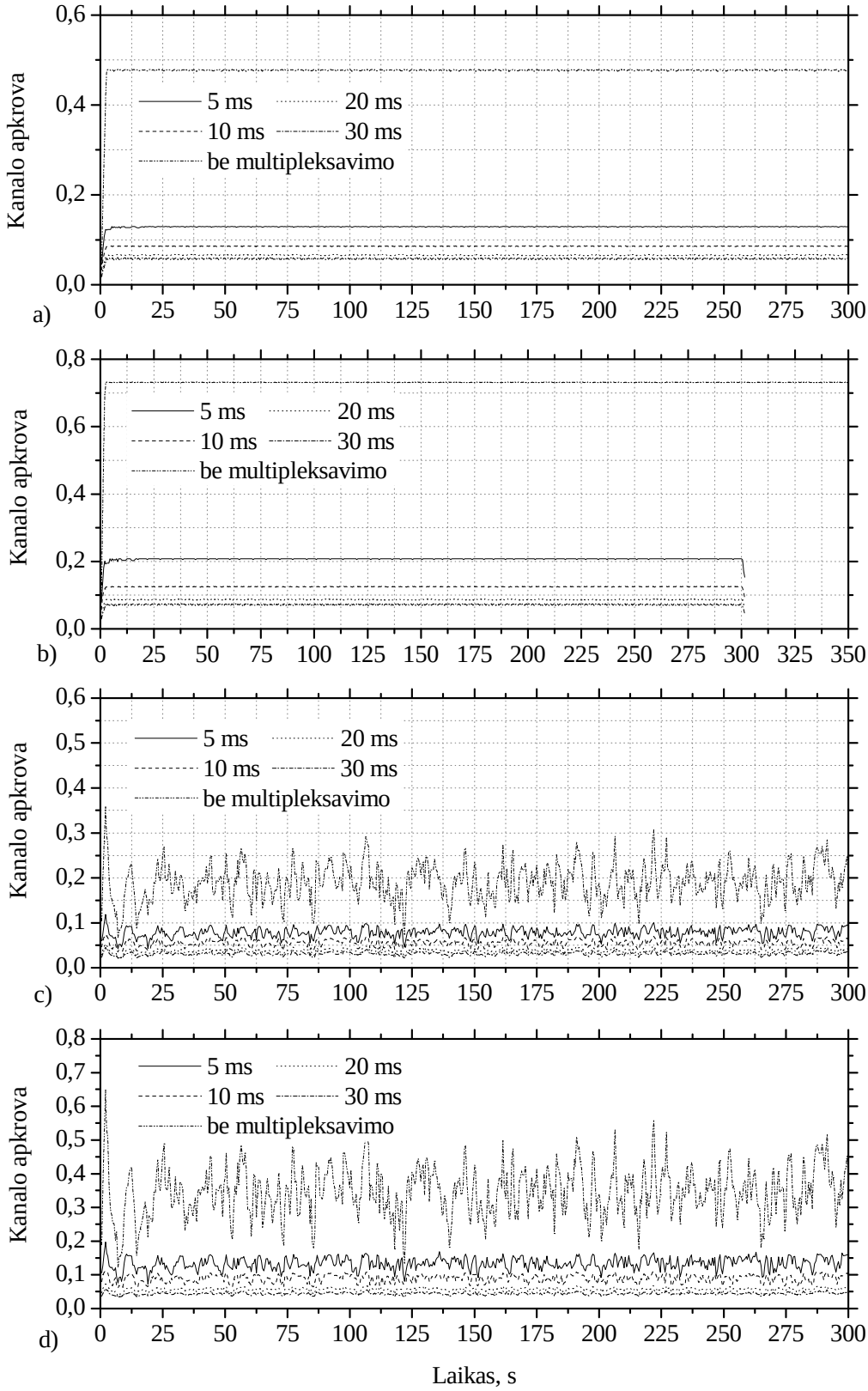
5.3 lentelė. Multipleksavimo protokolo modeliavimo pradiniai duomenys

Parametras	Reikšmė(s)		
Tinklas	IEEE 802.11b		
Kanalo perdavimo sparta	11 Mb/s		
Perdavimo režimas	DCF (su ir be kanalo rezervavimo)		
Klaidingų bitų dažnis	0		
Tarpaketinių laikų reikšmės	t_{DIFS} = 50 μs	t_{SIFS} = 20 μs	t_{CW} = 300 μs
Išsiuntimo buferio dydis	128 K baitai*		
Perdavimo kryptis	Vienakryptė		
Balso kodavimo algoritmas	G.723.1 6,3 kb/s		
Balso paketo formavimo laikas	30 ms		
Siunčiamų balso paketų skaičius	1		
Paketų perdavimo protokolai	IP/UDP/RTP		
Kalbos aktyvumo rodiklis	0,3875**		
Balso šaltinių skaičius	30		
Balso šaltinio generavimo laikas	400 s		
Duomenų šaltinių skaičius	30		
Hersto parametro reikšmė	0,6		
Duomenų šaltinio generavimo laikas	~500 s		
Automodelio kanalo intensyvumas	0,5		

* – Literatūroje galima aptikti atvejus, kai modeliavimuose siuntimo buferio dydis svyruoja nuo 32 KB iki 256 KB [181, 182], pasirinktas dydis atitinka šių reikšmių vidurkį.

** – Modeliavimai buvo atlikti ir su išjungtu kalbos aktyvumo detektoriumi.

[10] Modeliavime yra naudojamas CCK/OFDM moduliacijos tipas, leidžiantis pasiekti 54 Mb/s perdavimo greitį.



5.22 pav. Kanalo apkrova perduodant balsą IEEE 802.11b 11 Mb/s tinklu

Balso perdavimo ryšio kanalu modeliavimas. Iš pradžių buvo modeliuotas tik balso perdavimas WLAN tinklais. Modeliavimo rezultatai, vaizduojantys kanalo perdavimo spartą pagal išraišką (3.10) naudojant ir nenaudojant multipleksavimo algoritmo, pateikiami

5.22 paveiksle. Matyti, kad jei multipleksavimas ir balso aktyvumo detektorius išjungtas (5.22 paveikslas, a, b), t. y. kai informacijos perdavimo sparta yra fiksuota (angl. – Constant Bit Rate – CBR), modeliavimo rezultatai sutampa su trečiame skyriuje pateikiamais analitiniais skaičiavimo rezultatais (4.27 paveikslas). Taip pat verta pažymėti, kad tinkle su kanalo rezervavimu (5.22 pav., b) 30 balso šaltinių pilnai apkrauna kanalą, ir paketai yra priversti laukti išsiuntimo buferio eilėje. Nors dėl didelio buferio dydžio, nė vienas iš paketų nebuvo prarastas, tačiau dėl per didelio vėlinimo (paskutinis paketas atėjo suvėlintas 50 s) pokalbis darosi neįmanomas. Kai duomenų paketo dydis lygus 64 baitams (tokius paketus generuoja balso kodavimo algoritmas), maksimalus pralaidumas IEEE 802.11b tinkle esant 11 Mb/s perdavimo spartai ir įjungus RTS/CTS funkciją yra tik 0,503 Mb/s (2.10), tuo tarpu 30 balso kanalų generuoja bendrą 0,512 Mb/s (5.9) duomenų srautą. Kadangi įeinantis srautas yra didesnis nei tinklas pralaidumas, paketai privesti laukti išsiuntimo buferiuose ir tinklas įsisotina. Dėl varžymosi periodo įsisotinimo metu kanalo apkrova išauga tik iki 0,8.

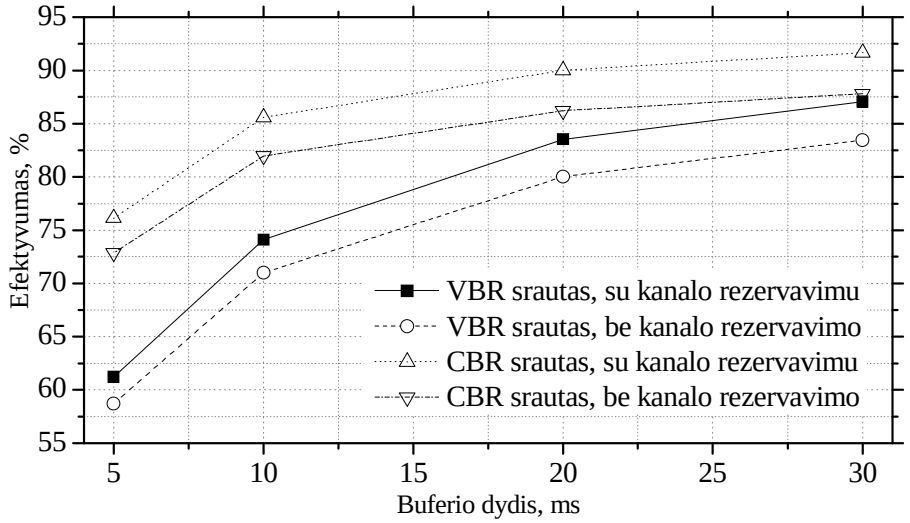
$$v_{\Sigma} = \frac{8(n_b + n_{VoIP})}{t_0} n \,, \tag{5.9}$$

čia n_b – balso paketo dydis (4.4 lentelė), n_{VoIP} – balso per IP paketų antraščių suma (4.20–4.21 paveikslai), n – kalbos šaltinių skaičius, t_0 – paketo formavimo laikas (4.4 lentelė).

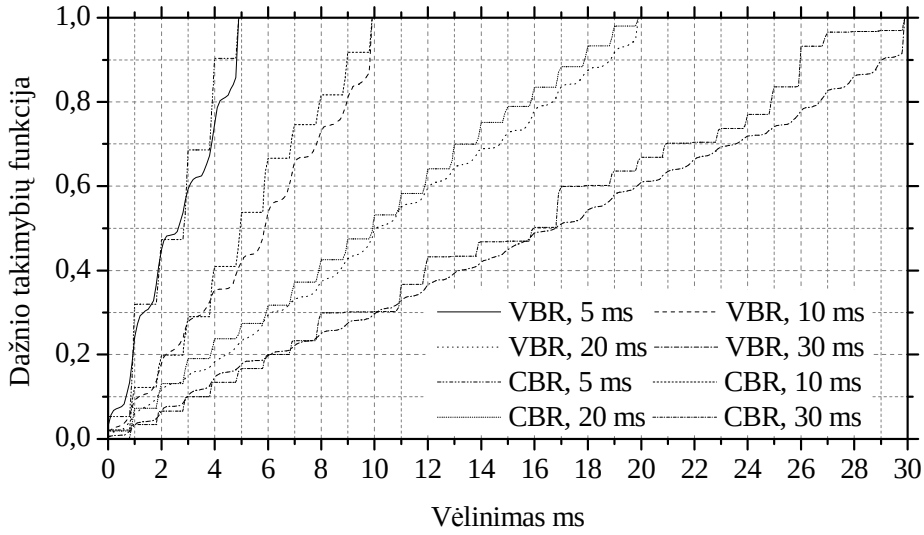
Įjungus kalbos aktyvumo detektorių, t. y. kai informacijos perdavimo sparta yra kintama (*angl. – Variable Bit Rate* – VBR) ir mažesnė nei CBR atveju, tiek tinklas su kanalo rezervavimu (5.22 pav., c), tiek be jo (5.22 pav., d) neįsisotina ir perduoda paketus be žymaus vėlinimo. Įjungus multipleksavimą, kanalo perdavimo sparta sumažėja nuo 2 iki 8 kartų, priklausomai nuo šaltinio tipo, kanalo rezervavimo bei buferio kaupimo laiko. Iš modeliavimo rezultatų gautas multipleksavimo efektyvumo skaičiavimas pagal (5.1) išraišką pateikiamas 5.23 paveiksle. Iš šio paveikslo matyti, kad didžiausias efektyvumas pasiekiamas tada, kai naudojami ilgiausi buferių formavimo laikai.

