VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
TELEKOMUNIKACIJŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Martynas Stirbys

MOBILIŲJŲ TINKLŲ BALSO KOKYBĖS TYRIMAS
INVESTIGATION OF VOICE QUALITY IN MOBILE NETWORKS

Baigiamasis magistro darbas

Telekomunikacijų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H64003
Telekomunikacijų technologijų specializacija
Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2016

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
TELEKOMUNIKACIJŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____
(Parašas)

_____
(Vardas, pavardė)

_____
(Data)

Martynas Stirbys

MOBILIŲJŲ TINKLŲ BALSO KOKYBĖS TYRIMAS
INVESTIGATION OF VOICE QUALITY IN MOBILE NETWORKS

Baigiamasis magistro darbas

Telekomunikacijų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H64003
Telekomunikacijų technologijų specializacija
Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Vadovas dr. doc. Darius Guršnys _____ _____
(Parašas) (Data)

Lietuvių kalbos konsultantė dr. Vaida Buivydienė _____ _____
(Parašas) (Data)

Vilnius, 2016

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
TELEKOMUNIKACIJŲ INŽINERIJOS KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

_____

(Parašas)

_____

(Vardas, pavardė)

_____

(Data)

Elektronikos ir elektros inžinerijos studijų kryptis

Telekomunikacijų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 621H64003

Telekomunikacijų technologijų specializacija

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS
…….....Nr. .....
Vilnius

Studentui Martynui Stirbiui
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema: Mobiliųjų tinklų balso kokybės tyrimas (angl. *Investigation of Voice Quality in Mobile Networks*)

patvirtinta 2014 m. ……..…… d. dekano potvarkiu Nr. …….

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 201…m. ……..…… d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Apžvelgti balso skambučių inicijavimo procedūras mobiliajame tinkle. Palyginti PESQ ir POLQA algoritmus balso kokybei įvertinti, nustatyti jų privalumus ir trūkumus. Atlikti panašių tyrimų apžvalgą. Naudojant POLQA algoritmą realiose sąlygose įvertinti Lietuvos mobiliųjų tinklų (*Bitė Lietuva, Omnitel, Tele2*) balso kokybę TOP 10 Lietuvos miestų. Iš gautų rezultatų atlikti analizę, kuri leistų nustatyti balso kokybę įtakojančius veiksnius.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

Vadovas ..... dr. doc. Darius Guršnys
(Parašas) (Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

……..
(Parašas)

Martynas Stirbys

……..…....
(Data)

Vilniaus Gedimino technikos universitetas
Elektronikos fakultetas
Telekomunikacijų inžinerijos katedra

ISBN ISSN
Egz. sk. 4
Data 2016-05-17

Telekomunikacijų inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **Mobiliųjų tinklų balso kokybės tyrimas**

Autorius **Martynas Stirbys** Vadovas dr. doc. **Darius Guršnys**

Kalba

[X] lietuvių

[ ] anglų

Anotacija

Magistro baigiamajame darbe tiriama Lietuvos mobiliųjų tinklų operatorių (*Bitė Lietuva*, *Omnitel*, *Tele2*) skambučių ir balso kokybė dešimtyje didžiausių Lietuvos miestų. Tyrimas atliktas naudojant *Anite Nemo Outdoor* programinę įrangą. Balso kokybei įvertinti pasirinktas POLQA algoritmas. Darbe taip pat analizuojami mobiliuose tinkluose naudojami balso kodekai, skambučių inicijavimo algoritmai. Iš tyrimo metu gautų duomenų nustatyti parametrai, lemiantys balso kokybės suprastėjimą 2G/3G tinkluose. Labiausiai balso kokybę lemia naudojamas balso kodekas ir jo sparta. Nustatyta, jog naudojant AMR-WB 12.65 kodeką vidutinis MOS įvertis buvo 0,4 didesnis už AMR-NB 12.2. Kiti darbe analizuojami tinklo parametrai: įterpimo stiprumas, garso signalo SNR, E_c/N_0, BLER, RSCP, signalo vėlinimas, *RX quality sub* ir *RX level sub*.

Darbą sudaro 9 dalys: įvadas, užduoties analizė, panašių tyrimų apžvalga, balso kodavimo algoritmai, balso kodekų įgyvendinimas 2G/3G mobiliuose tinkluose, PESQ ir POLQA balso kokybės vertinimo algoritmų palyginimas, tyrimų metu gauti rezultatai, išvados, literatūra.

Darbo apimtis – 64 p. teksto be priedų, 61 iliustr., 10 lent., 29 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami darbo priedai.

Prasminiai žodžiai: balso kokybė, MOS, POLQA, PESQ, AMR, balso kodekas, HD balsas.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of Electronics
Department of Telecommunication Engineering

ISBN ISSN
Copies No. 4
Date 2016-05-17

Telecommunications Engineering study programme master thesis.

Title**: Investigation of Voice Quality in Mobile Networks**

Author **Martynas Stirbys** Academic supervisor associate professor **Darius Guršnys**

Thesis language

X	Lithuanian
	English

Annotation

The aim of this thesis is to investigate voice quality in Lithuanian mobile networks (*Bitė Lietuva*, *Omnitel*, *Tele2*). The data for research were collected from *Anite Nemo Outdoor* software from ten cities of Lithuania. The POLQA perceptual measurement algorithm was chosen. Moreover, the paper provides an overview of the audio codecs and call setup-procedure in mobile 2G/3G networks. The thesis describes the key characteristics and network parameters related to bad voice quality. On the basis of the results of this research, it can be concluded that audio codec and its bitrate are main factors for voice quality. Average MOS score using AMR-WB 12.65 codec is 0,4 bigger than using AMR-NB 12.2. Other network parameters related to voice quality:
insertion gain, audio quality SNR, E_c/N_0, BLER, RSCP, delay, *RX quality sub* and *RX level sub*.

Structure: introduction, task analysis, review of similar studies, audio codecs, audio codecs implementation in 2G/3G mobile networks, main differences between PESQ and POLQA, experiment and evaluation of results, conclusions, references.

Thesis consist of: 64 p. text without appendixes, 61 pictures, 10 tables, 29 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: voice quality, MOS, POLQA, PESQ, AMR, codec, HD voice.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2 priedas

(Baigiamojo darbo sąžiningumo deklaracijos forma)

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Martynas Stirbys, 20102957

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Telekomunikacijų inžinerija, TETfm-14

(Studijų programa, akademinė grupė)

BAIGIAMOJO DARBO

SĄŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės 25 d.

Patvirtinu, kad mano magistro baigiamasis darbas tema „Mobiliųjų tinklų balso kokybės tyrimas“ patvirtintas 2014 m. lapkričio 21 d. dekano potvarkiu Nr. 235el, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas dr. doc. Darius Guršnys.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

(Parašas)	MARTYNAS STIRBYS (Vardas ir pavardė)

TURINYS

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS **9**

LENTELIŲ SĄRAŠAS **11**

SANTRUMPOS **12**

ĮVADAS **13**

1. UŽDUOTIES ANALIZĖ **14**

2. PANAŠIŲ TYRIMŲ APŽVALGA **17**

Nagrinėtų tyrimų apibendrinimas 18

3. BALSO KODAVIMO ALGORITMAI **19**

3.1. AMR-NB kodekas 19

3.2. AMR-WB kodekas 21

3.3. AMR-NB ir AMR-WB kodekų apibendrinimas 23

4. BALSO KODEKŲ ĮGYVENDINIMAS 2G/3G MOBILIUOSE TINKLUOSE **24**

4.1. TFO veikimas 24

4.2. TrFO veikimas 27

4.3. TrFO ir TFO veikimas kartu 30

4.4. TrFO ir TFO protokolų apibendrinimas 30

5. PESQ IR POLQA BALSO KOKYBĖS VERTINIMO ALGORRITMŲ PALYGINIMAS **31**

5.1. PESQ algoritmas 31

5.2. POLQA algoritmas 33

5.3. PESQ ir POLQA algoritmų apibendrinimas 36

6. TYRIMŲ METU GAUTI REZULTATAI **37**

6.1. Balso kokybės vertinimas Lietuvos miestuose 37

6.1.1. Balso kokybės vertinimas Vilniuje 38

6.1.2. Balso kokybės vertinimas Kaune 40

6.1.3. Balso kokybės vertinimas Klaipėdoje 41

6.1.4. Balso kokybės vertinimas Šiauliuose 43

6.1.5. Balso kokybės vertinimas Panevėžyje 45

6.1.6. Balso kokybės vertinimas Alytuje, Marijampolėje, Mažeikiuose, Jonavoje ir Utenoje .. 46

6.2. Garso signalo parametrai, lemiantys MOS įvertį 49

6.3. UMTS tinklo parametrai, lemiantys MOS įvertį 56

6.4. GSM tinklo parametrai, lemiantys MOS įvertį 60

IŠVADOS 64

LITERATŪRA 65

PRIEDAI 68

A priedas. Matavimų aprėpties ribos dešimtyje didžiausių Lietuvos miestų 68

B priedas. Pažyma apie dalyvavimą XIX-tojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje 74

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Balso ir duomenų srautų pasiskirstymas mobiliuose tinkluose [1] 14
2 pav. Tyrimams naudojama įranga ir jos principinė jungimo schema 16
3 pav. Principinė kodeko parinkimo schema [3] 20
4 pav. Balso kodekai ir jų naudojama dažnių juosta [5] 21
5 pav. AMR-WB ir kitų kodekų pasiskirstymas vieno iš Lietuvos operatorių tinkle 22
6 pav. Operatorių, turinčių įdiegtą HD balso paslaugą, skaičius 23
7 pav. TFO protokolo veikimą vaizduojanti principinė schema [8] 24
8 pav. TrFO architektūros schema 28
9 pav. PESQ veikimą vaizduojanti schema [9] 31
10 pav. Šaltinio su dviem sakiniais ir tylos intervalu tarp jų pavyzdys [9] 33
11 pav. Signalo skaidymas į segmentus bei konvertavimas į spektrinę sritį [13] 35
12 pav. POLQA algoritmą vaizduojanti blokinė schema [13] 35
13 pav. Vidutiniai visų operatorių MOS įverčiai gauti visų matavimų metu 37
14 pav. MOS įverčių pasiskirstymas skirtingų operatorių tinkluose 37
15 pav. Vidutinė skirtingų operatorių skambučio užmezgimo trukmė 39
16 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas Vilniuje 39
17 pav. Vidutiniai MOS įverčiai Vilniuje 40
18 pav. Vidutinė skambučio užmezgimo trukmė Kaune esant skirtingiems operatoriams 40
19 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas Kaune 41
20 pav. Vidutiniai MOS įverčiai Kaune 41
21 pav. Vidutinė skambučio užmezgimo trukmė Klaipėdoje esant skirtingiems operatoriams 42
22 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas Klaipėdoje 42
23 pav. Vidutiniai MOS įverčiai Klaipėdoje 43
24 pav. Vidutinė skambučio užmezgimo trukmė Šiauliuose esant skirtingiems operatoriams 44
25 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas Šiauliuose 44
26 pav. Vidutiniai MOS įverčiai Šiauliuose 44
27 pav. Vidutinė skambučio užmezgimo trukmė Panevėžyje esant skirtingiems operatoriams 45
28 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas Panevėžyje 46
29 pav. Vidutiniai MOS įverčiai Panevėžyje 46
30 pav. Vidutinė skambučio užmezgimo trukmė TOP 6−10 Lietuvos miestuose esant skirtingiems operatoriams 47
31 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas TOP 6−10 Lietuvos miestuose 47
32 pav. Vidutiniai MOS įverčiai TOP 6−10 Lietuvos miestuose 47

