

T 180 TELEKOMUNIKACIJŲ INŽINERIJA

## Paketinio radijo ryšio 2,4 GHz dažnių ruože eksperimentiniai tyrimai

A. Šaltis, L. Pavilanskas

Telekomunikacijų inžinerijos katedra, Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Aušros Vartų g. 7a, LT-2600 Vilnius, Lietuva, tel. +370 5 2626586, el. paštas arunas.saltis@el.vtu.lt, lukas@lema.lt

### Ivadas

Kuriant vartotojų telekomunikacijų tinklus, galima naudoti kelis sujungimo būdus: laidinį, bevielį, optinį. Šiuo metu perspektyviausias yra bevielis sujungimo būdas, leidžiantis mažomis sąnaudomis pasiekti nemažus atstumus ir palaikyti didelę perdavimų spartą. Viena iš bevielio ryšio technologijų yra IEEE 802.11b.

Siekiant išsiaiškinti IEEE 802.11 technologijos taikymo vartotojų tinkluose galimybes, buvo atlikti eksperimentai, kurių tikslai buvo šie:

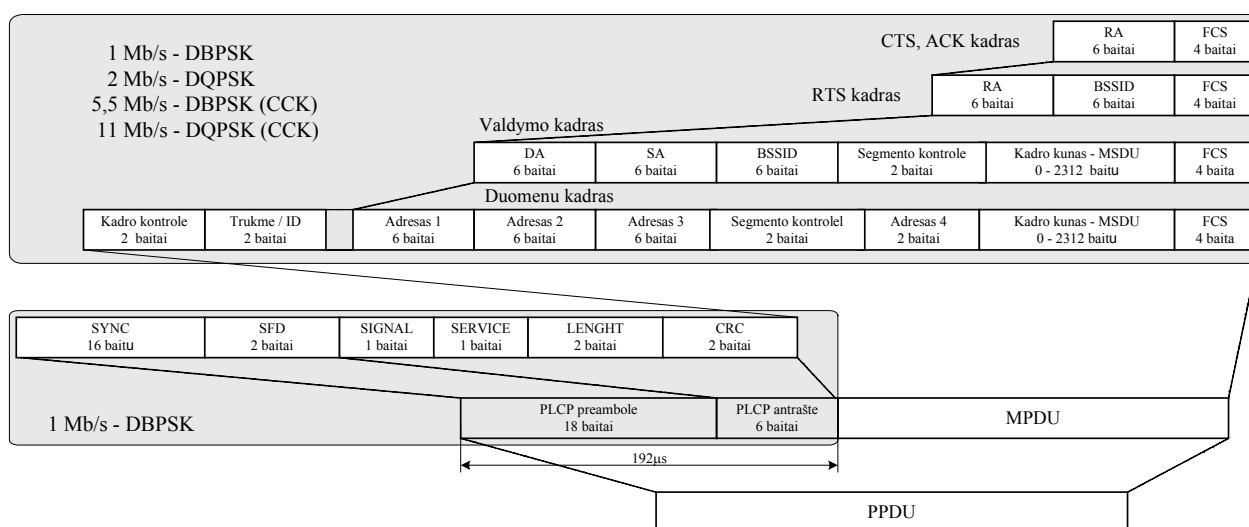
- ištirti įrenginių perdavimo spartą ir jos priklausomybę nuo naudojamo dažnių diapazono bei mazgų skaičiaus;
- išsiaiškinti 2,4 GHz diapazone naudojamų kanalų savitarpio efektus ir jų įtaką įrangos darbui;
- išnagrinėti klaidų priklausomybę nuo paketų dydžių, signalo ir triukšmo santykio bei nuo perdavimui naudojamo protokolo.

Šiame straipsnyje trumpai išanalizuojamas IEEE 802.11 standartas, aprašoma eksperimentų informacijos perdavimo spartai nustatyti panaudota fizinė ir programinė įranga bei eksperimentų vykdymo metodologija, pateikiami eksperimentų rezultatai, gauti analizuojant paketų praradimus, taip pat duomenis apie signalo ir triukšmo lygius ilgų atstumų WLAN kanaluose.