Multipleksavimo efektyvumas yra didesnis tinkluose su kanalo rezervavimu, nes juose yra didesnis perteklinės informacijos kiekis. Multipleksavimo įnešto paketų vėlinimo pasiskirstymo grafikai pateikiami 5.24 paveiksle. Akivaizdžiai matyti, kad VBR atveju maksimalus vėlinimo laikas sutampa su buferio formavimo laiko reikšme. CBR balso sraute yra griežtai pasikartojančios paketų serijos, todėl vėlinimo kreivės turi daug maksimumų. Kaip parodė detalesni tyrimai, paketų vėlinimas KMUX protokolo veikimo CBR atveju yra mažesnis nei VBR atveju, nes multipleksavimo protokolo buferių formavimo pradžios laikai automatiškai prisiderina prie pasikartojančios paketų serijos. Multipleksuotų kadrų dydžio

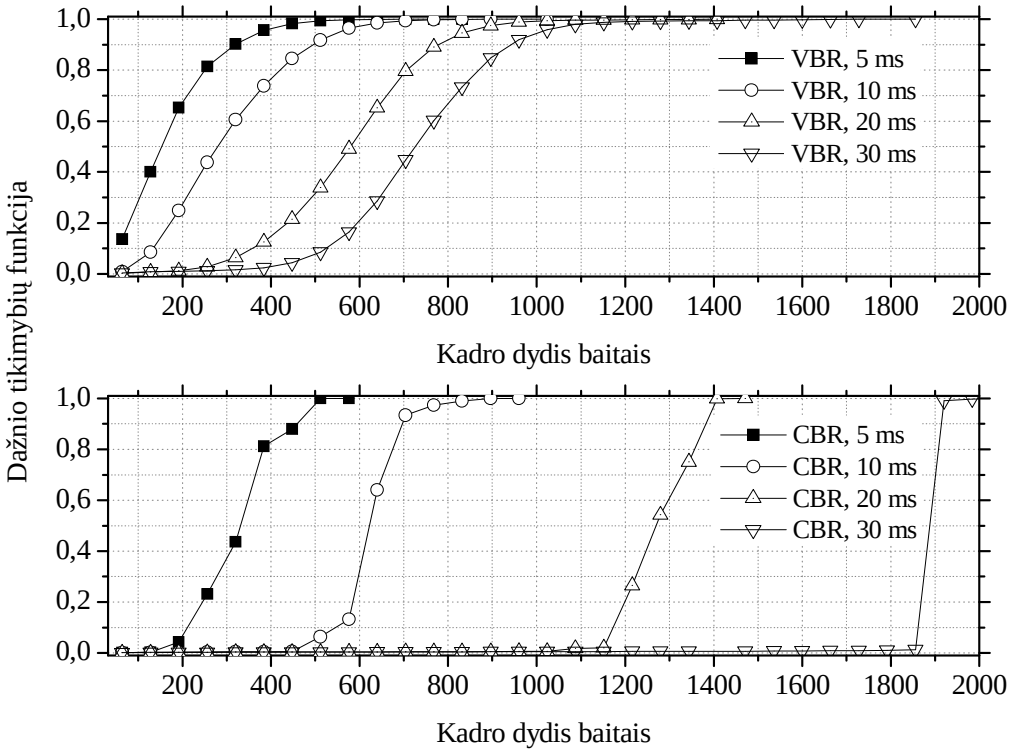
dažnių tikimybių funkcija pateikiama 5.25 paveiksle. Čia matyti, kad CBR atveju kanalu yra išsiunčiami didesni kadrai. Tai patvirtina 5.23 pav. grafikas, pagal kurį CBR srautas yra multipleksuojamas efektyviau nei VBR. Iš 5.26 pav. matyti, kad, išjungus kalbos aktyvumo detektorių viename multipleksavimo kadre, multipleksuojamų paketų skaičiaus išsibarstymas yra mažesnis, o tai savo ruožtu įtakoja mažesnę tirtį. Atskirą atvejį sudaro, kai multipleksavimo buferio laikmačio trukmė yra 30 ms ir balso kodavimo algoritme nėra naudojamas kalbos aktyvumo detektorius. Tuomet viename multipleksuotame kadre išsiunčiami visų šaltinių balso paketai (5.26 paveikslas, b). Balso kodavimo algoritmas generuoja paketus kas 30 ms, taigi per ši laikotarpį visi balso šaltiniai sugeneruoja po vieną balso paketą, kurie surenkami ir išsiunčiami iš multipleksavimo buferio būtent po 30 ms.



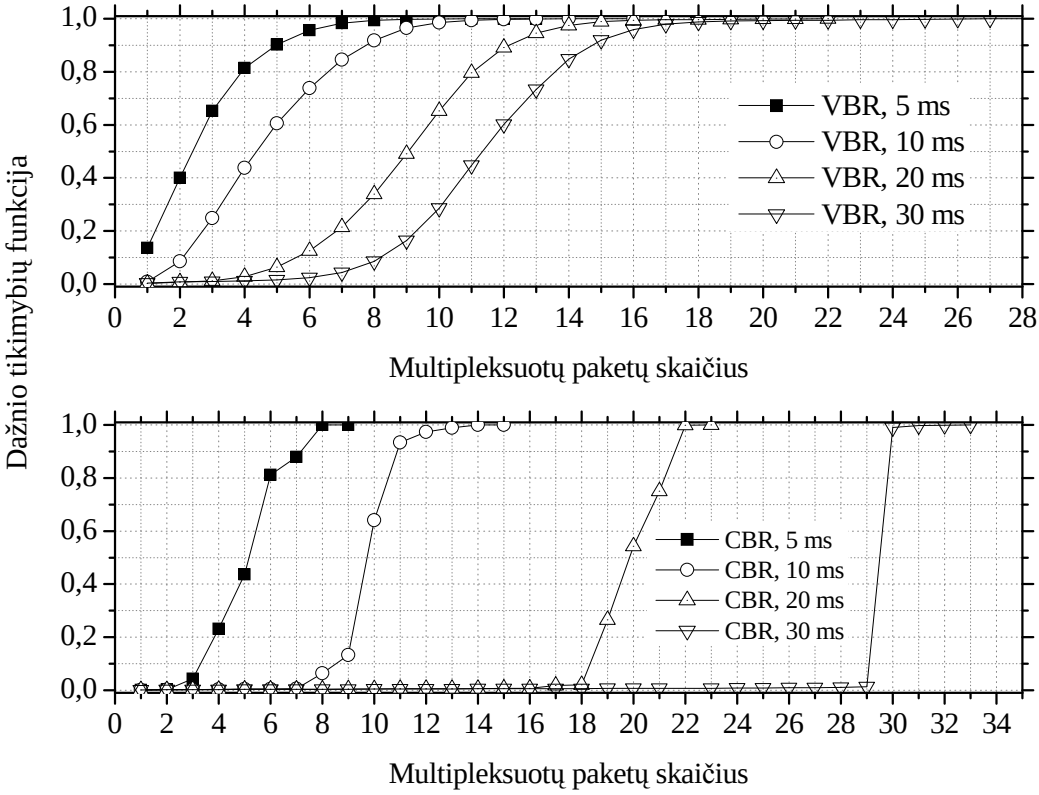
5.23 pav. Balso multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo buferio formavimo laiko IEEE 802.11b 11 Mb/s tinkle



5.24 pav. Balso paketų vėlinimų dėl multipleksavimo pasiskirstymas.



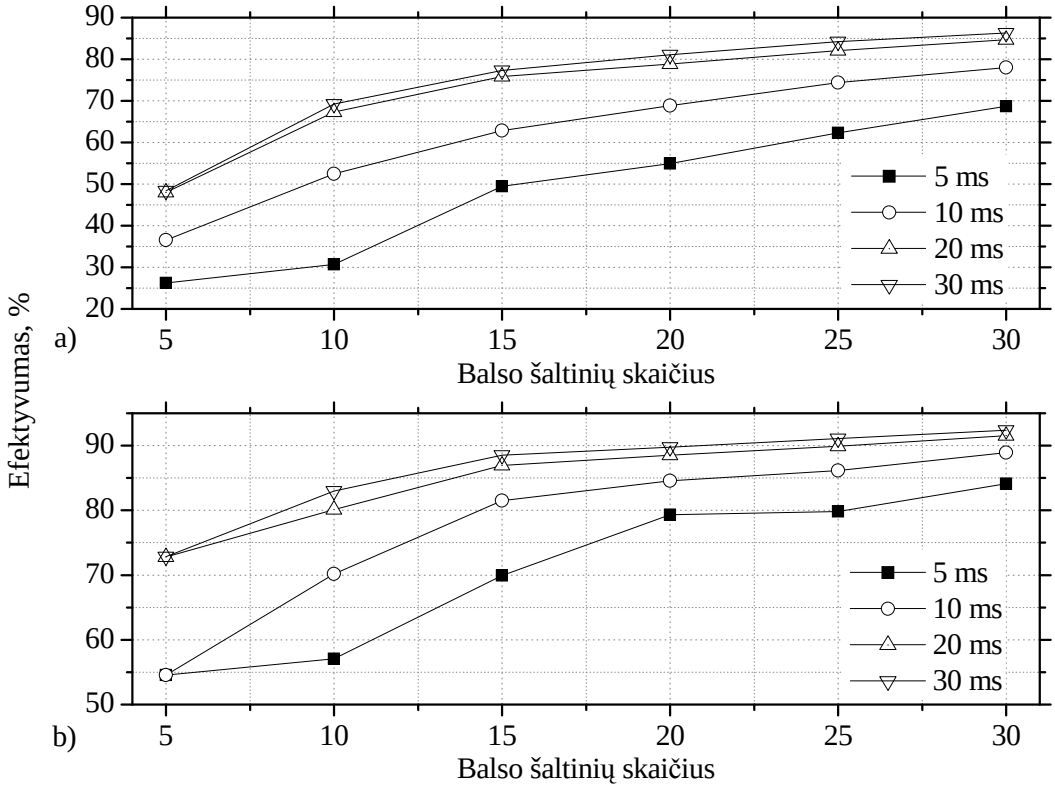
5.25 pav. Multipleksuoto balso srauto kadrų dydžio pasiskirstymai: a) VBR srautas b) CBR srautas



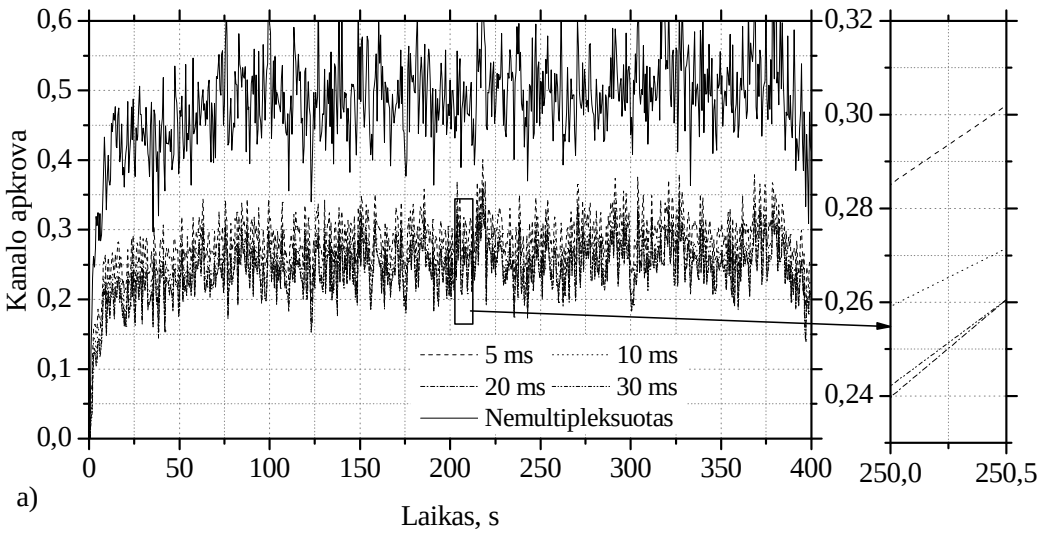
5.26 pav. Multipleksuojamų paketų pasiskirstymo viename IEEE 802.11b kadre priklausomybė nuo buferio formavimo laiko: a) VBR srautas, b) CBR srautas

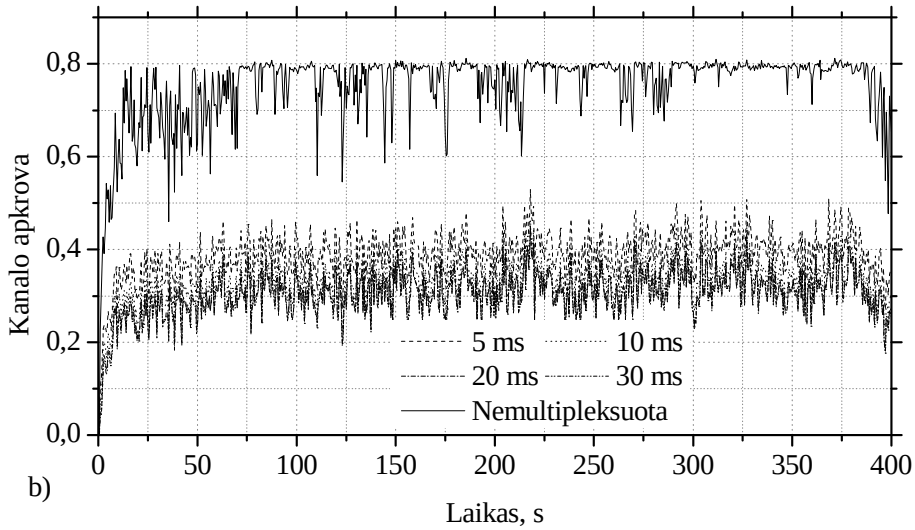
Multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo balso šaltinių skaičiaus pateikiama 5.27 paveiksle. Iš pateikiamų rezultatų matyti, kad modeliavimo metu gauti rezultatai sutampa su analitiškai apskaičiuota priklausomybe tarp balso šaltinių skaičiaus ir multipleksavimo efektyvumo (5.17 pav.), t. y. didėjant balso šaltinių skaičiui, didėja ir multipleksavimo efektyvumas. Iš grafiko taip pat matyti, kad CBR atveju multipleksavimo efektyvumas yra didesnis ne VBR.

Duomenų perdavimo ryšio kanalo modeliavimas. Multipleksavimo efektyvumo tyrimas taip pat buvo atliktas perdavinėjant ryšio kanalu vien tik duomenų paketus. Buvo pasirinkta 2 Mb/s perdavimo sparta, kurią generavo 30 duomenų šaltinių. Tai atitiktų vartotojų tinklų atvejį, kai internetu tuo pat metu naudojasi 30 vartotojų, kiekvienas iš jų duomenis siųsdamas ~ 64 kb/s perdavimo spartą. Modeliavimo rezultatai, vaizduojantys kanalo apkrovą naudojant ir nenaudojant multipleksavimo algoritmo, pateikiami 5.28 paveiksle. Iš grafiko akivaizdžiai matosi, kad multipleksavimo įvedimas, net mažiausiam buferio formavimo laikui 5 ms, sumažina kanalo apkrovą apie 2 kartus. Tai mažiau nei balso srautui, nes duomenų srauto šaltinis generuoja skirtingų dydžių paketus, kurių aritmetinis vidurkis yra 368 baitai, tuo tarpu balso srauto šaltinis – tik mažus 64 baitų dydžio paketus.