33 pav. MOS priklausomybė nuo įterpimo stiprumo *Bitės* tinkle 49
34 pav. MOS priklausomybė nuo įterpimo stiprumo *Omnitel* tinkle 49
35 pav. MOS priklausomybė nuo įterpimo stiprumo *Tele2* tinkle 50
36 pav. Originalus ir iškraipytas signalas su 1,538 MOS įverčiu 50
37 pav. MOS priklausomybė nuo vienkrypčio vėlinimo *Bitės* tinkle 51
38 pav. MOS priklausomybė nuo vienkrypčio vėlinimo *Omnitel* tinkle 51
39 pav. MOS priklausomybė nuo vienkrypčio vėlinimo *Tele2* tinkle 52
40 pav. MOS priklausomybė nuo audio SNR *Bitės* tinkle 52
41 pav. MOS priklausomybė nuo audio SNR *Omnitel* tinkle 53
42 pav. MOS priklausomybė nuo audio SNR *Tele2* tinkle 53
43 pav. Išmatuotų verčių pasiskirstymas pagal technologiją (GSM, UMTS) esant skirtingiems operatoriams 54
44 pav. Vidutiniai MOS įverčiai GSM ir UMTS tinkluose esant skirtingiems operatoriams 54
45 pav. Skirtingų operatorių tinkluose naudojami kodekai 55
46 pav. Vidutinis MOS įvertis esant skirtingiems kodekams ir operatoriams 55
47 pav. MOS priklausomybė nuo RSCP *Bitės* tinkle 56
48 pav. MOS priklausomybė nuo RSCP *Omnitel* tinkle 57
49 pav. MOS priklausomybė nuo RSCP *Tele2* tinkle 57
50 pav. MOS priklausomybė nuo Ec/N0 *Bitės* tinkle 58
51 pav. MOS priklausomybė nuo Ec/N0 *Omnitel* tinkle 58
52 pav. MOS priklausomybė nuo Ec/N0 *Tele2* tinkle 59
53 pav. MOS priklausomybė nuo BLER *Bitės* tinkle 59
54 pav. MOS priklausomybė nuo BLER *Tele2* tinkle 60
55 pav. MOS priklausomybė nuo BLER *Omnitel* tinkle 60
56 pav. MOS priklausomybė nuo RX level sub *Bitės* tinkle 61
57 pav. MOS priklausomybė nuo RX level sub *Omnitel* tinkle 61
58 pav. MOS priklausomybė nuo RX level sub *Tele2* tinkle 62
59 pav. MOS priklausomybė nuo RX quality sub *Bitės* tinkle 62
60 pav. MOS priklausomybė nuo RX quality sub *Omnitel* tinkle 62
61 pav. MOS priklausomybė nuo RX quality sub *Tele2* tinkle 63

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Balso kodekų rūšys 2G ir 3G tinkluose [2] 19
2 lentelė. MOS įverčiai 32
3 lentelė. POLQA MOS įverčių palyginimas prie skirtingų veikimo skalių [13] 34
4 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai Vilniuje 38
5 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai Kaune 40
6 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai Klaipėdoje 42
7 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai Šiauliuose 43
8 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai Panevėžyje 45
9 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai TOP 6−10 Lietuvos miestuose 46
10 lentelė. MOS priklausomybė nuo 2G ir 3G tinklų parametrų 63

SANTRUMPOS

AMR-NB – Siaurajuostis AMR kodekas, taikomas mobiliuose tinkluose (angl. *Adaptive Multi-Rate Narrow Band*)

AMR-WB – Plačiajuostis AMR kodekas, taikomas mobiliuose tinkluose (angl. *Adaptive Multi-Rate Wide Band*)

DC HSDPA – 3G galimybes praplečianti ir jos pagrindu veikianti dvigubo nešlio technologija (angl. *Dual Carrier − High Speed Downlink Packet Access*)

DCS – Skaitmeninė korinio ryšio sistema analogiška GSM technologijai ir veikianti 1800 MHz dažniu (angl. *Digital Cellular System*)

DTX – technologija, leidžianti išjungti mobiliojo terminalo siųstuvą tylos laikotarpiu (angl. *Discontinuous Transmission*)

FDD – dažninis dalinimo būdas (angl. *Frequency Division Duplexing*)

GSM – Globalusis mobilių telefonų ryšio standartas (angl. *Global Standart for Mobile Communications*)

LTE – Mobilios telefonijos tinklo standartas (angl. *Long Term Evolution*)

eNode B – 4G tinklo bazinė stotis

RAB – Radijo prieigos nešlys (angl. *Radio Acccess Bearer*)

RBS – Bazinė stotis (angl. *Radio Base Station*)

RRC – Radijo resursų valdymo protokolas (angl. *Radio Resource Control*)

RNC – UMTS radijo tinklo valdiklis (angl. *Radio Network Controller*)

RRC – Radijo resursų valdymo protokolas (angl. *Radio Resource Control*)

SON – Savarankiškai susiorganizuojantys tinklai (angl. *Self Organising Networks*)

TCH – Srauto kanalas (angl. *Traffic CHannel*)

TrFO – Technologija, leidžianti nenaudoti perkodavimo įrenginių mobiliuose tinkluose (angl. *Transcoder Free Operations*)

TFO – technologija leidžianti išjungti perkodavimo įrenginius (angl. *Tandem Free Operations*)

UTRAN – Universalus antžeminis radijo prieigos tinklas (angl. *UMTS Terrestrial Radio Access Network*)

WCDMA – Plačiajuostė kodinio dalijimo daugkartinė prieiga (angl. *Wideband Code Division Multiple Access*)

WiFi – Bevielio ryšio standartas (angl. *Wireless Fidelity*)

2G – Antrosios kartos tinklas (angl. *Second Generation*)

3G – Trečiosios kartos tinklas (angl. *Third Generation*)

ĮVADAS

XXI a. mobilusis ryšys tapo neatsiejama mūsų gyvenimo dalimi. Mobiliaisiais įrenginiais tapo patogu ne tik atlikti banko mokėjimą esant toli artimiausio banko padalinio ar net nuo stacionaraus kompiuterio, tačiau taip pat ir turėti galimybę pasirašyti dokumentus elektroniniu parašu ar nuskaičius specialų QR kodą sužinoti mus dominančią informaciją. Mobiliųjų duomenų paslaugų augimas, pavyzdžiui, vaizdo transliacijos, tampa pagrindiniu iššūkiu operatoriams, suvaldant nuolat augančią duomenų kiekio paklausą. Tai tik keletas pavyzdžių, kur šiuo metu pritaikomi mobilieji įrenginiai.

Galima teigti, kad ilgą laikotarpį buvo tobulinamos duomenų perdavimo technologijos nuošalyje paliekant balso perdavimo technologijas. Žmonėms tapo įprasta girdėti įvairius pašalinius garsus pokalbio metu ar neatpažinus tam tikro garso paprašyti pakartoti pastarąjį darkart. Pastaruoju metu mobiliųjų tinklų operatoriai Lietuvoje ir pasaulyje atsigręžė į balso paslaugų kokybę ir pradėjo intensyviai diegti HD kokybės balso paslaugas. Ši balso paslauga apima balso kodavimą ne standartinėje 300−3400 Hz dažnių juostoje, tačiau daug platesnėje 50–7000 Hz juostoje. Šie ir kiti plačiajuosčių kodekų pakeitimai užtikrina daug kokybiškesnes balso paslaugas, leidžia sumažinti atsirandantį nepageidaujamą pašalinį triukšmą. Pašalinis triukšmas gali būti suprantamas kaip triukšmas, atsirandantis kalbant viešajame transporte, esant statybvietėje ar kitoje aplinkoje, įprastai sudarančioje nepatogumų tinkamai susikalbėti. Jau yra sukurti ultraplačiajuosčiai kodekai, kurie leidžia koduoti balsą dažnių juostoje nuo 50 Hz iki 12000 Hz, tačiau jie šiuo metu taikomi tik VoLTE technologijai.