### IEEE 802.11b specifikacijos analizė

IEEE 802.11 standartas patvirtintas 1999 metais [1]. Tai „paskutinei myliai“ skirta technologija. Pradiniame variante buvo reglamentuota 1 – 2 megabitų per sekundę duomenų perdavimo sparta. Dėl greitai pelnyto pripažinimo bei didesnės spartos poreikio standartas buvo išplėstas papildomomis specifikacijomis: 802.11a – sparta iki 100 Mb/s 5,8 GHz diapazone ir 802.11b – sparta iki 11 Mb/s 2,4 GHz diapazone. Kadangi Europoje 802.11a specifikacija nėra standartizuota, tyrimams pasirinkome 802.11b.

Šis standartas yra pagrįstas kolektyviosios nešlio jutimo kreipties išvengiant susidūrimų CSMA/CA (*angl. Carrier Sense Multiple Access/Collision*) protokolu. 1 paveiksle pateikta IEEE 802.11b specifikacijos paketų struktūra. Bendroju atveju 802.11b paketas susideda iš PLCP (*angl. Phisic Layer Convergence Protocol*) preambulės, PLCP antraštės ir MAC kadro – MPDU (*angl. MAC Protocol Data Unit*). Specifikacijoje yra numatytas ir trumpas PLCP PPDU paketo formatas, tačiau realizuoti jį įrenginyje nebūtina. Viena iš 802.11b paketo ypatybių yra ta, kad esant bent kokiai galimai perdavimo spartai, preambulė visada perduodama 1 Mb/s, o antraštė – 1 arba 2 Mb/s sparta, tuomet preambulės ir antraštės perdavimo trukmė -192μs.



1 pav. IEEE 802.11 specifikacijos duomenų, valdymo, RTS, CTS bei ASK paketų struktūra

**1 lentelė.** IEEE 802.11 fizinio lygmens specifikacija

Duomenų sparta	Kodo ilgis	Moduliacija	Simbolių sparta	Bitai/Simb.
1 Mb/s	11 (BK)	DBPSK	1 Ms/s	1
2 Mb/s	11 (BK)	DQPSK	1 Ms/s	2
5,5 Mb/s	8 (CCK)	DBPSK	1,375 Ms/s	4
11 Mb/s	8 (CCK)	DQPSK	1,375 Ms/s	8

IEEE 802.11b 1 ir 2 Mb/s perdavimo spartai naudojamos dvi moduliacijų technologijos – diferencinė binarinė fazės poslinkio DBPSK (*angl. Differential Binary Phase-Shift Keying*) bei diferencinė kvadratinė fazės poslinkio DQPSK (*angl. Differential Quadrature Phase-Shift Keying*) su Barkerio kodu BK. Jos pateiktos 1 lentelėje. 5,5 ir 11 Mb/s spartai naudojama komplementinio kodo moduliacija CCK (*angl. Complementary Code Keying*).

IEEE802.11b technologijoje perdavimo aplinka yra radijo eteris. Europoje numatyti 13 radijo dažnių kanalų, kurie išdėstyti kas 5 MHz. Kanalo plotis – 22 MHz. Viename tinklo mazge rekomenduojama naudoti ne daugiau kaip tris (1, 6, 13) kanalus. Tokiu atveju tarp gretimų kanalų susidarys 25 MHz pločio juosta.

### Eksperimentų metodika ir naudota įranga

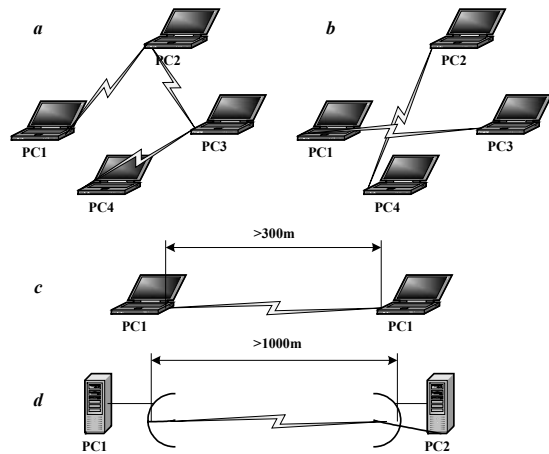
Eksperimentams pasirinktos trys tinklo struktūros, geriausiai atspindinčios realias vartotojų tinklų situacijas. Pirmoji schema (2 pav., a) - labiausiai tikėtina vartotojų tinklo struktūra. Mazgai tarpusavyje sujungti radijo kanalais, veikiančiais tame pačiame radijo dažnio ruože. Šios schemos pagrindu ištirta perdavimo tarp dviejų (PC1 ir PC4) tinklo mazgų sparta ir jos priklausomybė nuo tarpinių mazgų skaičiaus.