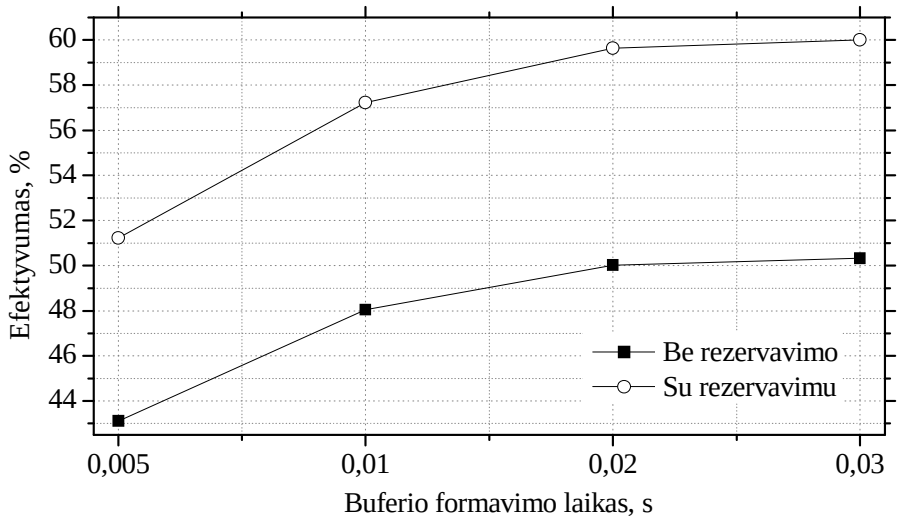


5.27 pav. Multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo balso kanalų skaičiaus: a) VBR srautas, b) CBR srautas



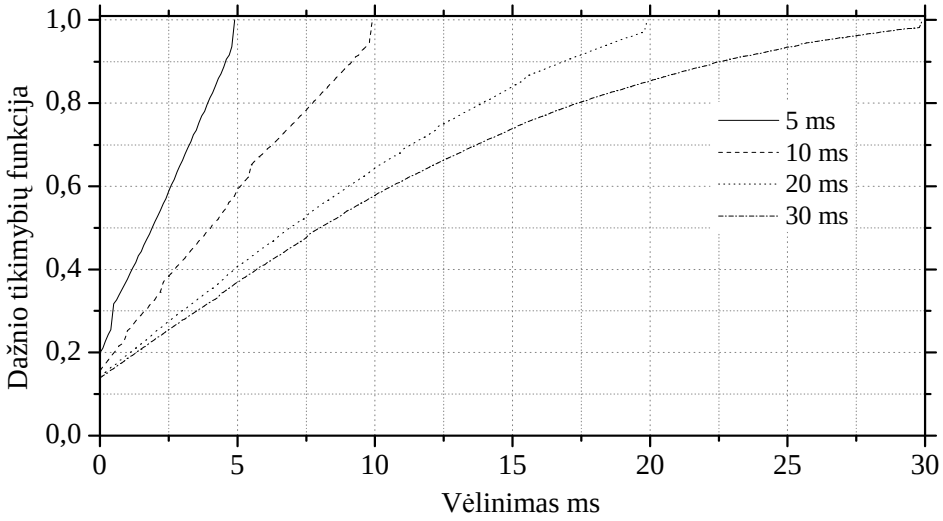


5.28 pav. Duomenų perdavimas IEEE 802.11b 11 Mb/s tinklu: a) be kanalo rezervavimo, b) su kanalo rezervavimu

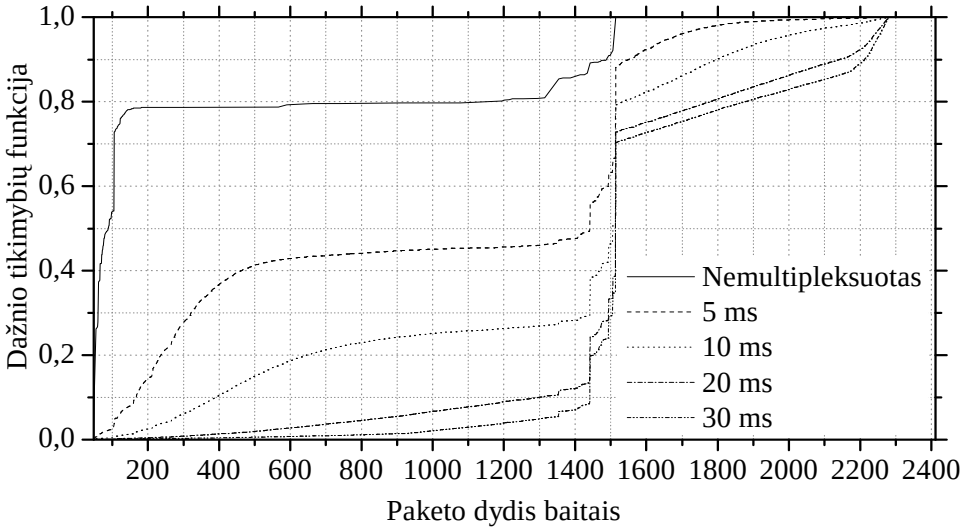


5.29 pav. Duomenų multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo buferio formavimo laiko IEEE 802.11b 11 Mb/s tinkle

Duomenų multipleksavimo efektyvumo vertinimas pateikiamas 5.29 paveiksle. Matyti, kad lyginant su balso multipleksavimo efektyvumu, duomenų efektyvumas yra ~30 % mažesnis. Vėlinimų pasiskirstymo priklausomybė nuo buferių formavimo laiko pateikiama 5.30 paveiksle. Kaip ir balso atveju, vėlinimas visame buferio kaupimo laiko intervale pasiskirsto maždaug tolygiai. Multipleksuoto duomenų srauto kadrų dydžio pasiskirstymas pateikiamas 5.31 paveiksle. Matyti, kad maži (iki 150 baitų) nemultipleksuoto srauto paketai sudaro apie 80 % visų perduodamų paketų. Tuo tarpu įjungus multipleksavimo algoritmą, mažų paketų skaičius sumažėja net esant mažai buferio formavimo trukmei. Staigus paketų kiekio šuolis ties 1514 padala aiškinamas tuo, kad maksimalus duomenų šaltinių kadro dydis yra būtent 1514 baitai, o tai atitinka tipines vartotojų tinklų sąlygas (žiūr. 3 skyrių). Tuo tarpu



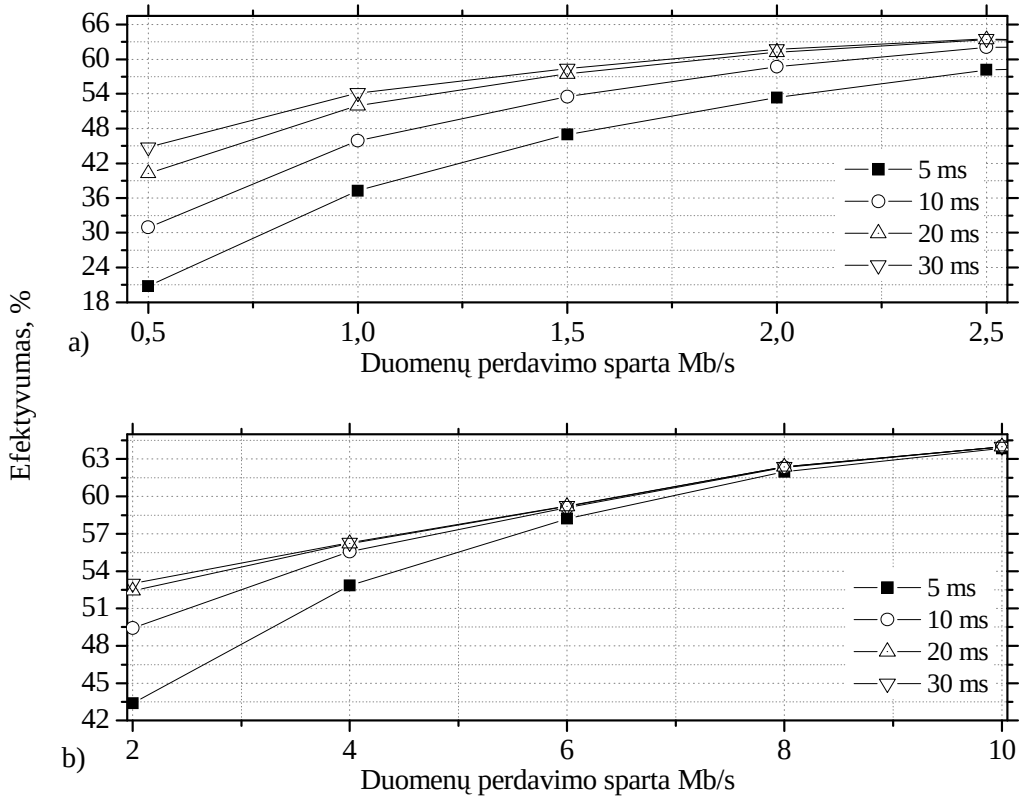
5.30 pav. Duomenų paketų vėlinimų pasiskirstymas priklausomai nuo buferių formavimo laiko



5.31 pav. Multipleksuoto duomenų srauto kadrų dydžio pasiskirstymai

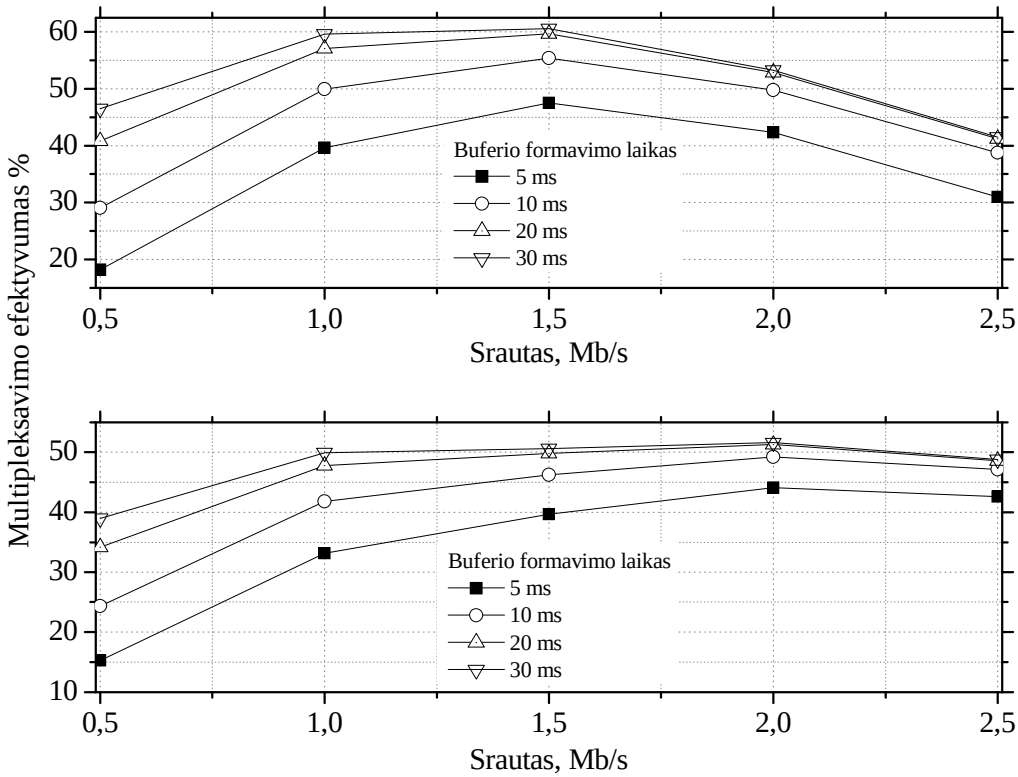
IEEE 802.11 standarte maksimalus IP paketo dydis yra 2304 baitai, o tai leidžia papildomai sujungti kartu (multipleksuoti) netgi maksimalų duomenų šaltinių paketą su keletu mažų paketų. Tai dar labiau padidina kanalo išnaudojamumą.

Iš 5.31 pav. matyti, kad priklausomai nuo buferio formavimo laiko tokių „didelių“ paketų yra nuo 12 % iki 30 %. multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo įeinančio srauto dydžio pateikiama 5.32 paveiksle. Matyti, kad kai didėja įeinančių duomenų srautas, didėja ir multipleksavimo efektyvumas, nes vis daugiau paketų patenka į multipleksavimo buferius. IEEE 802.11b tinkle multipleksavimo efektyvumas yra didesnis nei IEEE 802.11a, dėl didesnių tarnybinių intervalų. Tačiau šis paveikslas yra gautas naudojant neribotą išsiuntimo buferio dydį, t. y. paketai niekada nėra prarandami. Tuo tarpu 5.33 pav. pateikiama multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo įeinančio duomenų srauto, kai išsiuntimo buferio dydis yra 128 K baitai. Grafike aiškiai matyti ekstremumai, kurie sutampa su maksimaliu kanalo laidumu. Iš eksperimentinių duomenų (žiūr. 4 skyrių) vidutinis paketo dydis yra 368 baitai, tuomet IEEE 802.11b tinkle maksimalus laidumas yra ~ 2,5 Mb/s nenaudojant kanalo rezervavimo, bei 1,5 Mb/s/ naudojant rezervavimą (3.10). Tačiau realiai maksimalus pralaidumas mažesnis, nes dauguma perduodamų paketų yra mažesni už vidutinį



5.32 pav. Multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo į stotį įeinančio duomenų srauto intensyvumo: a) IEEE 802.11b 11 Mb/s, be kanalo rezervavimo, b) IEEE 802.11a 54 Mb/s, be kanalo rezervavimo. Stoties siuntimo buferio dydis begalinis

dydį, todėl realus duomenų srautas yra mažesnis. Kai įeinantis duomenų srautas pasidaro didesnis už maksimalų kanalo laidumą, o išsiuntimo buferis persipildo, paketai yra prarandami. Todėl, esant didesniam apkrovimui, nei maksimalus laidumas, efektyvumas pradeda mažėti, nes laikas reikalingas perduoti nemultipleksuotus paketus neįvertina tų paketų kurie buvo prarasti, tuo tarpu multipleksuojant, kanalo apkrova sumažėja ir visi paketai yra sėkmingai persiunčiami (5.3).