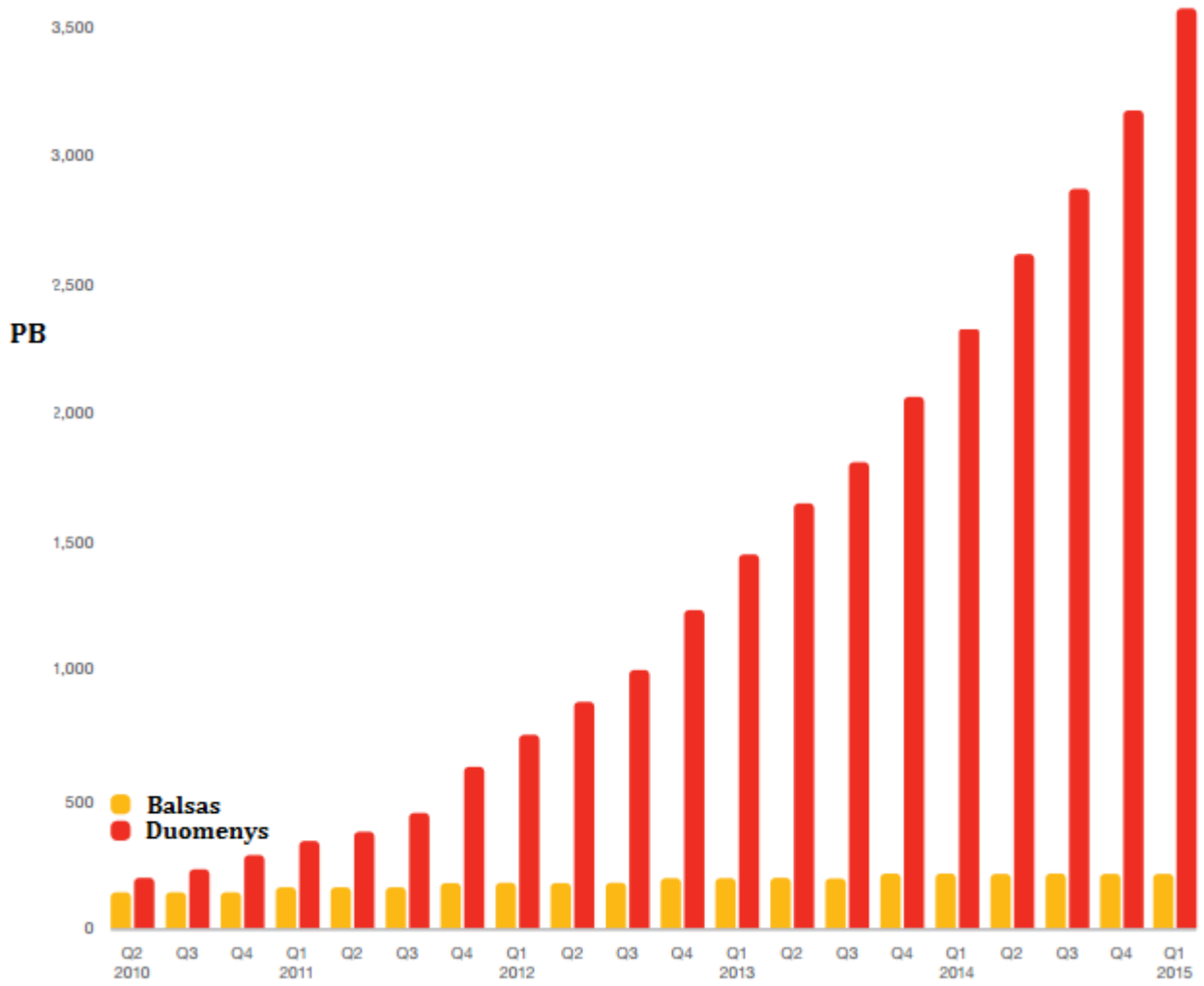
Magistro darbo uždaviniai:

1. Išsiaiškinti skambučių užmezgimo procedūras mobiliuose tinkluose.
2. Atlikti PESQ ir POLQA algoritmų palyginamąją analizę. Įvertinti šių algoritmų privalumus ir trūkumus.
3. Atlikti balso kokybės matavimus Lietuvos mobiliųjų operatorių tinkluose su įranga, leidžiančia įgyvendinti POLQA algoritmą.
4. Iš gautų rezultatų atlikti analizę, kuri leistų nustatyti balso kokybę lemiančius veiksnius.

Šiuo tyrimu siekiama įvertinti Lietuvoje veikiančių mobiliojo ryšio operatorių teikiamą balso kokybę dešimtyje didžiausių Lietuvos miestų. Gauti rezultatai suteiks galimybę įvertinti POLQA algoritmo veikimą, nustatyti pagrindinius veiksnius, lemiančius balso kokybės įvertį (MOS). Remiantis RRT duomenimis, visų operatorių 3G technologijos aprėptis minėtose zonose yra puiki, todėl didžiausias dėmesys bus skiriamas trečiosios kartos technologijos tinklo balso kokybei.

1. UŽDUOTIES ANALIZĖ

Kaip matyti iš 1 pav. pateikto *Ericsson* grafiko, duomenų srautas pastoviai auga ~ 35 %, o balso paslaugų sukuriamas srautas paskutiniu metu nekinta arba kinta nežymiai. Analogiškos tendencijos prognozuojamos ir ateityje [1].



1 pav. Balso ir duomenų srautų pasiskirstymas mobiliuose tinkluose [1]

Pastovų balso srauto kiekį galima paaiškinti tuo, jog balso skambučių kainos ir mobilieji įrenginiai tapo prieinami daugeliui vartotojų, todėl net itin žemos pokalbių kainos nepajėgios sukurti daug didesnio balso skambučių kiekio. Priešinga yra duomenų kiekio situacija. Šiuo metu duomenų paketų kainos dar gana aukštos ir kainų mažėjimas prisideda prie spartaus duomenų kiekio augimo. Nežymų balso skambučių sukuriamo srauto padidėjimą gali lemti tokie veiksniai kaip tarifų mažėjimas skambinant į užsienį, HD kokybės balso paslauga. Pastaroji paslauga vis labiau populiarėja tarp mobiliųjų operatorių visame pasaulyje, kadangi tai yra vienas iš būdų kaip galima pagerinti balso

kokybę mobiliuose tinkluose. HD paslaugos diegimo apribojimai, privalumai ir trūkumai plačiau apibūdinami tolesniuose šio darbo skyriuose.

Temos naujumas ir aktualumas

Tobulėjant technologijoms mobilieji operatoriai sparčiai atnaujina savo tinklo techninę ir programinę įrangą. Naujesnė įranga suteikia galimybes teikti geresnės kokybės duomenų ir balso perdavimo paslaugas. Lietuvoje mobiliųjų operatorių balso kokybė buvo tiriama ne kartą, tačiau naudojant PESQ arba kitus ITU-T rekomendacijose numatytus metodus. Šiame tyrime atliekama *Bitė Lietuva* (toliau − *Bitė*), *Omnitel ir Tele2* mobiliųjų operatorių balso skambučių kokybės analizė. Darbe buvo tiriama toliau pateiktų miestų skambučių ir balso kokybė:

- Vilniaus;
- Kauno;
- Klaipėdos;
- Šiaulių;
- Panevėžio;
- Top 6−10 miestų (Alytaus, Marijampolės, Mažeikių, Jonavos, Utenos).

Tyrime analizuojami tokie pagrindiniai skambučių kokybę lemiantys veiksniai kaip skambučio užmezgimo trukmė, balso kokybė MOS skalėje, nutrūkusių skambučių santykinis skaičius, sėkmingai inicijuotų skambučių skaičius. Rezultatai pateikiami grafiniu ir skaitiniu pavidalu. Gauti rezultatai analizuojami pateikiant priežastinį ryšį. Balso kokybei tirti naudojamas POLQA algoritmas. Šiuo metodu atliktų Lietuvos mobiliųjų operatorių balso kokybės analizės viešose duomenų bazėse aptikti nepavyko. Šis metodas yra naujesnis už PESQ ir tiksliau leidžia įvertinti vartotojo patiriamą balso kokybę. Atliktas tyrimas leis įvertinti ne tik vartotojų patiriamą balso kokybę skirtinguose Lietuvos mobiliuosiuose operatoriuose, tačiau taip pat leis įvertinti pagrindinius balso kokybę lemiančius veiksnius.

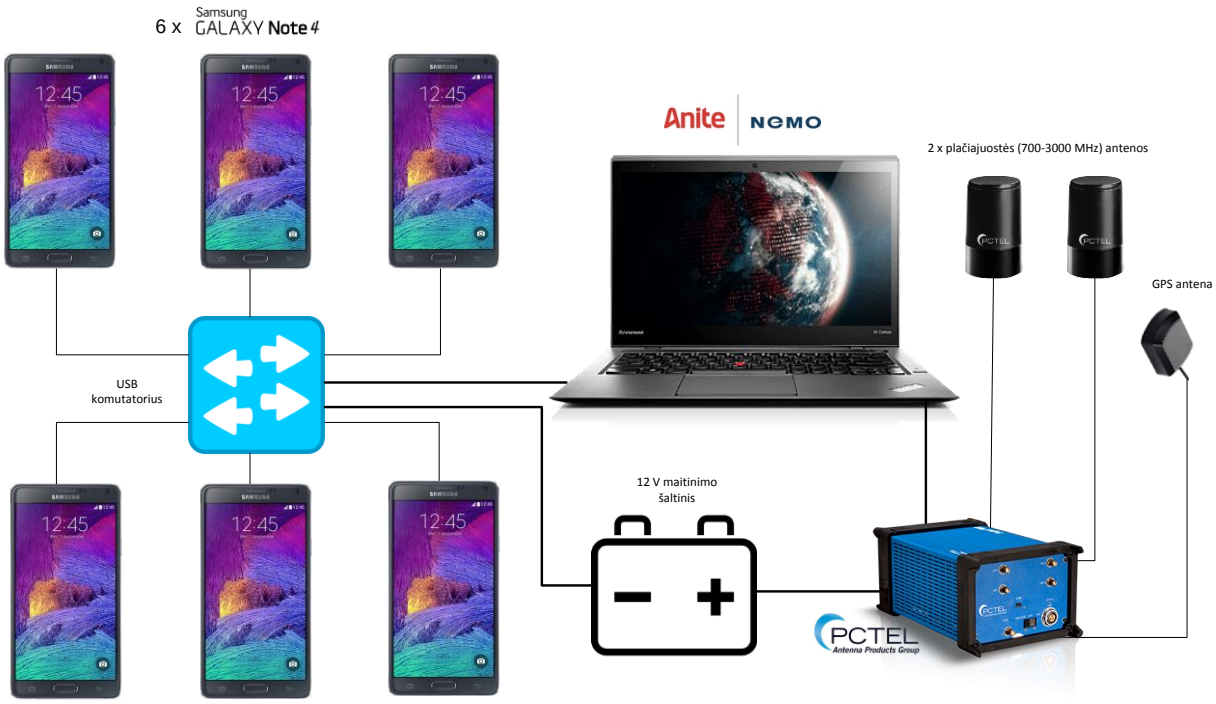
Tyrimo metodai

Tyrimui atlikti naudojama sertifikuota tam pritaikyta ir ištestuota įranga, kuri užtikrina, jog gauti rezultatai yra objektyvūs. Tyrimui naudojama įranga:

- *Anite Nemo Outdoor* programinis paketas;
- *PCTEL SeeGull MX* skaneris;
- 6 x *Samsung Note 4* telefonai su POLQA algoritmo licencija;
- Krepšys, skirtas gabenti telefonus automobilyje;
- *Lenovo* nešiojamas kompiuteris.