Savitarpio kanalų įtakai nustatyti pasirinkta dviejų vienas nuo kito nepriklausomų tinklų „taškas – taškas“ (*angl. point to point*) kanalų sistema (2 pav., b). Tokia situacija paprastai susidaro vartotojų ir standartiniuose IEEE 802.11b WLAN tinkluose. Šiuo eksperimentu norėta išsiaiškinti, kokiam minimaliam dviejų gretimų radijo dažnio kanalų dažnių skirtumui esant perdavimo sparta ima mažėti.

Trečioji eksperimentuose naudota schema sudaryta siekiant išsiaiškinti spartos priklausomybę nuo radijo dažnio kanalo. Tam tikslui panaudoti du tinklo mazgai, sujungti „taškas – taškas“ būdu (2 pav., c). Taip pat pagal šią schemą, tik didesniais (>1000 m) atstumais (2 pav., d), buvo tirtos paketų praradimo priklausomybės nuo paketo dydžio, signalo ir triukšmo santykio bei ilgą laiką tarpą stebėti signalo ir triukšmo lygio pokyčiai.

Eksperimentams buvo panaudoti Orinoco WLAN PCMCIA radijo modemai – PC24E-H-ET, atitinkantys 802.11b standartą. Jie per PCI-PCMCIA sąsają buvo prijungti prie asmeninių kompiuterių su 600 MHz spartos Intel Celeron procesoriumi, 64 MB operatyviosios atminties bei 32 MB standžiuoju disku. Modemuose buvo išjungtos WEP ir RTS/CTS funkcijos. Radijo modemų charakteristikos pateiktos 2 lentelėje.

Tinklo mazgo maršrutizatoriuose naudota Linux operacinė sistema su 2.4.17 branduoliu bei orinoco\_cs WLAN GPL ORINOCO radijo modemų tvarkyklėmis.



**2 pav.** Eksperimentuose naudoti mazgų jungimo variantai

**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
Spekro skleidimas	11 bitų Barkerio kodu
Siųstuvo nominalioji galia	15 dBm
Klaidingų bitų tankis (BER)	Geriau nei $10^{-5}$

Spartai matuoti naudota ttcp programa [2], skirta UDP ir TCP paketų pralaidumui tarp dviejų įrenginių nustatyti. Ši programa dirba kliento-serverio principu. Serverio funkcijas vykdomantis kompiuteris kuria informacijos srautą, kurį priima klientas. Naudojant ttcp, vieno matavimo sesijos metu gaunama daugiau nei 30 spartos matavimo verčių [4].

Paketų dingimai fiksuoti siunčiant ICMP Echo-request ir ICMP Echo-replay paketus, kuriuos kuria standartinė komanda ping. Paketų dingimas buvo fiksuojamas, kai į išsiųstą Echo-request paketą nebuvo gautas atsakymo paketas Echo-replay. Paketų dingimui registruoti naudota tcpdump komanda [3].

Signalų ir triukšmo įverčiams bei radijo modemų konfigūracijai nustatyti naudotos paketo Wireless Tools WLAN tvarkyklės programos [5].

### Perdavimo sparta

Pagrindinis šiuolaikinių telekomunikacijų tinklų parametras yra perdavimo sparta. Todėl eksperimentų metu jam skyrėme didelį dėmesį. Tyrėme spartos priklausomybę nuo WLAN tinklų apibūdinančių veiksnių – radijo dažnių kanalų, mazgų (klientų) skaičiaus bei tarpusavio mazgų trukdžių.