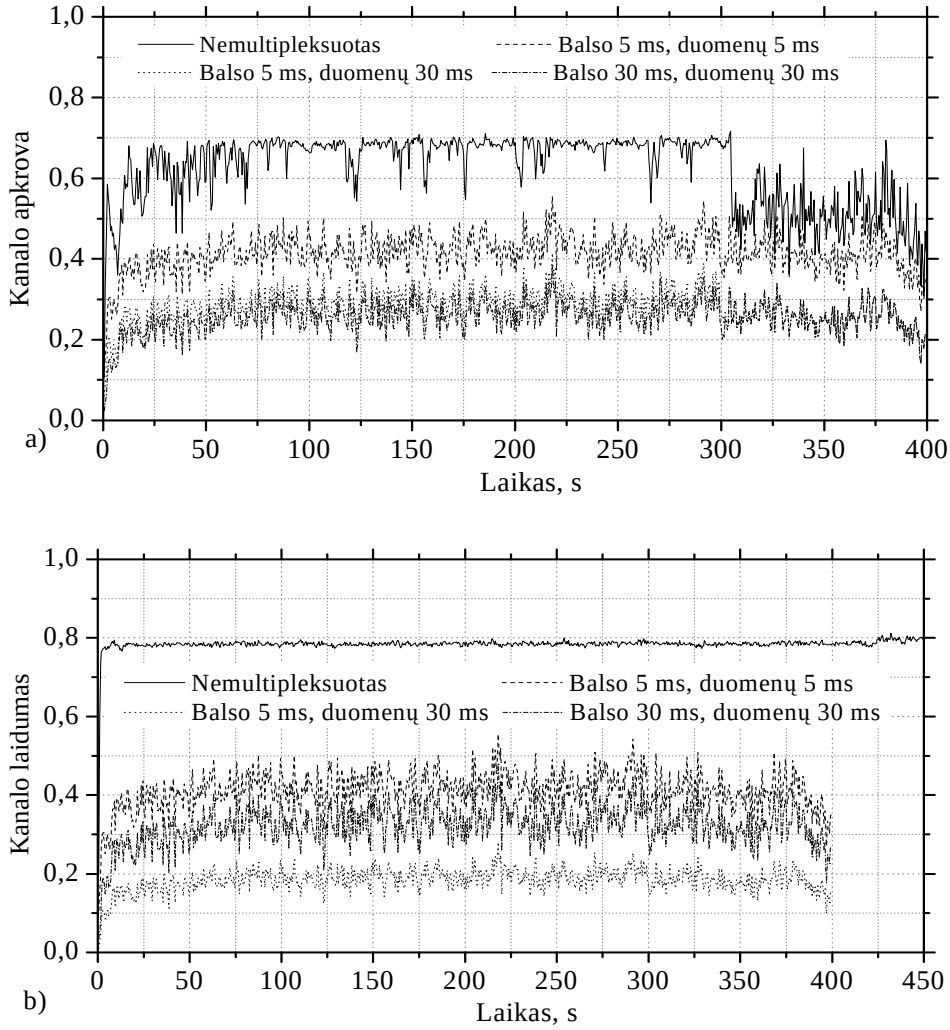


5.33 pav. Multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo į stotį įeinančio duomenų srauto intensyvumo: a) IEEE 802.11b 11 Mb/s, su kanalo rezervavimu, b) IEEE 802.11b, be kanalo rezervavimo. Stoties siuntimo buferio dydis 128 K baitai

Balso ir duomenų perdavimo ryšio kanalo modeliavimas. Kaip jau buvo minėta, sukurtas KMUX multipleksavimo algoritmas leidžia apjungti balso ir duomenų srautą, perduodant jį dideliais kadrais. Modeliuojant buvo siekiama ištirti, kaip multipleksavimo algoritmas gali veikti kai vienu metu duomenys perdavinėjami kartu su balsu. Šio modeliavimo metu buvo panaudotas tas pats duomenų ir balso srautas, kaip ir ankstesniuose dviejuose tyrimuose. Modeliavimo metu atskirai buvo keičiami balso ir duomenų buferių formavimo laikai.

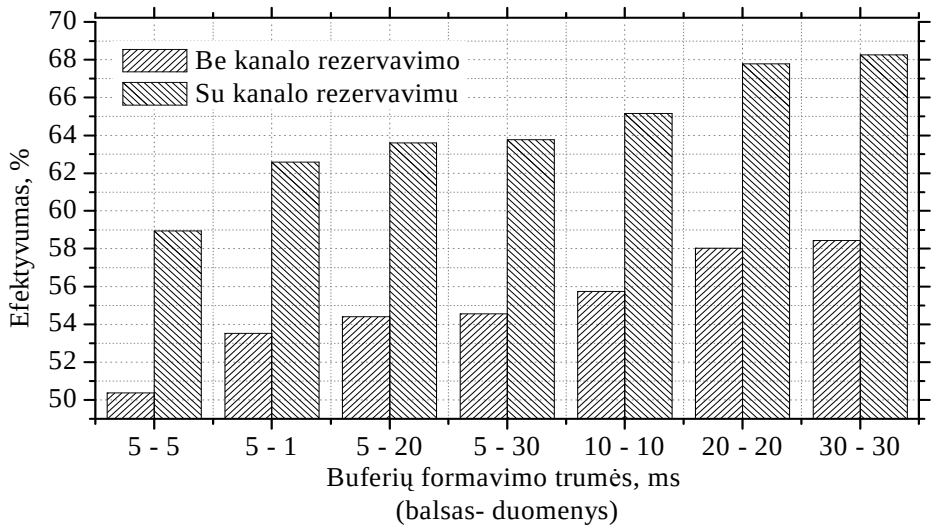
Kanalo perdavimo spartos priklausomybė nuo buferių formavimo laiko pateikiama 5.34 paveiksle. Iš grafiko matyti, kad nenaudojant multipleksavimo kanalas yra arti maksimalios kanalo apkrovos. Panaudojus multipleksavimą kanalo perdavimo sparta

sumažėja apie 2 kartus. Kanalo apkrovos sumažėjimą ties modeliavimo 300 s momentu paaiškina tai, kad balso šaltiniai nustoja generuoti srautą. Kai yra naudojamas kanalo rezervavimas, tuomet kanalas įsisotina, ir siunčiami paketai pradedami vėlinti bei dingti dėl buferio persipildymo. Matyti, kad įjungus multipleksavimą kanalas išsilaisvina, ir perduodami visi paketai. Multipleksavimo efektyvumo tyrimo rezultatai pateikiami 5.35 paveiksle, iš kurio matyti, kad kuo didesnis buferio formavimo laikas, tuo didesnis efektyvumas. Verta pastebėt, kad duomenų buferio laiko padidinimas duoda mažesnį efektyvumo padidėjimą, nei (poros 5–30 ir 10–10). Sumažinus duomenų formavimo laiką nuo 30 ms iki 10 ms, tačiau padidinus balso kaupimo laiką nuo 5 ms iki 10 ms, efektyvumas padidėja. Tai atsitinka dėl to, kad visą balso srautą sudaro tik maži paketai, tuo tarpu duomenų paketai yra įvairių dydžių. Vėlinimo pasiskirstymo grafikas pateikiamas 5.36 paveiksle. Matyti, kad, kaip ir ankstesniais atvejais, vėlinimas pasiskirsto tolydžiai. Išimtimi yra tik vidurinė kreivė, nes čia balso kaupimo laikas buvo mažesnis nei duomenų, todėl balso paketų vėlinimas atsispindi staigiu

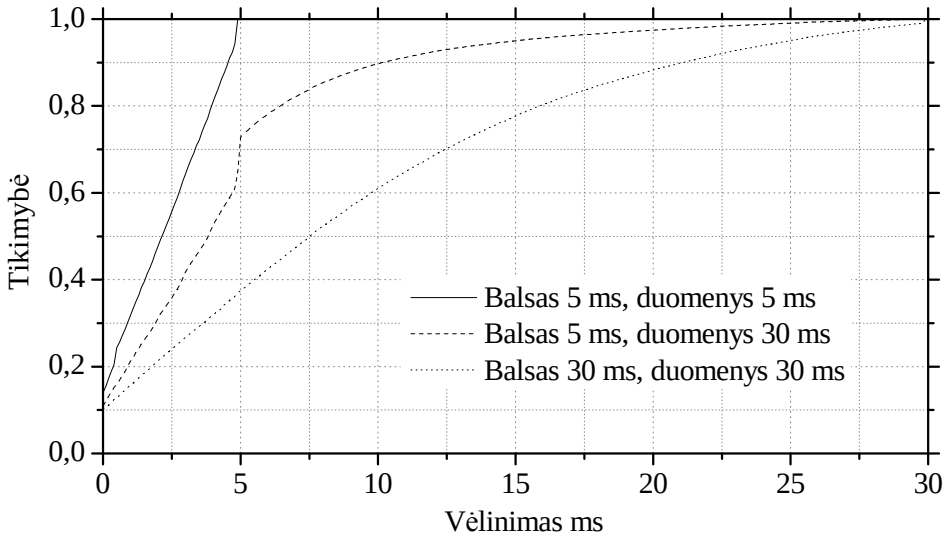


5.34 pav. Duomenų ir balso perdavimas IEEE 802.11b 11 Mb/s tinklu: a) be kanalo rezervavimo, b) su kanalo rezervavimu

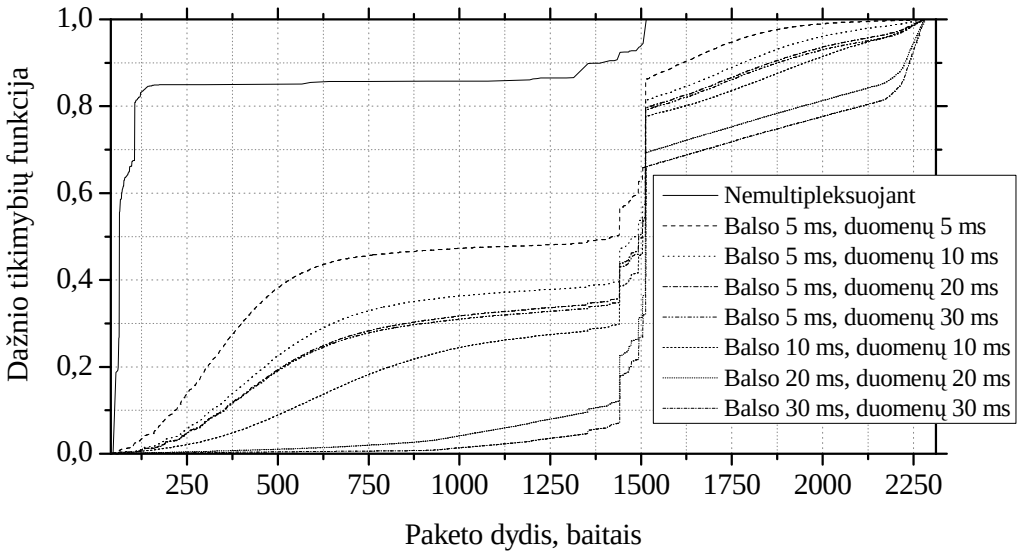
vėlinimo padidėjimu ties 5 ms žyme. Multipleksuoto duomenų srauto kadrų dydžio pasiskirstymas pateikiamas 5.37 paveiksle. Matyti, kad nemultipleksuoto srauto maži paketai (iki 150 baitų) sudaro virš 85 % visų perduodamų paketų. Mažų paketų kiekį padidino kartu su duomenimis perduodami maži balso paketai. Tuo tarpu įjungus multipleksavimo algoritmą, mažų paketų skaičius nukrito taip pat ženkliai, kaip ir perduodant vien tik duomenį srautą. Kuo didesnis buferio kaupimo laikas, tuo daugiau didelių paketų yra perduodami kanalu (pagal modeliavimo rezultatus virš 65 %).



5.35 pav. Duomenų ir balso multipleksavimo efektyvumo priklausomybė nuo buferio formavimo laiko IEEE 802.11b 11 Mb/s tinkle



5.36 pav. Duomenų ir balso paketų vėlinimų pasiskirstymas priklausomai nuo buferių formavimo laiko



5.37 pav. Multipleksuoto duomenų ir balso srauto kadrų dydžių pasiskirstymai

Kokybės vertinimas. Visi šie modeliavimo rezultatai pasiekti esant idealioms kanalo sąlygoms, tačiau realiai tokių kanalų nebūna. Multipleksuoto kadro perdavimas užima daug laiko, todėl, dingus ryšio kanale tokiam kadrui tektų kartoti siuntimą iš naujo, o tai sumažins kanalo naudojimo efektyvumą. Todėl yra būtina sukurti naują mechanizmą, kuris pagal kanalo būklę dinamiškai koreguotų maksimalų kadro dydį taip, kad būtų pasiektas geriausias efektyvumas.