Įranga ir jos principinė jungimo schema pateikta 2 pav. Tyrimas buvo atliekamas automobiliu, todėl visa įranga buvo pritaikyta ją gabenti tokio tipo transportu. Tyrimo maršrutai buvo sudaryti iš anksto, jie pateikti A priede. Maršrutai buvo sudaromi atsižvelgiant į tai, jog būtų ištirtas kuo didesnis miesto

plotas bei aplankyti daugiausiai vartotojų pritraukiantys objektai. Tyrimui naudojamas skaneris yra patikrintas metrologų ir tinkamas tokio masto tyrimams. Vieno skambučio trukmė naudojama matavimams 90 s. Pertrauka tarp skambučių – 60 s.



2 pav. Tyrimams naudojama įranga ir jos principinė jungimo schema

Anite yra viena iš pirmaujančių programinės ir techninės įrangos gamintojų, kuri specializuojasi mobiliųjų įrenginių ir tinklo testavimo srityse. Šios įmonės produktais naudojasi daugelis mobiliųjų operatorių bei išorinių įmonių, atliekančių mobiliųjų operatorių tinklų tyrimus. Tyrime naudojami mobilieji telefonai skiriasi nuo įprastų *Samsung Note 4*. Jie turi specialią programinę įrangą. Ši programinė įranga yra licencijuota ir pritaikyta atlikti įvairiems tinklo matavimams. Mobiliųjų įrenginių techninės charakteristikos yra identiškos kaip įprastų *Samsung Note 4*.

Be tyrimo medžiagos ir analizės, šiame darbe išsamiai analizuojami skambučių užmezgimo algoritmai – TFO ir TrFO. Skambučių užmezgimo procedūros, jų privalumai ir trūkumai naudojant minėtus algoritmus aprašomi tolesniuose šio darbo skyriuose. Darbe taip pat išsamiai apibūdinami PESQ ir POLQA algoritmai nurodant jų veikimo skirtumus. Skyriuje − Panašių tyrimų apžvalga − analizuojami atlikti užsienio ir Lietuvos mokslo darbai su PESQ ir POLQA algoritmais.

2. PANAŠIŲ TYRIMŲ APŽVALGA

Skirtingų šalių mokslininkai tyrinėja balso kokybę naudojant PESQ ir POLQA algoritmus. Taip pat šie algoritmai dažnai naudojami mobiliųjų operatorių, norint įvertinti jų tinklo balso kokybę. Šiame skyriuje apžvelgiami Lietuvos ir užsienio šalių moksliniai tyrimai, susiję su balso kokybės tema.

Čekijoje, Ostravos technikos universiteto mokslininkai Pavolo Partila ir Marekas Kohutas aprašė metodologiją balso kokybei GSM tinkle matuoti naudojant interaktyvaus balso atsako ir PESQ metodus [14]. Straipsnyje išsamiai aprašoma, kaip naudoti šiuos abu metodus balso kokybei įvertinti, taip pat pateikiamas šių metodų praktinis įgyvendinimas.

Žilinos universiteto mokslininko Peteris Pocta bei Nacionalinio Airijos universiteto mokslininkų Odhrano Stapletonos, Hugho Melvino darbe nagrinėjama tema − kiekybiškai išreiškiamas PESQ veiksmingumas susidorojant su dažnu laiko poslinkiu [15]. Autoriai savo tyrime analizuoja, kaip PESQ algoritmas reaguoja į vėlinimus įvertinant balso kokybę. Šio tyrimo išvadose teigiama, kad PESQ įvertis labai priklauso nuo tylos intervalų. Kuo daugiau jų tarp kalbos intervalų, tuo gaunamo įverčio reikšmė didesnė. Jie taip pat daro išvadas, jog PESQ nesugeba tinkamai susidoroti su dažnais poslinkiais laike.

Balso kokybė yra neatsiejama nuo naudojamų kodekų. Išsamiai AMR-WB kodeką nagrinėjo Brunas Bessette ir kiti mokslininkai iš skirtingų organizacijų [27]. Straipsnyje apibūdinami pagrindiniai minėto kodeko veikimo principai, pateikiama supaprastinta kodeko veikimo schema. Autorių teigimu šis kodekas ženkliai pagerina balso kokybę 2G ir 3G mobiliuose tinkluose. Vienu iš privalumų taip pat įvardijimas kodeko suderinamumas tarp skirtingų laidinių ir bevielių technologijų. Anksčiau sukurto AMR-NB kodeko tyrimą atliko M. Werneris ir P.Vary [28]. Autorių darbe tiriama balso paslaugų kokybė 3G tinkle esant skirtingoms AMR kodeko perdavimo spartoms. Autorių sukurtas modelis leidžia įvertinti, kaip tinklo parametrų pasikeitimas lemia balso kokybės suprastėjimą.

AMR-NB ir AMR-WB kodekų įdiegimas 2G ir 3G mobiliuose tinkluose nebūtų įmanomas be TFO ar TrFO protokolų. Išsamiai šiuos protokolus ištyrė A. Avsaras [7]. Autoriaus magistro tezėse pateikiami skirtingi protokolų veikimo atvejai. Taip pat apibūdinama, kaip vyksta sujungimas tarp skirtingų technologijų naudojant šį protokolą.

Lietuvoje balso kokybės tematiką išsamiai nagrinėjo Vilniaus Gedimino technikos universiteto dr. doc. Darius Guršnys. Minėto autoriaus disertacijos tema − Balso kokybės vertinimo metodai ir priemonės mobiliojo ryšio sistemoms [16]. Darbe analizuojamos mobiliojo ryšio vartotojų patiriamos balso kokybės vertinimo problemos. Autoriaus išvadose pateikta informacija teigiama, jog balso kokybei vertinti naudojamas PESQ algoritmas nėra tinkamas matuoti trumpų balso atkarpų kokybę. Tai argumentuojama tuo, jog gaunamų matavimo rezultatų neapibrėžtis gali siekti daugiau nei 0,6

MOS balo. Šią problemą siūloma spręsti naudojant dirbtinai suformuotą tiriamąjį signalą, sudarytą iš *M* kartų pakartotų pirminio signalo atkarpų. Tai suteikia galimybę iki 20 kartų sumažinti matavimo rezultatų neapibrėžtį.

Savo tyrime PESQ algoritmą taip pat pritaikė ir to paties universiteto doktorantas Evaldas Stankevičius. Straipsnyje, kurio tema − balso kokybė mobiliojo ryšio sistemose – autorius nagrinėja sukurtą balso kokybės matavimo įrangą [17]. Minėta įranga idealiomis sąlygomis mobiliuoju tinklu perduoto balso kokybę vertina vidutiniu 3,85 PESQ-MOS įverčiu. Tokiomis pat sąlygomis *TEMS Investigation 9.0* balso kokybę anot autoriaus įvertina vidutiniu 4,05 SQI-MOS įverčiu.

Apibūdinto PESQ bei VISQOL ir POLQA algoritmų palyginimą atliko Dublino Trinito koledžo mokslininkas Andro Hinesas [18]. Autorių gauti rezultatai leidžia teigti, jog PESQ ir POLQA metodais gauti įverčiai yra gana panašūs naudojant skirtingus šaltinius (NOIZEUS ir E4).

Nagrinėtų tyrimų apibendrinimas

Atlikus literatūros apžvalgą galima teigti, jog balso kokybė yra svarbi vartotojams. Sukurta daug įvairių būdų, kaip būtų galima pagerinti balso kokybę mobiliuose tinkluose, tačiau ne visi būdai gali būti realiai įgyvendinami tinkluose. Vienas paprasčiausių sprendimų, kuris leidžia pagerinti balso kokybę mobiliuose tinkluose – AMR-WB kodeko naudojimas. Šio kodeko naudojimas leidžia sumažinti girdimus pašalinius trukdžius, aiškiau girdėti aukšto dažnio garsus. Straipsnių ar kitų informacinių šaltinių Lietuvos duomenų bazėse, kurie nagrinėtų balso kokybę, kai naudojamas AMR-WB kodekas, aptikti nepavyko. Taip pat nerasta Lietuvos autorių tyrimų su POLQA algoritmu. Lietuvos mobilieji operatoriai naudoja minėtą kodeką, todėl tikslinga ištirti jo veikimą bei įvertinti balso paslaugų kokybę.

Toliau pateiktame trečiame šio darbo skyriuje išsamiai analizuojami AMR-NB ir AMR-WB kodekai, pateikiami šių kodekų veikimo algoritmai.

3. BALSO KODAVIMO ALGORITMAI

Balso kokybės atžvilgiu GSM tinklas nežymiai skiriasi nuo UMTS tinklo. Iš pateiktos 1 lentelės matyti, jog tiek GSM, tiek WCDMA tinkluose taikomi AMR (angl. *Adaptive Multi-Rate)* ir AMR–WB (angl. *Adaptive Multi Rate – Wide Band*) kodekai. Pastarieji kodekai suteikia galimybę teikti HD kokybės balso paslaugas. Senesni ir tik GSM tinkle palaikomi yra FR (angl. *Full rate*), HR (angl. *Half rate*) bei EFR (angl. *Enhanced Full Rate*) kodekai. Naudojamo kodeko pasirinkimą nusprendžia telefono ir mobiliojo ryšio tinklo įrangos palaikomų kodekų tipai bei tinklo ryšio sąlygos. Šiame skyriuje išsamiai aprašomos procedūros, leidžiančios tinkluose naudoti AMR ar AMR-WB kodekus.