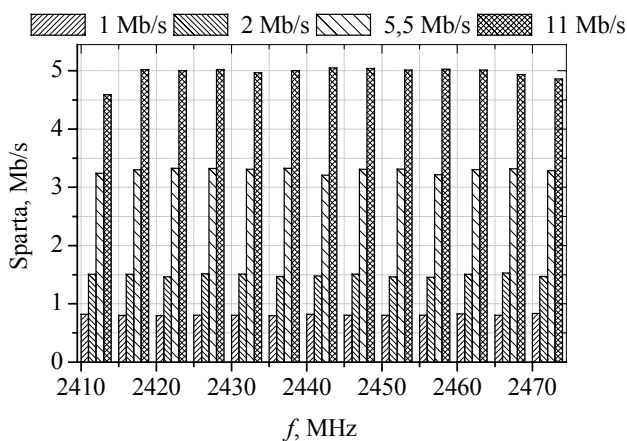
Analizuojant spartos priklausomybę nuo dažnio, pagal 2 pav., c, schemą buvo keičiamas darbinis dažnis ir naudojantis „ttcp“ programa fiksuojama kanalo sparta.

Nustatyta, kad perdavimo sparta tiesiogiai nepriklauso nuo naudojamo radijo dažnio kanalo. Dėl didelės 802.11b standarto paketo perteklinės informacijos bei šio standarto ypatybės paketo preambulę ir antraštę visuomet siūsti mažesne sparta (1 pav.) ji yra mažesnė nei reglamentuojama. Tai teigia ir įrangos gamintojai [4]. Gautame grafike (3 pav.) matomas spartos sumažėjimas

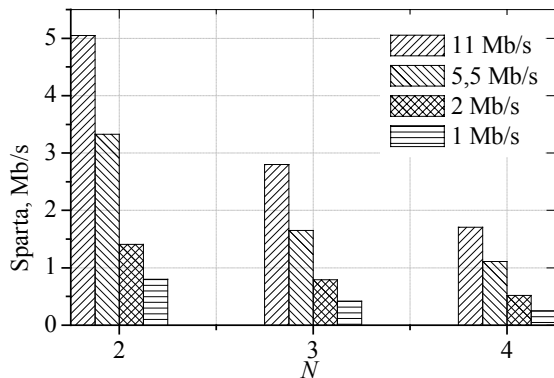
2412 MHz dažnio ruože 11 Mb/s režimu atsirado dėl eksperimentams pasirinktos vietovės, kurioje tuo pačiu metu bei tuo pačiu dažniu veikė ir kita įranga.

Vartotojų tinkluose dažnai susidaro situacija, kai tarp dviejų tinklo mazgų atsiradę tarpiniai mazgai pradeda dirbti kaip retransliatoriai. Todėl svarbu išsiaiškinti, kaip realiai priklauso perdavimo sparta, didėjant nuosekliai sujungtų mazgų skaičiui (2 pav., b).

Pagal [6] pateiktus teorinius pralaidumo skaičiavimus atlikome praktinius tyrimus, kurių metu ne didesniu kaip 100 metrų atstumu didinome mazgų skaičių grandinėje nuo 2 iki 4. Kaip ir buvo galima tikėtis, perdavimo sparta mažėja pagal dėsnį  $1/(n-1)$ , čia  $n$  – mazgų skaičius (4 pav.). Taip atsitinka todėl, kad siunčiama ir perduodama tuo pačiu kanalu. Dėl to mazgas pirma turi priimti visą tinklo paketą ir tik tada jį išsiųsti kitam mazgui.



3 pav. Spartos priklausomybė nuo dažnio  $f$



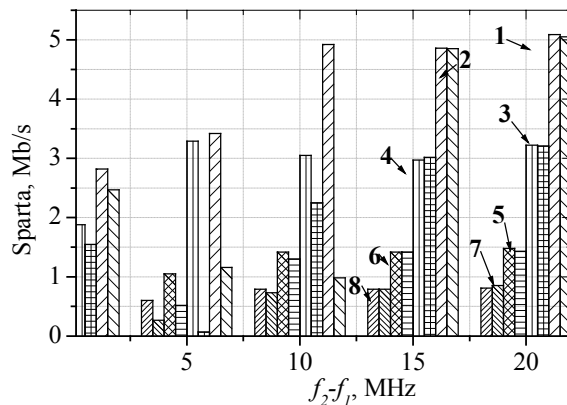
4 pav. Spartos priklausomybė nuo mazgų skaičiaus  $N$