5.3 Skyriaus išvados

Šio skyriaus analizės pagrindiniai rezultatai yra šie:

1. susisteminta efektyvumo didinimo metodika ir parinkta WLAN tinklų modifikavimo kryptis, sukuriant naują kompleksinį multipleksavimo būdą;
2. sukurta multipleksavimo algoritmo vertinimo metodika;
3. suformuluoti reikalavimai ir sukurtas kompleksinis multipleksavimo algoritmas, skirtas vartotojų prieigų tinklams, kuriuose naudojami bevielio ryšio kanalai;
4. pasiūlyta skirtingų prioritetų srautus talpinti į skirtingus multipleksavimo buferius. Taip pasiekiamas mažas duomenų, kurie yra jautrūs delsai, vėlinimas ir didelis multipleksavimo efektyvumas visam kitam likusiam srautui. Adaptyvios buferio išsiuntimo sąlygos naudojimas užtikrina, kad išsiuntimo metu kadras yra didžiausias;
5. sukurtos programinės priemonės C programavimo kalba Unix operacinei sistemai multipleksavimo algoritmui modeliuoti IEEE 802.11 a/b/g tinkluose;
6. modeliavimo rezultatai rodo, kad:

a) perduodant tik balsą, multipleksavimo efektyvumas išauga iki 90 %. Perduodant tik duomenis – iki 60%, o perduodant balsą ir duomenis kartu, iki 68 %,

b) multipleksavimo efektyvumas labai priklauso nuo duomenų šaltinio savybių bei buferių formavimo laiko;

7. panaudojant aukščiau aprašytą multipleksavimo algoritmą, galima padidinti kanalo panaudojimo efektyvumą, kartu padidinant VPT talpumą.

6. DARBO REZULTATŲ APIBENDRINIMAS

Šiame darbe pateiktą medžiagą galima būtų apibendrinti tokiomis pagrindinėmis išvadomis:

1. Bevielio ryšio priemonės vartotojų prieigų tinkluose – tai alternatyva laidinio ryšio priemonėms, kurių realiais savininkais išlieka telekomai.
2. Laboratorijos ir lauko sąlygomis atlikti IEEE 802.11b standarto įrangos eksperimentiniai tyrimai leidžia teigti, kad signalo ir triukšmo lygiai stacionariose linijose laikui bėgant kinta nežymiai, todėl minėtą įrangą galima rekomenduoti diegti vartotojų prieigų tinkluose.
3. Tipinius IEEE 802.11b standarto pagrindu sukurtus įrenginius galima sėkmingai naudoti pavienių vartotojų tinklų prieigose bendrųjų telefono ir interneto paslaugų tiekėjų tinklams sujungti, kai ryšio nuotolis siekia nuo keleto šimtų metrų iki maždaug 20 km.
4. Kai balso šaltinių nedaug ir duomenų srautas nėra didelis (bendra apkrova neviršija 50% vienakrypčio kanalo laidumo), vartotojų prieigų tinklams taikytina standartinė IEEE 802.11a,b bei g įranga.
5. Eksperimentiškai ištirtuose tinkluose, panašiuose į vartotojų tinklus, 50 % perduodamų paketų skaičiaus sudaro paketai, kurių dydis yra iki 100 baitų.
6. Pateikti duomenys taip pat akivaizdžiai rodo, kad perduodant balsą IEEE 802.11b protokolo tinklu, sudėtingi balso kodavimo algoritmai (G.723.1, G.729) yra mažai efektyvūs, o kanalo apkrova, lyginant su G.711 algoritmu, mažėja nežymiai.
7. Eksperimentiškai tyrinėjant koduoto balso signalo kalbos ir tylos intervalų trukmes bei jų tarpusavio ryšius, nustatyta, kad gretimų intervalų trukmės yra koreliuotos. Tipinis koreliacijos koeficientas yra neigiamas, todėl bendro kalbos ir tylos periodo dispersija yra mažesnė lyginant su analogiškų nepriklausomų periodų dispersija.
8. Sukurtas naujas duomenų ir balso paketų grupavimo algoritmas gali žymiai pagerinti apkrautų ryšio kanalų naudojimo efektyvumą. Modeliavimo rezultatai parodė, kad efektyvumas padidėja iki 7 kartų.
9. Multipleksavimo algoritme panaudotas naujas paslaugos kokybės užtikrinimo mechanizmas, leidžiantis kontroliuoti srauto vėlinimą multipleksavimo buferiuose, nemažinant multipleksavimo efektyvumo.
10. Sukurta programinė įranga C kalba Unix operacijų sistemai paketų grupavimo priemonėms modeliuoti. Modeliavimo būdu išnagrinėta grupavimo algoritmo

parametrų įtaką jo efektyvumui. Nustatyta, kad, esant net mažam multipleksavimo buferio formavimo laikui, kanalo išnaudojimo efektyvumas padidėja keletą kartų.

11. Atliktų tyrimų pagrindu pasiūlytas vartotojų radijo prieigų kūrimo būdas, naudojant standartines bevielio ryšio priemones mažai apkrautoms linijoms ir papildant jas programinėmis paketų grupavimo priemonėmis aukšto intensyvumo kryptyse. Šis būdas leidžia perduoti balsą ir duomenis kartu, vartotojui teikiant maksimalų telekomunikacinių paslaugų paketą už minimalią kainą.

LITERATŪRA

Kitų autorių darbai

[1] Kalle Ahmavaara, Henry Haverinen, Roman Pichna. Interworking Architecture Between 3GPP and WLAN Systems. *IEEE Communications Magazine*. vol. 41, Nr. 11, November 2003, pp.

[2] Vijay K. Varma, K. Daniel Wong, Kee-Chaing Chua, Frederic Paint. Integration of 3G Wireless and Wireless LANs. *IEEE Communications Magazine*. vol. 41, Nr. 11, November 2003, pp. 71–73

[3] Angela Doufexi, Eustace Tameh, Andrew Nix, Simon Armour, Araceli Molina. Hotspot Wireless LANs to Enhance the Performance of 3G and Beyond Cellular Networks. *IEEE Communications Magazine*. vol. 41, Nr. 7, July 2003, pp. 58–65

[4] Milind M. Buddhikot, Girish Chandranmenon, Seungjae Han, Yui-Wah Lee, Scott Miller, Luca Salgarelli. Design and Implementation of a WLAN/CDMA2000 Interworking Architecture. *IEEE Communications Magazine*. vol. 41, Nr. 11, November 2003, pp. 90–100

[5] NodeDB. Welcome to NodeDB.com. Prieiga per internetą http://www.nodedb.net/, žiūrėta 2004 05 28.

[6] Steven J. Vaughan-Nichols. Bull marker for IEEE 802.11 WLAN chipsets. *Computer*. vol. 35, Nr. 11, November 2002, pp. 17–19

[7] IEEE. The working group for wireless LANs. Prieiga per internetą http://grouper.ieee.org/groups/802/11/, žiūrėta 2004 05 28.

[8] Bob O'Hara, Al Petrick. The IEEE 802.11 Handbook: A Designer's Companion: IEEE, December 1999.

[9] IEEE. ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. New York: IEEE Standards Board, 1999.

[10] IEEE. ANSI/IEEE Std 802.11-1999 High-Speed Physical Layer in the 5 GHz Band. New York: IEEE Standards Board, 1999.

[11] IEEE. ANSI/IEEE Std 802.11-1999 Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band: Piscatawa USA: IEEE Standards Board, 1999.

[12] IEEE. P802.11G (D8.2) Draft Supplement to ANSI/IEEE Std 802.11-1999 - Further Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band. New York: IEEE Standards Board, 2003.

[13] Miquel Oliver, Ana Escudero, Joan Borràs. Performance of the CSMA/CA IEEE 802.11 Protocol for Different Physical Layer Implementations. presented at The 2nd international symposium on wireless personal multimedia communications (WPMC'99), Amsterdam, Olandija, The 2nd international symposium on wireless personal multimedia communications (WPMC'99).

[14] Matthew B. Shoemake. IEEE 802.11g Jells As Applications Mount. Prieiga per internetą http://www.iapplianceweb.com/story/OEG20020402S0034, žiūrėta 2004 05 28.

[15] Sunghyun Choi, Javier del Prado. 802.11g CP: A Solution for IEEE 802.11g and 802.11b Inter-Working. presented at The 57th IEEE Semiannual Vehicular Technology Conference, VTC'03-Spring, Jeju, Korea, April 2003.

[16] IEEE Computer Society. Technical Committee on Computer Communications. IEEE standards for local area networks: carrier sense multiple access with collision detection (CSMA/CD): access method and physical layer specifications. New York: Institute of

Electrical and Electronics Engineers Inc.: distributed in cooperation with Wiley-Interscience, 1985.

[17] Jean-Lien C. Wu, Hung-Huan Liu, Yi-Jen Lung, Oita Beppu City, Japa. An Adaptive Multirate IEEE 802.11 Wireless LAN. presented at The 15th International Conference on Information Networking (ICOIN'01), Oita, Japan, January 2001.

[18] L. Bononi, M. Conti, E. Gregori. Design and Performance Evaluation of an Asymptotically Optimal Backoff Algorithm for IEEE 802.11 Wireless LANs. presented at 33rd Hawaii International Conference on System Sciences, Maui, Hawai, USA, January 2000.

[19] Federico Cali, Marco Conti, Enrico Gregori. IEEE 802.11 protocol: Design and performance evaluation of an adaptive backoff mechanism. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. vol. 18, September 2000, pp. 1774–1786.

[20] Frederico Cali, Marco Conti, Enrico Gregori. Dynamic tuning of the IEEE 802.11 protocol to achieve a theoretical throughput limit. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. vol. 8, December 2000, pp. 785–799.

[21] Haitao Wu, Shiduan Cheng, Yong Peng, Keping Long, Jian Ma. IEEE 802.11 Distributed coordination function(DCF): Analysis and enhancement. presented at ICC 2002 - IEEE International Conference on Communications, New York, USA, April 2002.

[22] Giuseppe Bianchi. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. vol. 18, March 2000, pp. 535–547.

[23] Jean Tourrilhes. Wireless Overview - The MAC level. Prieiga per internetą http://www.hpl.hp.com/personal/Jean_Tourrilhes/Linux/Linux.Wireless.mac.html, žiūrėta 2004 05 28.

[24] A. Hettich, M. Schrother. IEEE 802.11 or ETSI BRAN HIPERLAN/2: Who will win the race for a high speed wireless LAN standard? presented at Europe Wireless Conference, Germany, October 1999.

[25] Matthew Gast. 802.11 Wireless Networks: The Definitive Guide Creating and Administering Wireless Networks. O'reilly, 2002, pp. 464.

[26] Ramjee Prasad, Luis Munoz. WLANs and WPANs Towards 4G Wireless: Artech House, 2003.

[27] J. Postel, J. Reynolds. A Standard for the Transmission of IP Datagrams over IEEE 802 Networks. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc1042.txt, žiūrėta 2004 05 28.

[28] IEEE. ANSI/IEEE Std 802.1H, 1997 Edition (ISO/IEC 11802-5), Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Technical reports and guidelines—Part 5: Media Access Control (MAC) Bridging of Ethernet V2.0 in Local Area Networks: Piscatawa USA: IEEE Standards Board, 1997.

[29] IETF. Ether types. Prieiga per internetą http://www.iana.org/assignments/ethernet-numbers, žiūrėta 2004 05 28.

[30] António Grilo, Mįrio Macedo, Mįrio Nunes. A Scheduling Algorithm for QoS Support in IEEE802.11E Networks. *IEEE Wireless Communications*. vol. 10, June 2003, pp. 36-43.

[31] Brian P. Crow, Indra Widjaja, Jeong Guen Kim, Prescott T. Sakai. IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks. *IEEE Communications Magazine*. vol. 35, Nr. 9, September 1997, pp. 116–126

[32] Benny Bing. Measured Performance of the IEEE 802.11 Wireless LAN. presented at 24th Conference on Local Computer Networks, Lowell, Massachusetts, USA, October 1999.

[33] Sebastien Simoens, Pietro Pellati, Jeremy Gosteau, Karine Gosse, Chris Ware. The evolution of 5GHz WLAN toward higher throughputs. *IEEE Wireless Communications*. vol. 10, Nr. 6, December 2003, pp. 6–13

[34] Marko Hannikainen, Markku Niemi, Timo Hamalainen. Performance of the Ad-hoc IEEE 802.11b Wireless LAN. presented at International Conference on Telecommunications (ICT 2002), Beijing, China, June 2002.

[35] Jangeun Jun, Pushkin Peddabachagari, Mihail Sichitiu. Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Applications. presented at Second IEEE International Symposium on Network Computing and Applications, Cambridge, Massachusette, USA, April 2003.

[36] P.Chatzimisios, V. Vitsas, A. C. Boucouvalas. Throughput and Delay analysis of IEEE 802.11 protocol. presented at IEEE International Workshop on Network Appliances, (IWNA) 2002, Liverpool, GB, 2002.

[37] Yang Xiao, Jon Rosdahl. Throughput and delay limits of IEEE 802.11. *IEEE Communications Letters*. vol. 6, Aug 2002, pp. 355–357.

[38] Hung-Huang Liu, Jean-Lien C. Wu. Packet telephony support for the IEEE 802.11 wireless LAN. *IEEE Communications Letters*. vol. 4, September 2000, pp. 286–288.

[39] Eustathia Ziouva, Theodore Antonakopoulos. Voice Communications over IEEE 802.11 Wireless LANs Interconnected Using ATM Links. presented at 26th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN'01), Tampa, Florida, USA, November 2001.

[40] S. Garg D.-Y. Chen, M. Kappes and K. S. Trivedi. Supporting VBR VoIP traffic in IEEE 802.11 WLAN in PCF mode. presented at OPNETWORK'02, Washing D.C, USA, August 2002.

[41] D.-Y. Chen, S. Garg, M. Kappes, K. S. Trivedi. Supporting VoIP traffic in IEEE 802.11 WLAN with enhanced media access control (MAC) for quality of service. presented at Implicit Computational Complexity Workshop (ICC'03), Ottawa, Canada.

[42] Timothy A. Gonsalves, Fouad A. Tobagi. Comparative Performance of Voice/Data Local Area Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. vol. 7, June 1989, pp. 657–669.