1 lentelė. Balso kodekų rūšys 2G ir 3G tinkluose [2]

Kodekas	*Sukūrimo metai*	*Kodavimo sparta, kbps*	*Sistema/srauto kanalas*
FR	1989	13,0	GSM FR
HR	1995	5,6	GSM HR
EFR	1996	12,2	GSM FR
AMR	1999	12,2; 10,2; 7,95; 7,4; 6,7; 5,9; 5,15; 4,75	GSM FR (visos spartos), GSM HR (šešios žemiausios spartos), 3G WCDMA (visos spartos)
AMR – WB	2001	23,85; 23,05; 19,85; 18,25; 15,85; 14,25;12,65; 8,85; 6,60	GSM FR (šešios žemiausios spartos) EDGE (visos spartos) 3G WCDMA (visos spartos)

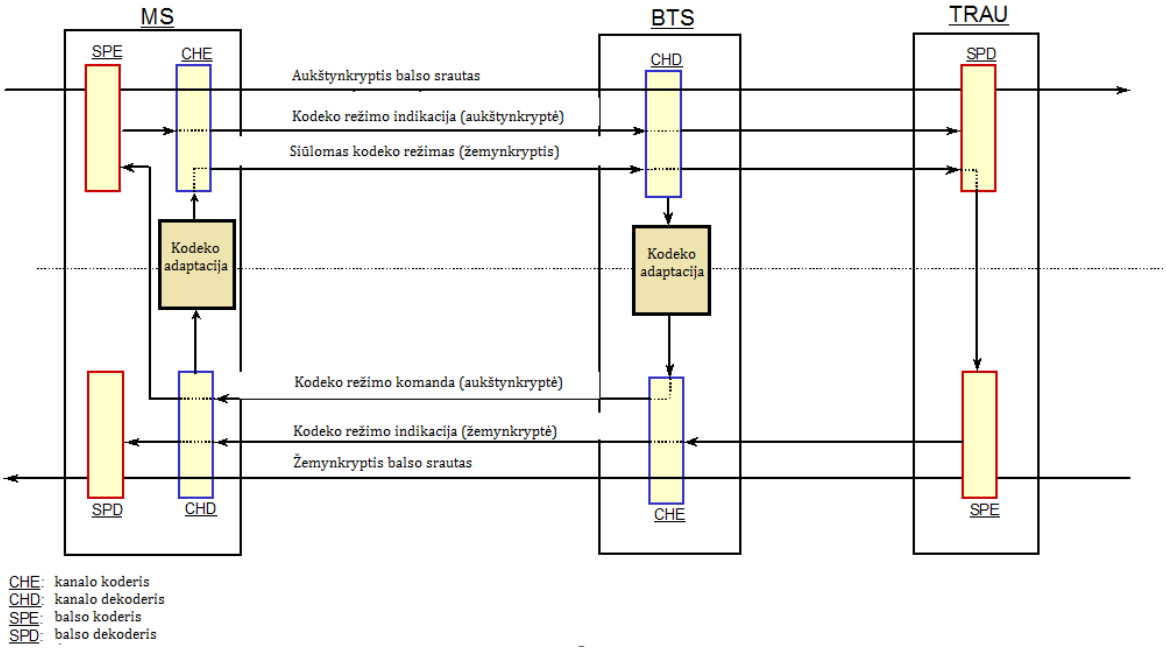
3.1. AMR-NB kodekas

Priešingai nei ankstesni GSM balso kodekai (FR, EFR ir HR), kurie turėjo fiksuotas spartas ir pastovų klaidų aptikimo lygį, AMR kodekai prisitaiko prie tam tikro klaidų kiekio, priklausančio nuo ryšio sąlygų ir srauto kiekio. AMR kodekas suteikia galimybę tinklui parinkti optimalų kanalo tipą (HR ar FR) ir kodeko veikimo spartą (1 lentelė). Toks adaptyvus kodeko prisitaikymas užtikrina geriausią įmanomą pokalbio kokybę. Kaip esminius privalumus galima išskirti šiuos:

- patobulėjusi balso kokybė abiejuose kanalų tipuose (HR, FR);

- priklausomai nuo to, kokia kanalo kokybė, galima parinkti skirtingas kodavimo spartas ir taip geriausiai išnaudoti esamą kanalą suteikiant aukščiausią įmanomą balso kokybę. Šiuos parametrus dažniausiai nurodo operatorius ląstelės lygmenyje;
- geresnis kanalo atsparumas esant nedideliems radijo signalo iškraipymams naudojant FR kanalo tipą;
- galimybė pritaikyti AMR veikimą įvairiems skirtingiems operatorių poreikiams užtikrinti.

Kaip jau minėta, kokia kodavimo sparta bus naudojama siunčiant kiekvieną balso kadrą, yra nusprendžiama įvertinus tuo metu egzistuojančias radijo kanalo sąlygas. Kodeko prisitaikymo algoritmas parenka optimalią kalbos kodavimo spartą priklausomai nuo kanalo kokybės. Labiausiai patikimas kodekas laikomas su mažiausia kodavimo sparta. Tokį kodeką tinklas nusprendžia naudoti tada, kai radijo kanalo sąlygos yra itin prastos. Priešinga situacija esant itin geroms radijo kanalo sąlygoms. Tokiu atveju parenkamas geriausios kokybės arba didžiausią kodavimo spartą turintis kodekas. Kodekas pokalbio metu gali kisti ne vieną kartą. Tai lemia, kokią kanalo kokybę išmatuoja tinklas ir mobilusis įrenginys. Pagal perduodamas išmatuoto kanalo reikšmes, parenkamas atitinkamas kodekas [3].



3 pav. Principinė kodeko parinkimo schema [3]

Kaip pavaizduota 3 pav., abiejose pusėse (aukštynkryptėje ir žemynkryptėje) balso duomenų kadrai išėjimuose yra susiejami su kodeko režimo indikacija (angl. *Codec Mode Indication*). Ši informacija naudojama parenkant tinkamiausią kanalą ir šaltinio dekoderius. Tinklo pusėje kodeko režimo indikaciją privaloma nusiųsti į transkoderių įrenginius, tokiu būdu parenkamas tinkamas šaltinio dekodavimas. Koks kodekas bus naudojamas aukštynkryptėje pusėje mobiliajam įrenginiui nurodo tinklas. Tinklas įvertina kanalo kokybę, numato geriausią įmanomą kodeką egzistuojančioms ryšio

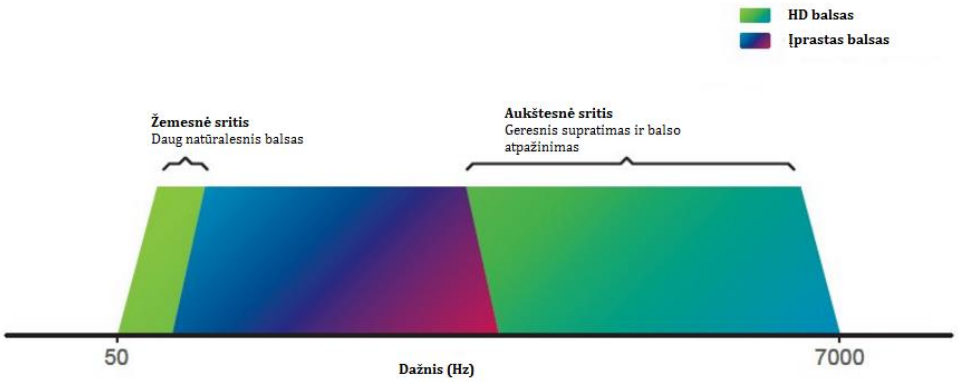
sąlygoms ir persiunčia pranešimą su šia informacija į mobilųjį įrenginį. Analogiška procedūra su žemynkryptėje pusėje esančiu kodeku. Šiuo atveju mobilusis įrenginys išmatuoja kanalo kokybę bei siunčia pranešimą, su apskaičiuota reikšme, prašydamas tinklo atitinkamo kodeko tipo. Teoriškai kodeko sparta gali kisti perduodant kiekvieną naują kadrą, tačiau praktikoje dėl vėlinimo, kodeko funkcijų įvertinimo ir kitų veiksnių dažniausiai išlieka veikti žemesnės kodavimo spartos kodekas [3].

Galima teigti, kad AMR-NB kodekas dėl savo adaptyvių savybių yra puikiai tinkantis mobiliems tinklams. Taip pat, geriausiai žmogui girdima dažnių juosta yra 300−3400 Hz, kurią ir sugeba atkurti minėtas kodekas [4].

3.2. AMR-WB kodekas

Žmogaus klausos sistema sugeba girdėti garsus nuo 20 Hz iki 20 000 Hz, tačiau žmogaus sukuriamas balsas dažniausiai būna nuo 50 Hz iki 12 000 Hz. Daugelis mobilių ir laidinių tinklų balsą šiuo metu perduoda daug siauresnėje dažnių juostoje, kuri siekia nuo 300 Hz iki 3400 Hz. Todėl galima teigti, jog balso kokybė šiuo metu daug kur yra ribojama dėl siauros dažnių juostos. Vienas iš tokių pavyzdžių galėtų būti F ir S raidžių garsų sudėtingas atskyrimas. Šie garsai yra aukštesnio nei 3400 Hz dažnio, todėl juos itin sunku atskirti. Norint išvengti įvairių nesusipratimų sakant raides ar kitus trumpus raidžių junginius, tokiais atvejais naudojama fonetinė abėcėlė [5].

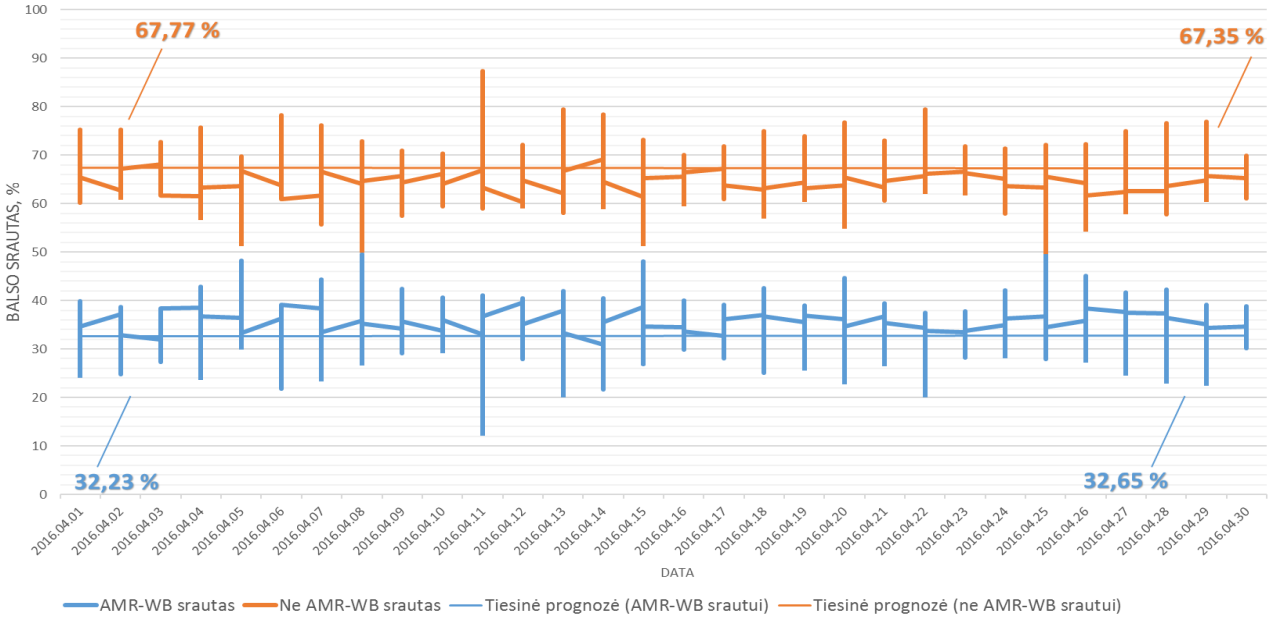
Galimybė teikti daug aukštesnės kokybės paslaugas atsirado sukūrus AMR-WB kodeką. Kartu su šio kodeku atsiradimu gimė ir terminas HD kokybės balsas. Kaip matyti iš 4 pav., AMR-WB sugeba atkurti garsus iš 50−7000 Hz dažnių juostos. Tai suteikia galimybę turėti daug natūralesnį balsą.