Trečiuoju eksperimentu siekta išsiaiškinti spartos priklausomybę nuo minimalaus atstumo tarp kanalų. IEEE 802.11b standarte rekomenduojama vienoje WLAN tinklo veikimo zonoje naudoti iki trijų skirtingų kanalų, tarp kurių centrinių dažnių būtų ne mažiau kaip 25 MHz dažnių juosta [1].

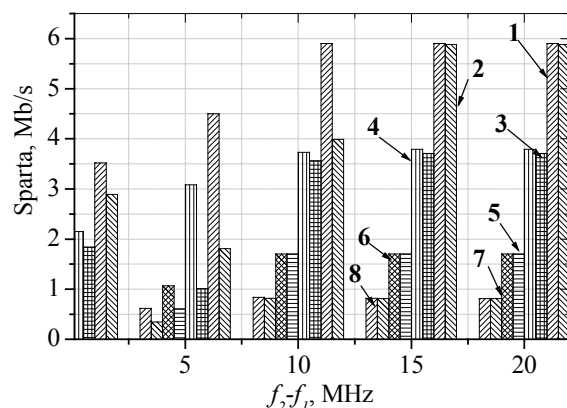
Atlikus eksperimentą pagal b schemą (2 pav.), kurio metu keistas veikiančių mazgų porų dažnių skirtumas ir matuojamas kanalų pralaidumas, nustatyta, kad, esant mažiems atstumams tarp stočių, naudojamų kanalų centriniai dažniai gali būti nutolę mažiau nei 15 MHz (5 ir 6 pav.). Kaip ir reikėjo tikėtis, rezultatų kreivių pobūdis vienodas atlikus eksperimentus tiek su TCP, tiek su UDP protokolų paketais. Tai reiškia, kad kai kanalų centrinių

dažnių skirtumas yra mažesnis, nei reglamentuoja standartas, naudojamo protokolo specifikacija nedaro įtakos perdavimo spartai.

Kai kanalų skirtumas mažesnis nei 10 MHz, tačiau nelygus nuliui, t.y. abi poros dirba skirtingais dažniais, viena iš porų priskiria šalia dirbančios poros signalą triukšmui. Tai sukuria šiai porai papildomų trukdžių, dėl kurių signalo ir triukšmo santykis sumažėja. Dėl to sumažėja vieno iš kanalų sparta.



5 pav. Informacijos perdavimo 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



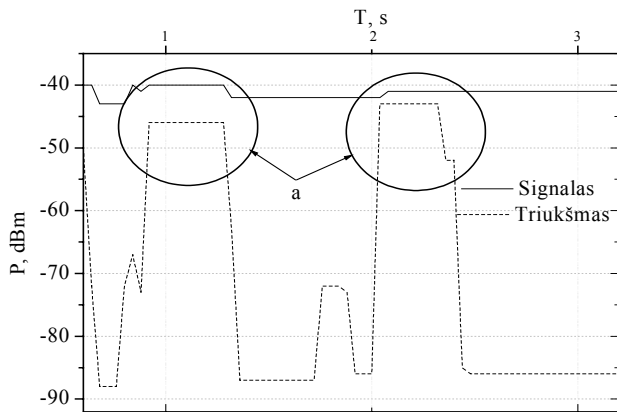
6 pav. Informacijos perdavimo UDP protokolu spartos priklausomybė nuo kanalų dažnio skirtumo  $f_2 - f_1$ : 1,2 – 11 Mb/s; 3,4 – 5,5 Mb/s; 5,6 – 2 Mb/s; 7,8 – 1 Mb/s poros

Dirbant abiem poroms tuo pačiu dažniu, perdavimo sparta taip ryškiai nesumažėja, nes kiekvienas iš mazgų „girdi“ kitus mazgus, kurie kartu dalijasi tinklo resursais. Šią hipotezę patvirtina 7 paveikslas, kuriame atvaizduotos signalo ir triukšmo matavimų kreivės, kai dažnių skirtumas tarp kanalų lygus 5 MHz. Apibrauktoje grafiko dalyse (a) matomas ryškus triukšmo padidėjimas, nes tuo metu kiti du mazgai pradeda perduoti informaciją. Triukšmo įverčių šuolius (ne ištisinės linijos) lėmė triukšmo matavimo metodikos diskretiškumas.