[43] Mihaela van der Schaar, Santhana Krishnamachari, Sunghyun Choi, Xiaofeng Xu. Adaptive cross-layer protection strategies for robust scalable video transmission over 802.11 WLANs. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. vol. 21, December 2003, pp. 1752–1763.

[44] Takahiro Suzuki, Shuji Tasaka. Performance evaluation of integrated video and data transmission with the IEEE 802.11 standard MAC protocol. presented at GLOBECOM 1999 - IEEE Global Telecommunications Conference, December 1999.

[45] Aravind Iyer, U. B. Desai. A comparative study of video transfer over Bluetooth and 802.11 wireless MAC. presented at WCNC 2003 - IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Mar 2003.

[46] Roberto Cusani, Francesco Delli Priscoli, Gaetano Ferrari, Massimiliano Torregiani. A novel MAC and scheduling strategy to guarantee QoS for the new-generation WIND-FLEX wireless LAN. *IEEE Wireless Communications*. vol. 9, June 2002, pp. 46–56.

[47] Jun Zhao, Zihua Guo, Qian Zhang, Wenwu Zhu. Distributed MAC adaptation for WLAN QoS differentiation. presented at GLOBECOM 2003 - IEEE Global Telecommunications Conference, Decmber 2003.

[48] Stefan Mangold, Sunghyun Choi, Guido R. Hiertz, Ole Klein, Bernhard Walke. Analysis of IEEE 802.11E for QoS support in wireless LANs. *IEEE Wireless Communications*. vol. 10, Nr. 6, December 2003, pp. 40–50

[49] Lamia Romdhani, Qiang Ni, Thierry Turletti. Adaptive EDCF: Enhanced service differentiation for IEEE 802.11 wireless ad-hoc networks. presented at WCNC 2003 - IEEE Wireless Communications and Networking Conference, March 2003.

[50] Jun Li, Stephen B. Weinstein, Junbiao Zhang, Nan Tu. Public access mobility LAN: Extending the wireless internet into the LAN environment. *IEEE Wireless Communications*. vol. 9, June 2002, pp. 22–30.

[51] Ilkka Saarinen, Mika Lasanen, Pekka Ruuska, Giovanna Girola, Alessandro Caverni, Massiliamo Torregani, Jose L Garcia, Ana G Armada. Main approaches for the design of wireless indoor flexible high bit rate WIND-FLEX modem architecture. presented at IST Mobile Communications Summit 2000, Galway, Ireland, October 2000.

[52] Andreas Polydoros, Jukka Rautio, Giuseppe Razzano, Hanna Bogucka, Diego Ragazzi, Panos I. Dallas, Aarne Mämmelä, Michael Benedix, Manuel Lobeira, Luigi Agarossi. WIND-FLEX: Developing a Novel Testbed for Exploring Flexible Radio Concepts in an Indoor Environment. *IEEE Communications Magazine*. vol. 41, July 2003, pp. 116–122.

[53] KDD. A Wireless IP Phone System for Rural Applications. Prieiga per internetą http://www.itu.int/ITU-D/fg7/case_library/documents/kdd001.html, žiūrėta 2004 05 28.

[54] Luca Becchetti, Francesco Delli Priscoli, Tiziano Inzerilli, Petri Mähönen, Luis Muńoz. Enhancing IP service provision over heterogeneous wireless networks: A path toward 4G. *IEEE Communications Magazine*. vol. 39, Nr. 8, August 2001, pp. 74–81

[55] Magnus Frodigh, Stefan Parkvall, Christiaan Roobol, Per Johansson, Peter Larsson. Future-generation wireless networks. *IEEE Personal Communications*. vol. 8, October 2001, pp. 10–17.

[56] Harri Honkasalo, Kari Pehkonen, Markku T. Niemi, Anne T. Leino. WCDMA and WLAN for 3G and beyond. *IEEE Wireless Communications*. vol. 9, April 2002, pp. 14–18.

[57] Leonard Kleinrock, Fouad A. Tobagi. Packet Switching in Radio Channels: Part I-- Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics. *IEEE Transactions on Communications*. vol. 23, December 1975, pp. 1400–1416.

[58] Simon S. Lam. A Carrier Sense Multiple Access Protocol for Local Networks. *Computer Networks*. vol. 4, January 1980, pp. 21–32.

[59] Ns-2. The Network Simulator - ns-2. prieiga per internetą http://www.isi.edu/nsnam/ns/, žiūrėta 2004 05 28.

[60] Harshal S. Chhaya, Sanjay Gupta. Performance of asynchronous data transfer methods of IEEE 802.11 MAC protocol. *IEEE Personal Communications*. vol. 3, October 1996, pp. 8–15.

[61] Jae Hyun Kim, Jong Kyu Lee. Throughput and Packet Delay Analysis of IEEE 802.11 MAC Protocol for Wireless LAN's. *Wireless Personal Communications*. vol. 11, November 1999, pp. 161–183.

[62] Piyush Gupta, P.R. Kumar. Capacity of wireless networks. *IEEE Transactions on Information Theory*. vol. 46, March 2000, pp. 388–404.

[63] Piyush Gupta, Robert Gray, P. R. Kumar. An Experimental Scaling Law for Ad Hoc Networks. Prieiga per internetą http://black1.csl.uiuc.edu/~prkumar/ps_files/exp.ps, žiūrėta 2004 05 28.

[64] David Gibson. orinoco_cs: Orinoco and Prism 2 wireless card driver. Prieiga per internetą http://ozlabs.org/people/dgibson/dldwd/, žiūrėta 2004 05 28.

[65] Stanford University Internet End-to-end Performance Monitoring group. TTCPbenchmarking tool for determining TCP and UDP performance between 2 systems programa ir jos aprašymas. Prieiga per internetą http://www-iepm.slac.stanford.edu/monitoring/voip/ttcp.html, žiūrėta 2004 05 28.

[66] Inc Cisco Systems. Cisco - Using Test TCP (TTCP) to Test Throughput. Prieiga per internetą http://www.cisco.com/warp/public/471/ttcp.html, žiūrėta 2004 05 28.

[67] Hewlett-Packard. The Public Netperf Homepage. Prieiga per internetą http://www.netperf.org/netperf/NetperfPage.html, žiūrėta 2004 05 28.

[68] Jean Tourrilhes. Wireless tools programa ir jos apra□ymas. 2003, prieiga per internetą http://www.hpl.hp.com/personal/Jean_Tourrilhes/Linux/Orinoco.html, žiūrėta 2004 05 28.
[69] Ad Kamerman, G. Aben. Throughput performance of wireless LANs operating at 2.4 and 5 GHz. presented at G. 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2000), London, GB, 2000.
[70] Stefano Basagni, Marco Conti, Silvia Giordano, Ivan Stojmenovi. Ad hoc Networking: Wiley-IEEE Press, January 2004.
[71] Dominique Dhoutaut, Isabelle Gu´erin-Lassous. Experiments with 802.11b in ad hoc configurations. presented at Workshop on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MADNET 2003), Sophia-Antipolis, France, March 2003.
[72] Jatinder Pal Singh, Nicholas Bambos, Bhaskar Srinivasan, Detlef Clawin. Wireless LAN performance under varied stress conditions in vehicular traffic scenarios. presented at Vehicular Technology Conference. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th, Vancouver, Canada, September 2002.
[73] Andreas Willig, Martin Kubisch, Christian Hoene, Adam Wolisz. Measurements of a Wireless Link in an Industrial Environment using an IEEE 802.11-Compliant Physical Layer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. vol. 43, December 2002, pp. 1265–1282.
[74] John F. Shoch, Jon A. Hupp. Measured performance of an Ethernet local network. *Communications of the ACM*. vol. 23, December 1980, pp. 711–721.
[75] Kimberly C. Claffy, Greg Miller, Kevin Thompson. The nature of the beast: recent traffic measurement from an Internet backbone. presented at INET '98, Geneva, Switzerland, Julay 1998.
[76] CAID. Papers by CAIDA. Prieiga per internetą http://www.caida.org/outreach/papers/, žiūrėta 2004 05 28.
[77] Thomas M. Chen. Guest editorial - Network traffic measurements and experiments. *IEEE Communications Magazine*. vol. 38, Nr. 5, May 2000, pp. 120–121
[78] Raj Jain, Shawn A. Routhier. Packet Trains--Measurements and a New Model for Computer Network Traffic. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. vol. 4, September 1986, pp. 986–995.
[79] Kevin Thompson, Gregory J. Miller, Rick Wilder. Wide-Area internet traffic patterns and characteristics. *IEEE Network*. vol. 11, November/December 1997, pp. 10–23.
[80] Ramon Caceres, Nick Duffield, Anja Feldmann, John D. Friedmann, Albert Greenberg, Rick Greer, Theodore Johnson, Charles R. Kalmanek, Balachander Krishnamurthy, Dianne Lavelle, Partho P. Mishra, Jennifer Rexford, K. K. Ramakrishnan, Frederick D. True, Jacobus E. van der Merwe. Measurement and analysis of IP network usage and behavior. *IEEE Communications Magazine*. vol. 38, May 2000, pp. 144–151.
[81] Kimberly C. Claffy. Internet Traffic Characterization. Kalifornijos universitetas, San Diego, 1994, pp. 140.
[82] Sa'ndor Molna'r, Gyprgy Terdik. A General Fractal Model of Internet Traffic. presented at The 26th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN), Tampa, Florida, USA, November 2001.
[83] Cen Zhiwei, Gao Chuanshan, Cong Suo, Han Liangxiu. Measurement and Analysis of IP Network Traffic. presented at Proceedings of the Third International Asia-Pacific Web Conference, October 27-29, 2000, International Academic Publishers, World Publishing Corporation, Xi'an, China, 2000.
[84] Gerald Combs. Ethereal network protocol analyzer. 0.8.12 ed, 2003, prieiga per internetą http://www.ethereal.com/, žiūrėta 2004 05 28.
[85] Rüdiger Schollmeier, Antoine Dumanois. Peer-to-Peer Traffic Characteristics. presented at 9th EUNICE Open European Summer School (EUNICE'03), Budapest-Balatonfüred, Hungary, September 2003.

[86] Nelson Minar. Distributed Systems Topologies: Part 1. Prieiga per internetą http://www.openp2p.com/pub/a/p2p/2001/12/14/topologies_one.html, žiūrėta 2004 05 28.
[87] Sharman Networks. Kazaa Media Desktop. 2.1 ed, 2003, prieiga per internetą http://www.kazaa.com/, žiūrėta 2004 05 28.
[88] MetaMachine. eDonkey2000 - Overnet. in *Peer to peer filesharing technology*, 0.52 ed, 2004, prieiga per internetą http://www.edonkey2000.com/, žiūrėta 2004 05 28.
[89] F.A.Tobagi. Performance Analysis of Carrier Sence Multiple Access with Collision Detection. presented at LACN Symposium, 1979.
[90] K.K. Ramakrishnan, S.K. Tripathi. A Common Framework for Studying the Performance of Channel Access Protocols. presented at CPEUG 1982, Washington D. C, USA, October 1982.
[91] Will E. Leland, Murad S. Taqq, Walter Willinger, Daniel V. Wilson. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic. presented at SIGCOM93, San Francisco, California, USA, 1993.
[92] V. Paxson, S. Floyd. Wide-area Traffic: The Failure of Poisson Modeling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. vol. 3, June 1995, pp. 226–244.
[93] D. P. Heyman. An analysis of the cartier-sense multiple-access protocol. *Bell System Technical Journal*. vol. 61, 1982, pp. 2023–2051.
[94] B. B. Mandelbrot, J. W. Van Ness. Fractional Brownian motions, fractional noises and applications. *SIAM Review*. vol. 10, 1968, pp. 422–437.
[95] Mark E. Crovella, Azer Bestavros. Self-similarity in world wide web traffic: Evidence and possible causes. *IEEE/ACM Transactions on Networking*. vol. 5, December 1997, pp. 835–846.
[96] Zafer Sahinoglu, Sirin Tekinay. On multimedia networks: Self-similar traffic and network performance. *IEEE Communications Magazine*. vol. 37, Nr. 1, January 1999, pp. 48–52
[97] Jan Beran, Robert Sherman, Murad S. Taqqu, Walter Willinger. Long-Range Dependence in Variable-Bit-Rate Video Traffic. *IEEE Transactions on Communications*. vol. 43, 1995, pp. 1566–1579.
[98] Diane E. Duffy, Allen A. McIntosh, Mark Rosenstein, Walter Willinger. Statistical Analysis of CCSN/SS7 Traffic Data from Working CCS Subnetworks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. vol. 12, April 1994, pp. 544–551.
[99] T. D. Dang, B. Sonkoly, S. Molna'r. Fractal Analysis and Modelling of VoIP Traffic. presented at NETWORKS2004, Vienna, Austria, June 2004.
[100] Kihong Park, Walter Willinger. Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation: Wiley-Interscience, 2000.
[101] W. Willinger, M. S. Taqqu, A. Erramilli. A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks. *In Stochastic Networks: Theory and Applications*, 1996, pp. 339–366.
[102] Olivier Cappe, Eric Moulines, Jean-Christophe Pesquet, Athina Petropulu, Zueshi Yang. Long-range dependence and heavy-tail modeling for teletraffic data. *IEEE Signal Processing Magazine*. vol. 19, Nr. 3, May 2002, pp. 14–27
[103] M.Roughan, D.Veitch, P.Abry. Real-Time Estimation of the Parameters of Long-Range Dependence (Extended Version). *IEEE/ACM Transactions on Networking*. vol. 8, 2000, pp. 467–478.
[104] Matthew Roughan, Charles R. Kalmanek. Pragmatic Modeling of Broadband Access Traffic. *Computer Communications*. vol. 26, Nr. 8, 2003, pp. 804–816
[105] J.C. Cano, Pietro Manzoni. On the Use and Calculation of the Hurst Parameter with MPEG Videos Data Traffic. presented at The 26th EUROMICRO Conference (EUROMICRO'00), September 2000.