4 pav. Balso kodekai ir jų naudojama dažnių juosta [5]

3.1 skyriuje apibūdintas AMR-NB kodekas standartizuotas 3GPP organizacijos 1998 m. AMR-WB standartizavimas prasidėjo 2000 m ir tęsėsi iki 3GPP ver. 5. Pagrindinis tikslas buvo praplėsti esamo AMR-NB kodeko spartas išlaikant visus principus, analogiškus AMR-NB kodekui. Vėliau, 3GPP ver. 6 buvo sukurtas išplėstas (patobulintas) AMR-WB kodekas, kuris papildė esamus AMR-NB ir AMR-WB kodekus, suteikdamas galimybę patirti dar aukštesnę balso kokybę.

Toliau pateiktame 5 pav. grafike atsispindi vieno iš Lietuvoje veikiančio operatoriaus AMR-NB ir AMR-WB kodekų pasiskirstymas UMTS tinkle. Statistika iliustruoja kodekų pasiskirstymą trijų mėnesių laikotarpyje.



5 pav. AMR-WB ir kitų kodekų pasiskirstymas vieno iš Lietuvos operatorių tinkle 2016.03−2016.05 laikotarpyje

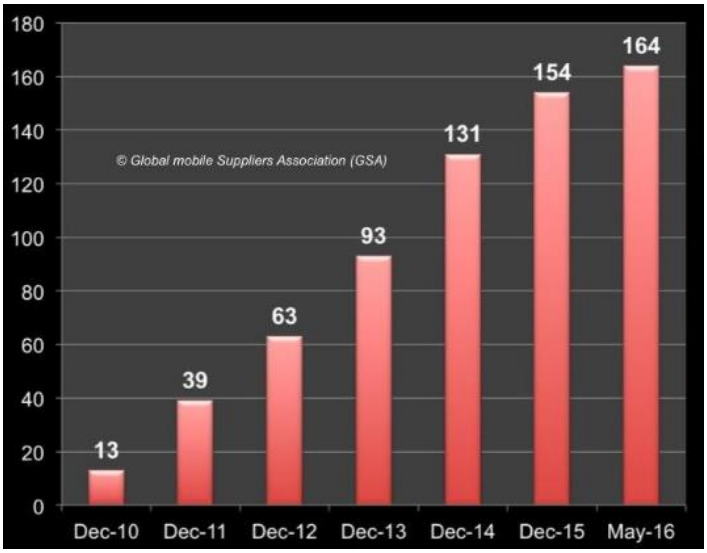
Pateikta statistika leidžia teigti, kad AMR-WB kodeko paplitimas tarp mobiliųjų įrenginių nežymiai auga. Grafike matomi švytavimai iliustruoja, jog kodekų pasiskirstymas nėra tolygus. Tai lemia skirtingi balso srauto kiekiai kiekvienos paros metu, pavyzdžiui, savaitgaliais balso srautas kiekis yra mažesnis, todėl ir įrenginių skaičius, naudojantis skirtingus kodekus skiriasi. Kovo mėnesį AMR-WB kodeku vidutiniškai naudojosi 32,23 % tinklo vartotojų, gegužės – 32,65 %. Augimą lemia nuolat tinkle didėjantis mobiliųjų įrenginių, palaikančių pastarąjį kodeką, skaičius. Įrenginių sąrašą, kuris reguliariai atnaujinamas, galima rasti GSA tinklapyje [10]. Galima pastebėti, kad beveik visi nauji UMTS technologiją turintys įrenginiai gali veikti su AMR-WB kodeku.

Naudojama technologija

AMR-WB naudoja algebrinio kodo − žadinamo linijine prognoze technologiją (angl. *Algebraic Code-Excited Linear Prediction − ACELP*). Ši technologija remiasi tuo, jog paskirstyti (išsklaidyti) pagal tam tikrą seką impulsai bei periodinio signalo komponentė sužadina linijinės prognozės (angl. *Linear Predictive Coding − LPC*) sintezės filtrą. LPC sintezės filtras nuosekliai generuoja išeities balso signalą. Be to, kad AMR-WB taip pat užtikrina DTX, šis kodekas turi devynias kodavimo spartas, kurios pateiktos 1 lentelėje. Pirmos trys kodavimo spartos (6,60; 8,85; 12,65) yra pagrindinės ir dažniausiai naudojamos. Dvi papildomos 15,85 ir 23,85 spartų konfigūracijos buvo sukurtos naudojimui su specialiomis aplikacijomis, tokiomis kaip daugelio vartotojų konferenciniai skambučiai. Pastarosios kodavimo spartos naudojamos labai retai, kadangi

jų kodavimo sparta didesnė nei standartinė 12,65 kbps, o realiai patiriama kokybė iš esmės nesiskiria [6].

Duomenis apie mobiliųjų tinklų HD naujienas nuolat pateikia GSA organizacija (angl. *Global mobile Suppliers Association*) [10]. Jų pateiktais 2016 m. gegužės mėnesio duomenimis HD kokybės balso paslaugas teikia 164 mobilieji operatoriai 88 šalyse. Kaip keičiasi HD paslaugas tiekiančių operatorių kiekis pastaraisiais metais, pateikta 6 pav. Iš minėtų 164 operatorių, 128 HD balso paslaugas teikia 3G/HSPA tinkluose bei 17 operatorių 2G/GSM tinkluose. Tik 40 operatorių oficialiai teikia VoLTE paslaugas. Leidinio pateiktais duomenimis, HD balso paslaugomis gali naudoti apie 300 milijonų vartotojų.



6 pav. Operatorių, turinčių įdiegtą HD balso paslaugą, skaičius [10]

GSA pateiktais duomenimis HD balso paslaugą Lietuvoje teikia *UAB Bitė Lietuva* ir *UAB Tele2* mobiliojo ryšio operatoriai. *Omnitel* oficialiai HD balso paslaugos tiekimo deklaravusi nėra. Matavimų laikotarpiu nė vienas iš operatorių HD balso paslaugos neturėjo įdiegęs GSM tinkle.

3.3. AMR-NB ir AMR-WB kodekų apibendrinimas

Galima teigti, jog AMR-WB kodekas yra pranašesnis už AMR-NB. Vienas iš esminių AMR-WB privalumų – balsas koduojamas ne įprastoje 300−3400 Hz, o 50−7000 Hz dažnių juostoje. Platesnė dažnių juosta užtikrina raiškesnį garsą, todėl dažnai šiuo kodeku koduojamas balsas vadinamas – HD balsu. Taip pat, AMR-WB kodeko naudojami balso kodavimo algoritmai daug geriau eliminuoja pašalinius triukšmus. Kodeko naudą įžvelgia ir operatoriai, todėl minėto kodeko paplitimas tarp mobiliųjų operatorių kasmet didėja. Pagrindinis veiksnys, ribojantis dar didesnį kodeko paplitimą – mobilieji įrenginiai. AMR-WB kodeką palaiko tik naujesnio tipo mobilieji įrenginiai. Šių kodekų įgyvendinimui reikalinga, jog tinkle būtų aktyvuoti TFO arba TrFO protokolai. Šie protokolai detaliai analizuojami ketvirtame šio darbo skyriuje.

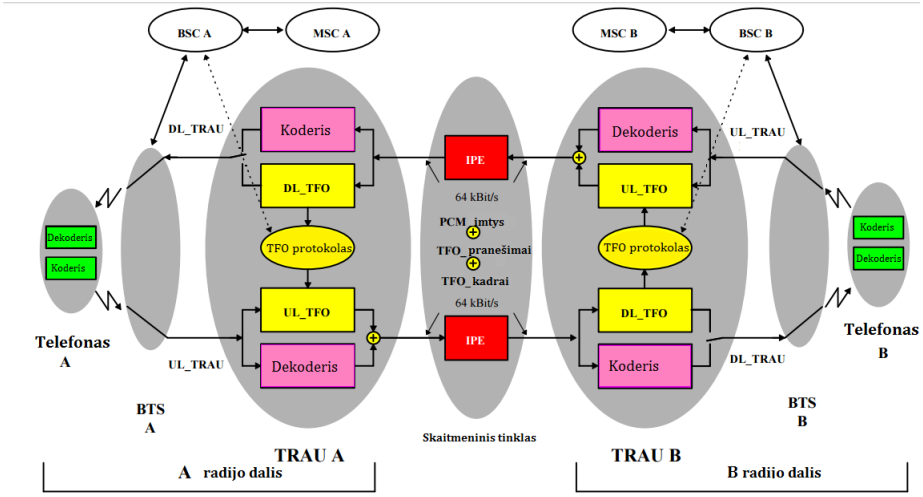
4. BALSO KODEKŲ ĮGYVENDINIMAS 2G/3G MOBILIUOSE TINKLUOSE

Mobiliuose tinkluose balso signalai įprastai koduojami keliuose etapuose. Kaip žinoma, balso kodavimas tinkle būtinas norint perduoti balsą korinio tinklo standartizuotu G.711 PCM kodeku. Tam reikalingos 64 kbps spartos grandinių komutavimo technologija paremtos linijos. Taip pat G.711 standarto kodekas reikalingas norint įgyvendinti sujungimą tarp laidinio ir mobilaus tinklų. Toks kodavimas turi privalumų, kadangi apsaugo balso duomenis nuo triukšmo ir aido atsiradimo perdavimo kelyje.

Vėlesnėse tinklo versijose atskyrus paslaugos nešlį nuo signalizacinės informacijos (angl. *Bearer Independent Core Network*), atsirado galimybė balso paslaugas perduoti ATM ar IP technologijomis paremtomis linijomis ir vis mažiau naudoti standartines TDM linijas. Tai leido tinkluose įdiegti naujus nepriklausomus kodekus kaip AMR-WB, vietoje egzistuojančių G.711 (PCM). Nesant būtinybės perkoduoti balso į PCM kodeką, nebereikia naudoti perkodavimo įrenginių tinklo pusėje. Tai suteikia galimybę sumažinti vėlinimą ir pagerina balso kokybę, kadangi perkodavimas šiems procesams turėjo pastebimą įtaką. Atsiradusi galimybė pašalinti perkodavimo įrenginius, suteikė daug didesnę laisvę varijuoti balso kodekais tinkle. Technologija, kai tinkle nenaudojami perkodavimo įrenginiai vadinama – TrFO (angl. *Transcoder Free Operations*). Kai norima nenaudoti PCM kodeko, tačiau tinkle perkodavimas privalomas užmezgant skambutį (daug standartinių GSM tinklų reikalinga procedūra), naudojama TFO technologija (angl. *Tandem Free Operations*) [7,8]. Plačiau šios technologijas apibūdinamos 4.1. ir 4.2. šio darbo poskyriuose.