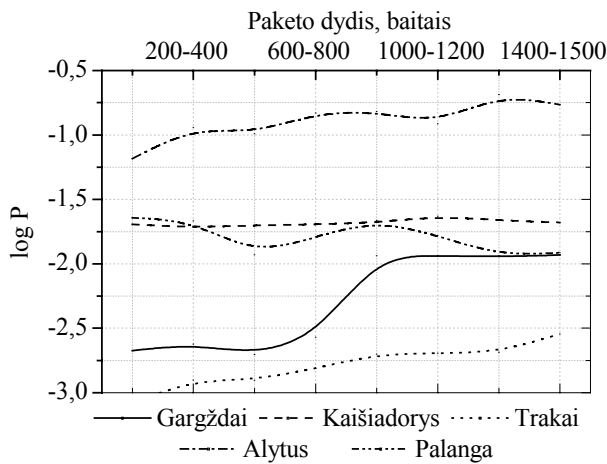
### Paketų praradimas

Balsui perduoti reikalinga mažai kintanti perdavimo sparta bei mažas prarandamų paketų skaičius. Atlikome keletą eksperimentų, kurių tikslas – nustatyti paketų dingimą, esant dideliems perdavimo atstumams. Nustatėme

paketų dingimo priklausomybes nuo paketo dydžio bei signalo ir triukšmo santykio. Eksperimentai buvo atlikti skirtingose respublikos vietovėse LitNet tinklo radijo ryšio kanaluose pagal d schemą (2 pav.).



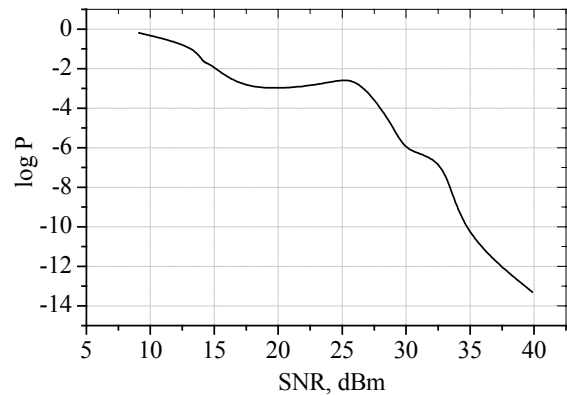
7 pav. Signalo ir triukšmo pokyčiai



8 pav. Paketų praradimo priklausomybė nuo paketo dydžio

8 paveiksle matyti, kad prarandamų paketų skaičius nepriklauso nuo paketų dydžio. Matomi šuoliai atsirado dėl kanalų apkrovimo bei funkcijos RTS/CTS modemuose išjungimo. Tokiu atveju dėl kitų tą pačią anteną veikiančių