[106] Thomas Karagiannis, Michalis Faloutsos, Mart Molle. A user-friendly self-similarity analysis tool. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*. vol. 33, July 2003, pp. 81–93.
[107] Thomas Karagiannis. SELFIS (SELF-similarity analysIS). 0.1b ed, 2003, prieiga per internetą http://www.cs.ucr.edu/~tkarag/Selfis/Selfis.html, žiūrėta 2004 05 28.
[108] R. Caceres, P. Danzig, S. Jamin, D. Mitzel. Characteristics of Wide-Area TCP/IP Conversations. presented at ACM SIGCOMM '91, Zurich, Switzerland, 1999.
[109] Glen Kramer. Generator of Self-Similar Network Traffic. 3 ed, 2004, prieiga per internetą http://wwwcsif.cs.ucdavis.edu/~kramer/code/trf_gen2.html, žiūrėta 2004 05 28.
[110] R Plėštys, I Lagzdinytė. Petri tinklu taikymas paketu srautu modeliams sudaryti. *Elektronika ir elektrotechnika*. Kaunas: Technologija, vol. 47, Nr. 5, 2003, pp. 13–16
[111] WineHQ. Open Source implementation of the Windows API. in *Peer to peer filesharing technology*, 2004, prieiga per internetą http://www.winehq.com/, žiūrėta 2004 05 28.
[112] ITU Recommendation G.728. Coding of speech at 16 kbit/s using low-delay code excited linear prediction. ITU September 1992, prieiga per internetą, žiūrėta 2004 05 28.
[113] ITU-T Rec. G.729. Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linearprediction (CS-ACELP). ITU March 1996, prieiga per internetą, žiūrėta 2004 05 28.
[114] ITU-T Recommendation G.723.1. Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s. ITU March 1996, prieiga per internetą, žiūrėta 2004 05 28.
[115] ITU. Methods for subjective determination of transmission quality. ITU-T Recommendation P.800. Geneva, August 1996.
[116] ITU. Objective Quality Measurement of Telephone-band (300-3400 hz) speech codecs. ITU-T Recommendation P.861. Geneva August 1996, prieiga per internetą, žiūrėta 2004 05 28.
[117] N. F. Maxemchuk. A Variation on CSMA/CD That Yields Movable TDM Slots in Integrated Voice/Data Local Networks. *The Bell System Technical Journal*. vol. 61, September 1982, pp. 1527–1550.
[118] A. Clark, R.Liu. Comparison of TS 101 329-5 Annex E with PAMS and PSQM. Temp.Doc. 061 for TIPHON#23 July 2001, prieiga per internetą, žiūrėta 2004 05 28.
[119] P. T. Brady. A technique for investigating on-off patterns of speech. *Bell System Technical Journal*. vol. 44, Nr. 1, January 1965, pp. 1–22
[120] P. T. Brady. A statistical analysis of on-off patterns in 16 conversations. *Bell System Technical Journal*. vol. 47, Nr. 1, January 1968, pp. 73–91
[121] John G. Gruber. A Comparison of Measured and Calculated Speech Temporal Parameters Relevant to Speech Activity Detection. *IEEE Transaction on Communications*. vol. 30, April 1982, pp. 728–738.
[122] ITU. Telephone transmission quality objective measuring apparatus: Artificial conversational speech. ITU Recommendation P.59. Geneva, March 1993.
[123] P. T. Brady. A model for generating on-off speech patterns in two way conversation. *Bell System Technical Journal*. vol. 48, Nr. 9, September 1969, pp. 2445–2472
[124] Clifford J. Weinstein. Fractional Speech Loss and Talker Activity Model for TASI and for Packet-Switched Speech. *IEEE Transactions on Communications*. vol. 26, August 1978, pp. 1253–1257.
[125] Francisco Barceló. Statistical properties of silence gap in public mobile telephony channels with application to data transmission. presented at ICC 2001 - IEEE International Conference on Communications, St.-Petersburg, Russia, June 2001.

[126] H. H. Lee, C. K. Un. A Study of On-Off Characteristics of Conversational Speech. *IEEE Transactions on Communications*. vol. 34, June 1986, pp. 630–637.
[127] A. Rudžionis, V. Rudžionis. Noisy speech detection and endpointing. presented at Voice operated telecom services. Do they have a bright future? Ghent, Belgium, May 2000.
[128] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project; Adaptive Multi-Rate (AMR) speech codec;Voice Activity Detector (VAD). 5 ed, 2002, prieiga per internetą http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/26_series/26.094/26094-500.zip, žiūrėta 2004 05 28.
[129] Luc Devroye. Non-uniform random variate generation. New York: Springer-Verlag, 1986.
[130] Thomas Enderes, Swee Chern Khoo, Clare A. Somerville, Kostas Samaras. Impact of statistical multiplexing on voice quality in cellular networks. *Mobile Networks and Applications*. vol. 7, April 2002, pp. 153–161.
[131] Miroslaw Narbutt, Liam Murphy. VoIP Playout Buffer Adjustment using Adaptive Estimation of Network Delays. presented at Proceeding of the 18th International Teletraffic Congress (ITC-18), Berlin, Germany, September 2003.
[132] Chen-Nee Chuah, Randy H. Katz. Characterizing packet audio streams from internet multimedia applications. presented at ICC 2002 - IEEE International Conference on Communications, New York, USA, April 2002.
[133] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc1889.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[134] S. Casner, V. Jacobson. Compressing IP/UDP/RTP Headers for Low-Speed Serial Links. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc2508.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[135] ITU Recommendation G.114. One way transmission time. ITU February 1996, prieiga per internetą, žiūrėta 2004 05 28.
[136] David R. Boggs, Jeffrey C. Mogul, Christopher A. Kent. Measured capacity of an Ethernet: myths and reality. presented at Symposium on Communications Architectures and Protocols SIGCOMM '88, Stanford, US, 1988.
[137] Kevin Kiley, Konstantin Balashov, A. Kosobrukhov. mod_gzip compression module for Apache. 1.3.14 ed: Apache, February 2003, prieiga per internetą http://sourceforge.net/projects/mod-gzip/, žiūrėta 2004 05 28.
[138] R. Fielding, UC Irvine, J. Gettys, J. Mogul, H. Frystyk, L. Masinter, P. Leach, T. Berners-Lee. Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc2616.tx, žiūrėta 2004 05 28.
[139] A. Shacham, R. Monsour, R. Pereira, M. Thomas. IP Payload Compression Protocol (IPComp). Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc2393.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[140] J.P. McGregor, R.B. Lee. Performance impact of data compression on virtual private network transactions. presented at 5th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN'00), Tampa, Florida, USA, November 2000.
[141] Van Jacobson. The PPP Internet Protocol Control Protocol (IPCP). Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc1332.tx, žiūrėta 2004 05 28.
[142] M. Degermark, and S. Pink B. Norgren. IP Header Compression. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc2507.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[143] Mikael Degermark, Hans Hannu, Lars-Erik Jonsson, Krister Svanbro. Evaluation of CRTP performance over cellular radio links. *IEEE Personal Communications*. vol. 7, August 2000, pp. 20–25.
[144] W.-T. Chen, J.-L. Lo, H.-C. Hsiao. Enhancing CRTP by Retransmission for Wireless Networks. presented at IEEE International Conference on Computer Communications and Networks, Scottsdale, Arizona, USA, October 2001.

[145] Tmima Koren, Stephen Casner, Packet Design, John Geevarghese, Bruce Thompson, Dan Wing, Patrick Ruddy, Alex Tweedly. Enhancements to IP/UDP/RTP Header Compression. Prieiga per internetą http://www.cs.columbia.edu/~hgs/rtp/drafts/draft-ietf-avt-crtp-enhance-00.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[146] Andrew J. Valencia, Tmima Koren. L2TP Header Compression ("L2TPHC"). Prieiga per internetą http://www.ietf.org/proceedings/03mar/I-D/draft-ietf-l2tpext-l2tphc-06.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[147] ITU Recommendation G.701. Vocabulary of digital transmission and multiplexing, and pulse code modulation (PCM) terms. ITU 1993 March, prieiga per internetą, žiūrėta 2004 05 28.
[148] Danny Cohen, Jon Postel. Multiplexing Protocol. Prieiga per internetą http://www.isi.edu/in-notes/ien/ien90.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[149] P. Cameron, D. Crocker, D. Cohen, J. Postel. Transport Multiplexing Protocol (TMux). Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc1692.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[150] Hideaki Yamada, Toshiki Endo, Toshikane Oda. IP-Based Voice Stream Multiplexing Schemes and their Performance Evaluation. *IEICE Tansaction Communication*. vol. E84-B, August 2001, pp. 2266–2278.
[151] Colin Perkins. RTP: Audio and Video for the Internet: Addison-Wesley Pub Co, 2003.
[152] Jonathan B. Postel. Multiplexing Protocol. Prieiga per internetą http://www.isi.edu/in-notes/ien/ien72.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[153] Danny Cohen, Jon Postel. On Protocol Multiplexing. presented at Proceedings of the Sixth Data Communications Symposium, Pacific Grove, USA, November 1979.
[154] Danny Cohen, Jon Postel. Multiplexing Protocol. Prieiga per internetą http://www.isi.edu/in-notes/ien/ien92.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[155] K. El-Khatib, G. Luo, G. Bochmann. Multiplexing Scheme for RTP Flows between Access Routers < draft-ietf-avt-multiplexing-rtp-00.txt >. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/proceedings/99jul/I-D/draft-ietf-avt-multiplexing-rtp-00.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[156] B. Subbiah, S. Sengodan. User Multiplexing in RTP payload between IP Telephony Gateways <draft-ietf-avt-mux-rtp-00.txt>. Prieiga per internetą http://www.cs.columbia.edu/~hgs/rtp/drafts/draft-ietf-avt-mux-rtp-00.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[157] J. Rosenberg, H Schulzrinne. An RTP Payload Format for User Multiplexing <draft-ietf-avt-aggregation-00.txt>. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/proceedings/99mar/I-D/draft-ietf-avt-aggregation-00.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[158] J. Rosenberg, H.Schulzrinne. Issues and Options for RTP Multiplexing <draft-ietf-avt-muxissues-00.txt>. Prieiga per internetą http://www.east.isi.edu/DIV7/IETF/AVT/43/internet-drafts/draft-ietf-avt-muxissues-00.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[159] B. Thompson, T. Koren, D. Wing. Tunneling multiplexed Compressed RTP ("TCRTP") <draft-ietf-avt-tcrtp-04.txt>. Prieiga per internetą http://www.cs.columbia.edu/~hgs/rtp/drafts/draft-ietf-avt-tcrtp-04.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[160] T. Hoshi, K. Tanigawa, K. Tsukada. A RTP simple multiplexing transfer method for VoIP <draft-tanigawa-rtp-multiplex-01.txt>. Prieiga per internetą http://ietfreport.isoc.org/old-ids/draft-tanigawa-rtp-multiplex-01.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[161] M. Handley. GeRM: Generic RTP Multiplexing <draft-ietf-avt-germ-00.txt>. Prieiga per internetą

http://www.east.isi.edu/DIV7/IETF/AVT/43/internet-drafts/draft-ietf-avt-germ-00.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[162] Colin Perkins. Report on the 45th IETF Audio/Video Transport Working Group. Prieiga per internetą http://www.scimitar.terena.nl/standardisation/reports/IETF45_Perkins.html, žiūrėta 2004 05 28.
[163] R. Pazhyannur, I. Ali, C. Fox. PPP Multiplexing. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc3153.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[164] W. Townsley, A. Valencia, A. Rubens, G. Pall, G. Zorn, B. Palter. Layer Two Tunneling Protocol "L2TP". Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc2661.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[165] W. Townsley. Layer Two Tunneling Protocol (L2TP) Internet Assigned Numbers Authority (IANA) Considerations Update. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc3438.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[166] Henning Schulzrinne. RTP: Multiplexing. Prieiga per internetą http://www.cs.columbia.edu/~hgs/rtp/mux.html, žiūrėta 2004 05 28.
[167] Jean Tourrilhes. Packet Frame Grouping: Improving IP multimedia performance over CSMA/CA. Prieiga per internetą http://www.hpl.hp.com/personal/Jean_Tourrilhes/Papers/Packet.Frame.Grouping.html, žiūrėta 2004 05 28.
[168] Inc KarlNet. KarlNet's TurboCell": Enhancing the Capabilities of Standard 802.11. Prieiga per internetą http://www.karlnet.com/Documents/WhitePaper/TurboCellWhitePaper/TurboCell White Paper.htm, žiūrėta 2004 05 28.
[169] J.P. Curtis, J.G. Cleary, A.J. McGregor, M.W. Pearson. Measurement of voice over IP traffic. presented at Proceedings PAM2000 Passive and Active Measurement Workshop, Hamilton, New Zealand, April 2000.
[170] J. Moy. Open Shortest Path First version 2 (OSPF 2). IETF, Request for Comments: 2328, Standards Track April 1998, prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc2328.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[171] G. Malkin. Routing Information Protocol version 2 (RIP 2). IETF, Request for Comments: 1723, Standards Track November 1994, prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc1723.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[172] IETF. Protocol numbers. Prieiga per internetą http://www.iana.org/assignments/protocol-numbers, žiūrėta 2004 05 28.
[173] IEEE. IEEE Std 802.3ab-1999. IEEE Standard for Information Technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and Metropolitan Area Networks - Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications - Physical Layer Parameters and Specifications for 1000 Mb/s Operation over 4 pair of Category 5 Balanced Copper Cabling, Type 1000BASE-T: Piscatawa USA: IEEE Standards Board, 1999.
[174] Defense Advanced Research Projects Agency. Internet Protocol. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[175] S. Deering, R. Hinden. Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification. Prieiga per internetą http://www.ietf.org/rfc/rfc2460.txt, žiūrėta 2004 05 28.
[176] Hyogon Kim, Inhye Kang, Eenjun Hwang. Measurement-based multi-call voice frame grouping in internet telephony. *IEEE Communications Letters*. vol. 6, May 2002, pp. 199–201.
[177] Jonathan Rosenberg and Henning Schulzrinne. Issues and options for an aggregation service within RTP. Prieiga per internetą

http://www.cs.columbia.edu/~hgs/rtp/drafts/draft-rosenberg-itg-00.ps, žiūrėta 2004 05 28.
[178] H. P. Sze, Soung C. Liew, Jack Y. B. Lee, Danny C. S. Yip. A Multiplexing Scheme for H.323 Voice-Over-IP Applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. vol. 20, September 2002, pp. 1360–1369.
[179] Matthew N. O. Sadiku, Mohammad Ilyas. Simulation of local area networks. Boca Raton: CRC Press, 1995.
[180] Bernard Zeigler, Tag Kim, Herbert Praehofer. Theory of Modeling and Simulation: Academic Press; 2nd edition, 2000.
[181] Jiaqing Song, Ljiljana Trajkovic. Enhancements and Performance Evaluation of Wireless Local Area Networks. Prieiga per internetą http://tango.isti.cnr.it/docs/wichita/SongEnhancementsWLAN.pdf, žiūrėta 2004 05 28.
[182] Christian Schuler, Mihai Mateescu. Performance Evaluation of ARQ Protocols for Realtime Services in IEEE 802.11 and Wireless ATM. presented at 4th ACTS Mobile Communications Summit, Sorrento, Italy, June 1999.