4.1. TFO veikimas

TFO protokolas naudojamas tik tais atvejais, kai tinkle neįmanoma įgyvendinti TrFO protokolo. Toliau pateiktoje 7 pav. schemoje vaizduojamas TFO protokolo veikimas.



7 pav. TFO protokolo veikimą vaizduojanti principinė schema [8]

TFO protokolas taikomas tiek GSM, tiek UMTS technologijų tinkluose. Tradiciniuose PLMN tinkluose, kur GSM struktūra paremta TRAU ir BSC, o UMTS tinkle − MGW ir MSC, įranga

veikdama koduoja ir dekoduoja tandemu. Balso signalas yra koduojamas mobiliajame įrenginyje A, dekoduojamas TRAU A, perduodamas skaitmenine ar analogine linija iki TRAU B bei ten vėl užkoduojamas ir gale pasiekęs mobilų įrenginį B vėl dekoduojamas. Tai sąlygoja balso kokybės suprastėjimą. Kokybės suprastėjimas dar labiau pasireiškia, jeigu balso signalai yra žemų dažnių.

TFO veikimas pagrįstas vidinės signalizacijos sistema (angl. *inband signalling*). TFO leidžia išvengti dubliuoto balso kodavimo perduodant mobiliu tinklu. Paprasčiausiu TFO algoritmu veikimo atveju kodavimas atliekamas tik galiniuose įrenginiuose. Šis protokolas sukuria virtualų kanalą tarp dviejų mobiliųjų įrenginių ir perduoda koduotą balsą tiesiogiai be tarpinių tinklų koderių/dekoderių. Šiame protokole TRAU išlieka reikalingi, kadangi TFO veikimas gali būti inicijuotas tik po skambučio užmezgimo standartine procedūra. Taip pat, TRAU gali prireikti, jei dėl tam tikrų priežasčių reikėtų grįžti prie standartinės balso kodavimo procedūros.

Schemoje, pateiktoje 7 pav., elementai pažymėti geltona spalva yra reikalingi TFO protokolo įgyvendinimui. Skambučio užmezgimo metu MSC nieko nežino apie TFO protokolą. Labai ribotą informaciją turi BSC. Kaip jau minėta anksčiau, skambučio užmezgimas vyksta standartiniu būdu naudojant *tandem* metodą bei TRAU įrenginius, todėl balsas iš viso koduojamas ir dekoduojamas dviejose vietose bei perduodamas 64 kbps kanalais tarp TRAU. Kiekvienas TRAU žino apie savo galimybes: sistemos identifikaciją, kodeko tipą bei kodeko atributus ir jei palaikoma BSC, žino apie kodekų sąrašą su alternatyviais kodekų tipais ir atributais. Jei TFO protokolas aktyvuotas tinkle, TRAU bando inicijuoti TFO sujungimą per sudarytą TCH kanalą. Tokiu būdu yra siunčiama paslėpta signalizacinė informacija trafiko kanale bei laukiama patvirtinančio atsakymo. Jei randamas tinkamas TFO partneris (kitas TRAU) ir perdavimo linija tarp jų yra skaidri, jie įterpia balso parametrus į PCM signalo LSB (angl. *Least Significant Bits*). Pradėjus abejoms pusėms veikti TFO protokolu, pagerėja balso kokybė, o transporto kanalas, kuris yra 64 kbps, išlieka nepakitęs. Abi pusės nuolat stebi įeinanti srautą ir esant poreikiui gali nedelsiant persijungti be jokių trukdžių į standartinį veikimo režimą. Dažniausiai iširus TFO sujungimui, jo atstatyti to paties pokalbio metu galimybės nebėra [7, 8].

Verta paminėti, kad TFO galima įgyvendinti tik tuo atveju, jei abi pusės naudoja tą patį kodeko tipą su identiškais atributais. Abu TFO įrenginiai pirmiausiai apsikeičia jų pusėse veikiančiais kodeko tipais ir kodeko atributais. Jeigu jie sutampa, sudaromas sujungimas. Daugeliu atveju tai užtrunka ne ilgiau vienos sekundės po skambučio sesijos užmezgimo. TFO algoritmui svarbu, jog kanalas tarp abiejų įrenginių būtų skaidrus, todėl visi IPE (angl. *In-Path-Equipment*) kaip aido šalinimo įranga yra išjungiama siunčiant specialias komandas. Nesutampant kodekų tipams ar atributams, siunčiama papildoma informacija su alternatyvių kodekų sąrašu. Kiekviena sistema gali turėti skirtingai sureitinguotus kodekų sąrašus. Apsikeitus minėtu kodekų sąrašu, abi pusės pagal numatytas tinkle reitingavimo taisykles išsirenka iš sąrašo kodeką su didžiausiu prioritetu. TRAU informuoja juos

kontroliuojančius įrenginius apie pasikeitimus ir laukia momento, jei jiems reikėtų atlikti modifikacijas iš TFO į PCM taikomą kodavimą.

Kodekų pasirinkimo procedūros GSM ir UMTS tinkluose skiriasi. GSM tinklo atveju korinis tinklas nusprendžia kodeko tipą aukštynkryptėje ir žemynkryptėje pusėse. Mobilusis įrenginys ir TRAU turi paklusti tinklo komandoms, kurią mobilusis įrenginys ir TRAU gauna iš BTS. Kitaip vyksta kodeko parinkimas UMTS tinkle. RNC nurodo didžiausią įmanomą kodeko tipą TC žemynkryptėje pusėje, o mobiliajam įrenginiui aukštynkryptėje pusėje. Įprastai mobilusis įrenginys naudoja nurodytą kodeką, tačiau esant tokioms sąlygoms kai maksimali mobiliojo įrenginio išspinduliuojama galia siekia maksimalią ribą, jis gali pasirinkti žemesnės kodavimo spartos kodeką. Taip pat skiriasi GSM ir UMTS tinklų kodekų spartos keitimo intervalai. GSM tinklo atveju kodeko sparta gali būti keičiama kas 40 ms (du balso kadrai). TDMA struktūra, kuri priklauso nuo bazinės stoties, nusprendžia, kuriais kadrais (lyginiais ar nelyginiais) pakeitimai gali būti atliekami. Abu įrenginiai turi sinchronizuotis ir pakeitimus atlikti būtent tais laikotarpiais. UMTS tinkle pakeitimai gali būti atliekami kas 20 ms. TFO veikimas tarp UMTS ir GSM bus su kadrų praradimu iš UMTS pusės į GSM, jei UMTS nesusinchronizuos ir nepradės veikti 40 ms režimu. Paskutinis pagrindinis skirtumas tarp GSM ir UMTS TFO veikimo yra tai, jog GSM gali keisti savo kodeko tipą į kaimyninį, t.y. esantį sąraše šalia esamu metu naudojamo kodeko. Perjungimas į mažesnę kodavimo spartą ypač GSM HR AMR atveju gali leisti sumažinti kadrų klaidų santykį. UMTS tokio apribojimo neturi, tačiau rekomenduojama taikyti vienodas taisykles tiek GSM, tiek UMTS tinkluose.

Priklausomai nuo tinklo įrangos ir jos konfigūracijos, GSM atveju vieno pokalbio metu visi 8 AMR kodekai nėra palaikomi. Dažniausiai palaikomi 4 kodekai. Kurie keturi kodekai yra ACS (angl. *Active Codec Set*) priklauso nuo tinklo įrangos bei šalyje priimtinų rekomenduotinų taisyklių. Pavyzdžiui ACS Europoje gali būti visai kitokie nei JAV ar Azijoje. TFO užmezgimo pradžioje įrenginiai turi nurodyti, kuriuos ACS jie esamu metu naudoja. TFO gali būti sudarytas tik tuo atveju, jei ACS abiejuose pusėse yra suderinti. Įprasta, jog skambučio užmezgimo stadijoje ACS yra suderinami abiejose pusėse ir tik po to inicializuojamas TFO. ACS pasikeitimas turi būti žinomas visiems tinklo įrenginiams kaip mobilusis įrenginys, TRAU, RNC ir TC.

Taip pat viena iš priežasčių, kodėl ACS nėra naudojami visi 8 kodekai − ne pilnas jų įgyvendinimas tinkle arba resursų trūkumas. Kaip jau minėta, suderinti pokalbio sesijos pradžioje ACS yra rekomenduotina. Jei ACS kis dažnai pokalbio metu, gali būti, jog pokalbio kokybė ženkliai suprastės. Tokie atvejai įmanomi, jei po perjungimo (angl. *handover*) resursų kiekis bazinėje stotyje ženkliai mažesnis ar didesnis nei prieš tai buvusioje bazinėje stotyje. Todėl rekomenduotina išjungti galimybę keisti ACS pokalbio sesijos metu. Taip pat verta paminėti, jei įvyko pasikeitimas ACS vienoje pusėje dėl tam tikrų sąlygų, kitoje pusėje nepriklausomai nuo to ar ten sąlygos pakito, ACS

taip pat privalo pasikeisti. Tai ypač galioja tais atvejais, kai įvyksta persijungimas tarp skirtingų technologijų kaip GSM ir UMTS. Todėl tinklai turi būti kruopščiai suderinti tarpusavyje.

Optimali ir rekomenduotina tinklo konfigūracija yra tokia, kur visi tinklo elementai palaiko pilną kodekų tipų setą ir vadovaujasi identiškomis procedūromis. TFO protokolo veikimo metu ir esant AMR kodekui yra apsikeičiama toliau pateikta informacija:

- sistemos identifikacija (SysID: GSM, UMTS);
- kodeko tipas (CoID: GSM_FR_AMR, GSM_HR_AMR, ...);
- aktyvių kodekų setu (ACS: nuo 1 iki 8 kodekų tipų);
- AMR TFO versija;
- palaikomų kodekų setu ir maksimaliu skaičiumi kodekų sete (MACS);
- alternatyvių kodekų sąrašu.