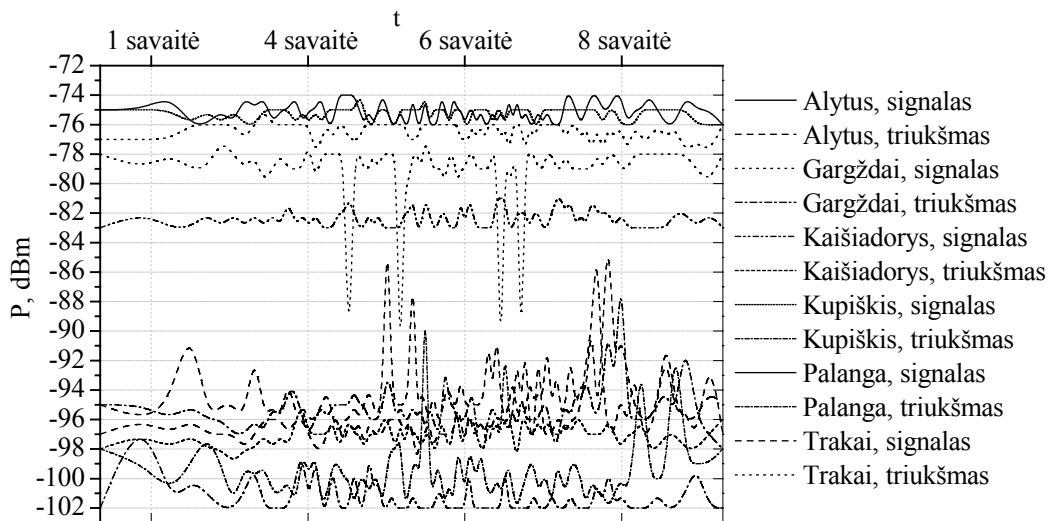
įrenginių, keliančių aukšto lygio triukšmą, veikimo didesni nei 1 kB paketai gali būti prarasti, nes prarandamų paketų skaičius priklauso nuo signalo ir triukšmo santykio (9 pav.). Kai signalo ir triukšmo santykis mažesnis nei 10 dBm, dėl labai didelio paketų praradimo ryšys beveik negalimas.



9 pav. Paketo praradimo priklausomybė nuo signalo ir triukšmo santykio

### Signalo ir triukšmo lygio matavimas ilgą laiką tarpą

IEEE 802.11b naudojamų kanalų stabilumui nustatyti įvairiose Lietuvos vietovėse atlikome eksperimentus, kurių metu 2001-2002 metų žiemą daugiau nei du mėnesius matavome signalo ir triukšmo lygius. Eksperimentai atlikti panaudojant LitNet radijo ryšio kanalus, jungiančius rajonuose esančias viešąsias bibliotekas su interneto tinklu. Trumpiausio duomenų kanalo ilgis Alytuje neviršijo 1 km, ilgiausio Gargžduose siekė 32 km. Matavimo rezultatai pateikti 10 paveiksle. Iš šio grafiko matyti, kad signalo ir triukšmo lygiai laikui bėgant kinta vidutiniškai nedaug. Dėl šios priežasties kanale dingusių paketų procentas keisis taip pat nedaug, ryšio kokybė nesikeis. Gautame grafike matomi staigūs signalo lygio sumažėjimai ir triukšmo padidėjimai siejami su tinklo konfigūravimu arba įrangos gedimo įvykiais.



10 pav. Signalo ir triukšmo lygiai ilgu laiko periodu

## Išvados

Atlikę eksperimentus gavome empirinius perdavimo spartos bei paketų praradimo priklausomybių duomenis. Analizuojant šią informaciją, galima suformuluoti tokius teiginius:

1. Perdavimo sparta nepriklauso nuo pasirinkto kanalo.

2. Didėjant tarpinių mazgų skaičiui  $n$ , perdavimo sparta mažėja pagal dėsnį, artimą  $1/(n-1)$ .

3. Esant mažiems atstumams potinkliai pradeda kurti pastebimus tarpusavio trukdžius, kai naudojamų dažnių skirtumas sumažėja iki 15 MHz. Tačiau esant dideliems atstumams tarpusavio trukdžių atsiranda, kai dažnių skirtumas tampa mažesnis nei 25 MHz. Šia hipotezę patvirtina įrangos gamintojų atlikti eksperimentai [4].

4. Paketų praradimo dažnis nepriklauso nuo paketo dydžio. Jis priklauso tik nuo signalo ir triukšmo santykio.

5. Esant dideliems atstumams, signalo ir triukšmo lygiai Lietuvoje yra vidutiniškai pastovūs. Tai reiškia, kad vartotojų tinklai WLAN IEEE802.11b pagrindu veiks stabiliai.