Autoriaus straipsniai disertacijos tema

[A1] A. Šaltis. Vaizdo ir graso perdavimo technologijų apžvalga. 3–iosos Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ medžiaga. Elektronika ir elektrotechnika. Vilnius: Technika, 2000, p. 36–41.
[A2] A. Kajackas, A. Šaltis, E. Šilanskas. EMC Aspects and Analysis of Hierarchical Wireless Local Area Networks. 16th International Wroclow Symposium on EMC medžiaga. 1 vol., Wroclow, 2002, p. 229–234
[A3] A. Kajackas, A. Šaltis, E. Šilanskas. Customer Premises Local Area Network: concept and problems. *Elektronika ir elektrotechnika*. Kaunas: Technologija, 2002, Nr. 3 (38), p. 63–67.
[A4] A. Kajackas, A. Šaltis. Apie informacinių technologijų vertinimą ir parinkimą. Elektronika –2001 medžiaga. Kaunas: Technologija, 2001, p. 87–90.
[A5] Arūnas Šaltis, Lukas Pavilanskas. Paketinio radijo ryšio 2,4 GHz dažniu ruože eksperimentiniai tyrimai. *Elektronika ir elektrotechnika*. Kaunas: Technologija, 2003, Nr. 3 (38), p. 48–56.
[A6] A. Šaltis. Interneto srauto duomenų analizė. 4–osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“ medžiaga. Elektronika ir elektrotechnika. Vilnius: Technika, 2001, p. 86–93
[A7] Algimantas Kajackas, Arūnas Šaltis. Balso signalų kalbos ir tylos intervalų modeliai ir jų taikymas. *Elektronika ir Elektrotechnika*. Kaunas: Technologija, 2003, Nr. 5 (47), p. 7–12.
[A8] A. Kajackas, A. Šaltis. Voice transmission peculiarity analyzes over IEEE 802.xx networks. *Elektronika ir elektrotechnika*. Kaunas: Technologija, 2003, Nr. 2 (44), p. 7–12.
[A9] A. Kajackas, A. Šaltis, L. Pavilanskas. One radio channel packet implementation interference analysis. 17th International Wroclow Symposium on EMC medžiaga. 2004. 1 vol. p. 206–212

SANTRUMPŲ SĄRAŠAS

ACK	Duomenų kadro gavimo patvirtinimas – angl. Acknowledge
ADSL	Asimetrinė skaitmeninė linija – angl. Asymmetric Digital Subscriber Line
AP	Kreipties taškas – angl. Access Point
ARP	Adresų raiškos protokolas – angl. Address Resolution Protocol
ATM	Asinchroninis duomenų perdavimas – angl. Asynchronous Transfer Mode
BER	Klaidingų bitų dažnis – angl. Bit Error Rate
BRAN	Plačiajuosčiai radijo kreipties tinklai – angl. Broadband Radio Access Networks
BSS	Bazinis paslaugos vienetas – angl. Basic Service Set
BSS	Pagrindinis paslaugų vienetas – angl. Basic Service Set
CAM	Kanalo kreipties mechanizmas – angl. Channel Access Mechnism
CBR	Fiksuota informacijos perdavimo sparta – angl. Constant Bit Rate
CCA	Laisvo kanalo įvertinimas – angl. Clear Channel Assessment
CCK	Atvirkštinis kodo manipuliavimas – angl. Complementary Code Keying
CEPT	Europos pašto ir telekomunikacijų administratorių konferencija – angl. European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CFP	Nesivaržymo periodas – angl Contention free Period
CP	Varžymosi periodas – angl.Contention Period
CSMA/CA	Kolektyvioji nešlio jutimo kreiptis išvengiant susidūrimų – angl. Carrier Sense Multiple Access/Collision
CTS	Patvirtinimas siųsti duomenis – angl. Clear To Send
CW	Varžymosi langas – angl. contention window
DCF	Paskirstyta koordinavimo funkcija – angl. Distributed Coordination Function
DiffServ	Diferencijuotos paslaugos – angl Differentiated Services
DLC	Duomenų kanalo lygmuo – angl. Data Link Channel
DS	Paskirstyta paslauga – angl. Distributed Service
DSL	Skaitmeninė linija – angl Digital Subscriber Line
DSSS	Tiesioginės sekos išplėstinis spektras – angl. Direct Sequence Spread Spectrum
EBSS	Išplėstasis paslaugų vienetas – angl. Exteanded Service Set
ERP – OFDM	Padidintos spartos fizinis lygmuo naudojant ortogonalią dažnių tankinimo moduliaciją – angl. Extend Rate PHY – Orthogonal Frequency Division Multiplexing
ETSI	Europos telekomunikacinių standartų institutas – angl. European Telecommunications Standards Institute
FHSS	Šokinėjančio dažnio išplėstinis spektras – angl. Frequency Hopping Spread Spectrum
FSK	Dažninė fazinė moduliacija – angl. Frequency Shift Keying
GeRM	Bendrasis multipleksuotas realaus laiko transportavimo protokolas – angl. Generic RTP Multiplexing
GMSK	Gauso minimalios fazės postūmio moduliacija – angl. Gaussian Minimum Shift Keying
HIPERLAN	Didelio našumo vietinis radijo tinklas – angl. HIgh PERformance radio LAN
HR/DSSS	Didelės spartos tiesioginės sekos išplėstinis spektras – angl. High Speed Direct Sequency Spread Spectrum

IETF	Interneto inžinerijos darbo grupė – angl. The Internet Engineering Task Force
IFS	Tarpkadrinis intervalas – angl. Inter–Frame Space
ISM	Pramonės, mokslo ir medicinos – angl. Industrial, Scientific, Medical
LAN	Vietinis tinklas – angl. Local Area Network
LLC	Loginis kanalo valdymas – angl. Logical Link Control
MAC	Kreipties į perdavimo terpę valdymas – angl. Medium Access Control
MOS	Suvidurkinta nuomonės vertė – angl. Mean Opinion Score
MTU	Maksimalus perdavimo vienetas – angl. Maximum Transfer Unit
NAV	Tinklo užėmimo vektorius – angl. Allocation Vector
NFS	Tinklinė rinkmenų sistema – angl. Network File System
OFDM	Ortogonalusis dažnių sutankinimas – angl. Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PBCC	Paketų dvejetainis sąsukinis kodavimas – angl. Packet Binary Convolutional Coding
PHY	Fizinis lygmuo – angl. Physical layer
PLCP	Fizinio lygmens konvergencinė procedūra – angl. Physical Layer Convergence Procedure
PMD	Priklausomas fizinis lygmuo – angl. Physical Medium Dependent
PMP	Daugiataškis tinklas – angl. Point–to–Multipoint
PPDU	PLCP protokolinių duomenų blokas – angl. PLCP Protocol Data Unit
PSF	Sutelkta koordinavimo funkcija – angl. Point Coordination Function
PSQM	Suvokiamos kalbos kokybės matavimas – angl. Perceptual Speech Quality Measure
PTP	Dvitaškis tinklas – angl. Point–to–Point
QoS	Paslaugos kokybė – angl. Quality of Service
RES	Radijo sistemos ir įranga – angl. Radio Equipment and Systems
RLC	Radijo kanalo kontrolė – angl. Radio Link Control
RTP	Realaus laiko transportavimo protokolas – angl. Real Time Transport Protocol
RTS	Užklausimas duomenims siųsti – angl. Request To Send
SNAP	Tarptinklinės kreipties protokolas – angl. Subnetwork Access Protocol
TASI	Laiko paskirstymas naudojant kalbos interpoliaciją – angl. Time Assignment Speech Interpolation
TCRTP	Tunelinis multipleksuotas kompresuotas realaus laiko perdavimo protokolas – angl. Tunneling Multiplexed Compressed RTP
TDD	Laikinis atskyrimas dupleksu – angl. Time Division Duplex
TDMA	Kolektyvioji laikinio atskyrimo kreiptis – angl. Time Division Multiple Access
TPC	Perdavimo galios ribojimas – angl. Transmit Power Control
VBR	Kintama informacijos perdavimo sparta – angl. Variable Bit Rate
VDSL	Didelės spartos skaitmeninė linija – angl. Very High Speed Digital Subscriber Line
VoIP	Balso perdavimas per IP – angl. Voice over IP
WAN	Plačios aprėpties tinklas – angl. Wide Area Network
WLAN	Bevielis lokalus tinklas – angl. Wireless Local Area Network

SIMBOLIŲ IR KINTAMŲJŲ SĄRAŠAS

a_s	Vieno kalbos signalo sukuriama apkrova
a_{vmax}	Didžiausia kanalo apkrova
C_t	Suminis balso kanalų skaičius
γ	Multipleksavimo efektyvumas
λ	Vidutinis paketų srauto intensyvumas
m	Automodelio bendrumo lygis
n	Multipleksuotų balso kanalų skaičius
n_{ACK}	ACK kadro dydis baitais
n_b	Balso duomenų kiekis baitais
n_{CTS}	IEEE 802.11 CTS kadro dydis baitais
n_{data}	Vartotojo duomenų paketo dydis baitais
n_{LLC}	LLC protokolo antraštės dydis baitais
$n_{MAC_antraštė}$	MAC antraštės dydis baitais
n_{MPDU}	Duomenų paketo su tinklo ir aukštesnių lygmenų antraštėmis dydis baitais
$n_{paveldas}$	IEEE 802.11a paveldo lauko dydis bitais
n_{RTS}	IEEE 802.11 RTS kadro dydis baitais
$n_{service}$	IEEE 802.11a „service“ lauko dydis bitais
$n_{TCP/IP}$	TCP/IP protokolo steko antraščių dydis baitais
n_{VoIP}	Balso per IP paketų antraščių suma
s	Bloko indeksas
S	Variacijos koeficientas
τ	Signalo sklidimo trukmė
t_0	Paketo formavimo laikas
t_{ACK}	IEEE 802.11 ACK kadro perdavimo laikas
t_b	Vieno bito perdavimo laikas
t_{CRC}	IEEE 802.11 CRC lauko perdavimo laikas
t_{CRTP}	CRTP antraštės perdavimo laikas
t_{CTS}	IEEE 802.11 CTS kadro perdavimo laikas
t_Δ	Būtinų papildomų laiko intervalų trukmė, nenaudojant kanalo rezervavimo
t_d	Duomenų kadro trukmė
$t_{\Delta 1IR}$	Būtinų papildomų laiko intervalų trukmė, naudojant kanalo rezervavimą
t_{data}	Vieno vartotojo duomenų paketo perdavimo trukmė
t_{dmax}	IEEE 802.11 didžiausias duomenų kadras
t_f	IEEE 802.11 fizinio kanalo papildomas laikas
t_{f1}	Paketo pristatymo stočiai laikas
t_{IP}	IP antraštės perdavimo laikas
t_{kadr}	IEEE 802.11 vieno kadro perdavimo trukmė
t_{LLC}	LLC antraštės perdavimo laikas
t_{MAC}	IEEE 802.11 MAC antraštės perdavimo laikas
T_p	Vienam kalbos paketui perduoti būtino laiko intervalo trukmė
$t_{PLCP_antraštė}$	IEEE 802.11 PCLP antraštės trukmė
$t_{PLCP_preambulė}$	IEEE 802.11 PCLP preambulės trukmė

t_{preamb}	IEEE 802.11 preambulės perdavimo laikas
t_{RTP}	RTP antraštės perdavimo laikas
t_{RTS}	IEEE 802.11 RTS kadro perdavimo laikas
t_{Σ}	bendra visų papildomų kadro laukų trukmė
$t_{TCP/IP}$	TCP/IP antraštės perdavimo laikas
t_{UDP}	UDP antraštės perdavimo laikas
t_{vp}	Vieno balso kanalo perdavimo laikas
v_b	Sukuriamo duomenų srauto perdavimo sparta
v_f	Bitų perdavimo greitis vienos krypties linijoje
$\overline{t}_{CW}$	Vidutinis atgalinės atskaitos laikas

1 PRIEDAS. PROGRAMŲ IŠEITIES TEKSTŲ KOMPAKTINĖ PLOKŠTELĖ