## Literatūra

1. **IEEE 802.11** standarto specifikacija. <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>
2. **ttcp programa** ir jos aprašymas. <http://www-iepm.slac.stanford.edu/monitoring/voip/ttcp.html>
3. **tcpdump programa** ir jos aprašymas. <http://www.tcpdump.org>
4. **Ad Kamerman, G. Aben.** Throughput Performance of Wireless LAN's Operating at 2,4 & 5 GHz. 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2000), pp. 190-195, London, Sep. 2000. – P. 190-195.
5. **Wireless tools programa** ir jos aprašymas. <http://www.hpl.hp.com/ersonal/JeanTourrilhesLinux/Tools.html>
6. **Kajackas A., Šilanskas E., Šaltis A.** Customer Premises Local Area Network: Concept and Problems // Electronics and Electrical Engineering. - Kaunas: Technologija, 2002. - No. 3(38). - P. 63-67.

Pateikta spaudai 2003 03 15

**A. Šaltis, L. Pavilanskas. Paketinio radijo ryšio 2,4 GHz dažnių ruože eksperimentiniai tyrimai // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr. 4(46). – P. 48-52.**

Pateikiami IEEE 802.11b tinklo įrenginių eksperimentinių tyrimų Lietuvos sąlygomis rezultatai. Eksperimentų tikslas – išsiaiškinti IEEE 802.11b technologijos panaudojamumą vartotojų tinklams kurti. Straipsnyje pateikta trumpa 802.11b standarto apžvalga, naudota įrangos specifikacija bei atliktų eksperimentų metodologija. Eksperimentų metu tyrinėta duomenų perdavimo sparta, bei priežastys, nuo kurių priklauso ryšio patikimumas. Išnagrinėta, koks minimalus atstumas tarp kanalų dažnių turi būti išlaikytas, kad interferenciniai reiškiniai esant mažiems ir dideliems atstumams nesukurtų žymių iškraipymų. Nagrinėta mazgų skaičiaus įtaka perdavimo spartai. Ilgą laikotarpį tyrinėti signalo bei triukšmo lygiai ryšio kanaluose įvairiose Lietuvos vietose. Bendra išvada - IEEE 802.11b technologija taikytina vartotojų tinklams kurti. Il. 10, bibl. 6 (lietuvių kalba, santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**A. Šaltis, L. Pavilanskas. Experimental Researches of Packet Radio on the Frequency 2,4 GHz // Electronics and electrical engineering. – Kaunas: Technologija, 2003. – No. 4(46). – P. 48-52.**

This article presents the results of experimental researches in IEEE 802.11b network, made in Lithuania. The goal of these experiments is to define to ascertain the suitability of IEEE 802.11b technologies for the creation of consumers' networks. The article gives a brief review about the 802.11b standard, the specification of equipments and methods used in the experiments. During the experiments the rate of data transmitting and the dependency of channel's reliability were determinate. This article gives the answer to a question, what minimal frequency's distance must be between the channels in order not to create interference phenomenon in short and long distances. There is also an investigation on the influence by the number of nodes made to the rate of transmission. This article also gives the results of long time researches of signals and noise evaluations for radio channels, which exist in different parts of Lithuania. In the end the conclusion is made, which signifies that IEEE 802.11b technology is suitable for creation of consumers' networks. Ill. 10, bibl. 6 (in Lithuanian, summaries in Lithuanian, English, Russian).

**A. Шалтис, Л. Павиланскас. Экспериментальные исследования пакетной радиосвязи на частоте 2,4 ГГц // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2003. – № 4(46). - С. 48-52.**

Даны результаты экспериментальных исследований сети IEEE 802.11b, проведенных в условиях Литвы. Цель экспериментов – выяснить возможности применения IEEE 802.11b технологии для создания потребительских сетей. В статье дан короткий обзор 802 11b стандарта, представлена спецификация оборудования и методика проведения экспериментов. Во время эксперимента исследовалась скорость передачи данных, а так же надежность связи канала. Исследовано, какое минимальное расстояние между частотами каналов должно быть для того, чтобы интерференционные явления при малых и больших расстояниях не создавали существенных искажений. Исследовалось влияние количества узлов сети на скорость передачи. В течении продолжительного времени наблюдались уровни сигнала и шума в каналах, находящихся в разных местах Литвы. Сделан вывод, что IEEE 802.11b технологию можно рекомендовать для создания потребительских сетей. Ил. 10, библи. 6 (на литовском языке, рефераты на литовском, английском и русском яз.).

DOI: 10.5755/j02.eie.11270