Kai skambučio sesija sudaryta abiejose pusėse, TFO vidinė signalizacija rūpinasi šiais parametrais:

- kadrų ir fazės sinchronizacija (AMR atveju kodeko pasikeitimo fazė);
- TRAU inicijavimas;
- DTX valdymas;
- blogų kadrų valdymas;
- fazių lygiavimai;
- kodeko spartos kontrolė;
- įspėjimas apie handover;
- ACS sąrašo pasikeitimas.

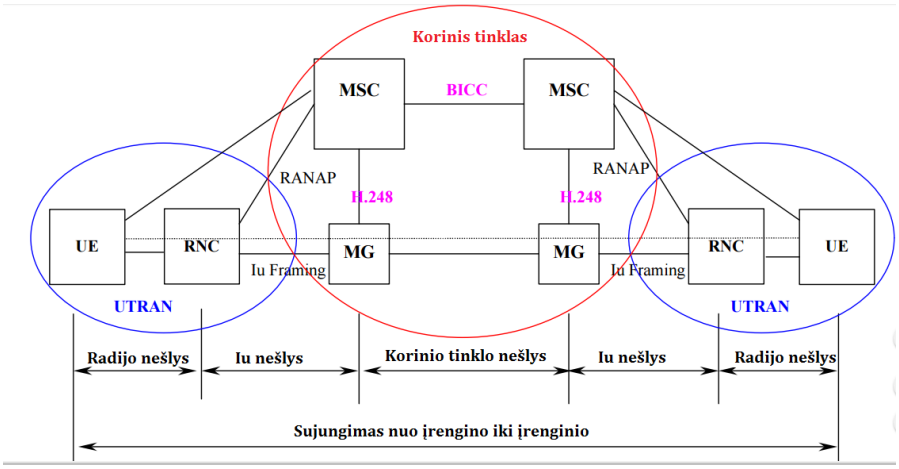
Įvykus perjungimui (angl. handover) TFO nesutrikdomas arba sutrikdomas labai minimaliai. Sutrikimų gali atsirasti, jei po perjungimo turi keistis kodeko tipas, pvz. jei po perjungimo nauja ląstelė nepalaiko prieš tai buvusio kodekų seto. Tokiu atveju vyksta greitas perjungimas prie standartinio PCM kodeko. Ericsson tinklo įranga yra konfigūruojama remiantis principu, kad TFO leidžiamas tik tada, jei GSM/UMTS tinklai yra pilnai adaptuoti vienas kitos atžvilgiu. Idealiu atveju laikoma tokia situacija, jei visi tinklo elementai (mobilusis įrenginys, BTS, TRAU) palaiko pilną AMR setą. Tokiu atveju TFO valdymas daug paprastesnis ir gaunama kokybė optimali.

4.2. TrFO veikimas

TrFO yra standartinis metodas naudojamas pokalbio sujungimui UMTS tinkle, nenaudojant perkodavimo įrenginių. Jis specifikuotas 3GPP TS 23.153. Šis protokolas leidžia užmegzti standartinį grandinių komutavimo technologija paremtą skambutį nenaudojant perkodavimo įrenginių tinkle. Perkodavimo įrenginiai tokie kaip TRAU ar TC šiame protokole visai nereikalingi, tačiau gali būti aktyvuoti esant tam tikroms sąlygoms. Perduodant tik koduotą balsą ir nenaudojant perkodavimo įrenginių galima efektyviau išnaudoti esamą juostos plotį vartotojo lygmenyje (paslaugų nešliuose) ir sumažinti vėlinimus, atsirandančius dėl dubliuoto kodavimo. Visai tai lemia, jog galima pasiekti daug aukštesnę pokalbių kokybę.

TrFO turi tokius pat tikslus kaip ir TFO, tačiau veikia aukštesnio lygio protokolo pagrindu. Jo veikimo principas paremtas išorine signalizacijos sistema (angl. *out-of-band signalling*). Pagrindinis skirtumas tarp TFO ir TrFO yra tai, jog visas transportinio tinklo lygmuo yra atsakingas, kad koduoti balso duomenys būtų perduoti. Įprastai MGW (angl. *Media Gateway*) yra atsakingas, jog tinkama kodavimo schema būtų parinkta. TrFO savo išorinę signalizacijos sistemą naudoja, jog galėtų nustatyti tinkamus kodekus abiejose mobilių įrenginių pusėse. Jeigu abu galiniai įrenginiai turi galimybę dirbti su tais pačiais kodekais, tada yra galimybė per visą paketinį tinklą be jokių papildomų kitų įrenginių įsikišimo perduoti balsą minėtu kodeku. Didelis TrFO privalumas − koduotas srautas yra apsaugotas nuo netikėtų nutrūkimų. Perdavimus galima kontroliuoti daug saugiau ir efektyviau.

Principinė TrFO architektūros schema vaizduojanti dviejų mobilių įrenginių sujungimą, pateikta 8 pav.



8 pav. TrFO architektūros schema

Reikalavimai

Tinklas su veikiančiu TrFO turi keletą išskirtinių reikalavimų, jog galėtų tinkamai funkcionuoti. TrFO tinkle gali būti aktyvuotas tik tokiais atvejais, jei abu galiniai įrenginiai turi galimybę komunikuoti tuo pačiu kodeku ir jo atributais bei yra palaikomos Iu ir Nb sąsajos. Be to, TrFO veikia WCDMA tipo tinkluose su ATM ir IP technologijomis bei GSM tinkle, kada naudojama AoIP (BSC ir MSC sujungimui naudojama sąsaja). Vykstant mobilaus ir PSTN tinklų sujungimams reikalingas vienas perkodavimo įrenginys ties BICN ir PSTN riba. Tokiu atveju protokolas vadinamas RTO (angl. *Remote Transcoder Operation*). TrFO naudojami:

- UMTS_AMR2 (Setas 7) – vienos rūšies kodekas su 12.2 Kbps sparta;
- UMTS_AMR2 (Setas 1) – apima 12.2, 7.4, 5.9 ir 4.75 Kbps rūšies kodekų spartas;
- GSM FR;
- GSM HR;
- EFR;
- FR AMR (setas 1);
- HR AMR (setas 1);
- FR_AMR-WB (setas 0);

- UMTS_AMR-WB (setas 0).

Reikia pastebėti, kad TrFO gali būti išjungtas ir grąžintas to paties pokalbio metu. Dėl tam tikrų aplinkybių įvykus pasikeitimui skambučio metu, pavyzdžiui, dingus tam tikros rūšies kodavimo tipui tinkle dėl įvykusio *handover*, TrFO nebegali būti palaikomas, todėl įvyksta perjungimas prie TFO ar standartinio PCM režimo. Vėliau, atsiradus galimybei sudaryti TrFO sujungimą, pokalbis gali būti toliau tęsiamas TrFO protokolu. Tokia galimybė įgyvendinama MGW pusėje įterpiant TrFO BREAK funkciją.

TrFO yra algoritmas nuo pradžios iki galo valdomas ir įgyvendinamas remiantis BICN (angl. *Bearer Independent Core Network*). Galiniai vartotojų įrenginiai nėra atsakingi už skambučių, paslaugų nešlių užmezgimą, suderinimą koriniame tinkle kaip ir už registraciją, autorizaciją, aktyvavimą iš vartotojų pusės.

Skambučio užmezgimas veikiant TrFO

Skambučio sesijos inicijavimas TrFO atveju prasideda skambinančiojo mobiliojo įrenginio kvietimu. Įrenginys siunčia IAM (angl. *Initial Address Message*) pranešimus į aptarnaujančią MSC. Minėta MSC siunčia kodekų sąrašą naudojant BICC (angl. *Bearer Independent Call Control*) signalizacinį protokolą į kitą MSC, kuri valdo mobilų įrenginį, kuriam yra skambinama. Visi tinklo MGW linijoje tarp mobiliųjų įrenginių, turi turėti galimybę patikrinti kodekų sąrašą ir galimybę jį modifikuoti išmetant nepalaikomus kodekus. Iš anksčiau žinoma, jog pačiu blogiausiu atveju tinklas privalo palaikyti G.711 kodekus, jei AMR/AMR-WB kodekai nėra palaikomi. Atsakančioji MSC patikrina skambutį priimančio mobiliojo įrenginio palaikomus kodekus ir galutinai parenka prioritetinį kodeką ir siunčia jį kartu su kitais įrenginio palaikomais kodekais IAM pranešimu atgal. Kiekvienas MSC gali nuspręsti, kokį kodekų sąrašą ir jų prioritetus naudoti. Jeigu kodekų tipai nepriklauso G.711 standartui, tada TrFO gali būti aktyvuojamas ir tokiu būdu virtualus kanalas sudaromas nuo vieno mobilaus įrenginio iki kito.

Tai yra kitoks sujungimas lyginant su TFO, kur abi pusės turi vienodas teises ir sprendimą. Vienas esminis skirtumas taip pat yra tai, jog kodekų prioritetų tipai viduje kartu su kodekų sąrašu naudojant BICC gali būti nustatomi atsitiktinai skambinančiosios pusės, tačiau atsakančioji pusė gali pasirinkti kitus prioritetus. Prioritetai TFO atveju yra nusprendžiami standarto ir negali būti keičiami dinamiškai. Įgyvendinant sujungimą tarp TFO ir TrFO protokolų tai reikia turėti omeny, kadangi parinkus netinkamus kodekų tipus galima pabloginti pokalbio kokybę ar visiškai nutraukti skambutį. Tai leidžia turėti geriausią įmanomą pokalbio kokybę ir mažiausius įmanomus transportavimo kaštus.

Mobilieji įrenginiai ir MG yra informuojami apie pasirinktą kodeko tipą ir jo atributus. Kaip matyti iš 7 pav., H.248 protokolas yra naudojamas MG kontrolei ir tuo pat metu kodeko tipui ir atributams perduoti. RNC šiuo atveju nėra svarbus naudojamas kodeko tipas, kadangi UTRAN yra sukonfigūruotas perduoti tam tikrą paslaugos nešlį, tačiau jis nežino tikslios bitų perdavimo spartos,

kurį perneša. MG užtikrina nepertraukiamą liniją tarp RNC mazgų. Nepriklausomai nuo to ar transporto nešliai ir kiti susiję protokolai viso kelio metu yra vienodi ar skiriasi, tačiau jei jie sugeba perduoti tą pačią loginę informaciją, jie nelemia paslaugos kokybės. Galima teigti, kad RNC daugiausiai komunikuoja tarpusavy tiesiogiai. Svarbu paminėti, kad korinis tinklas privalo užtikrinti minėtą tiesioginį loginį kanalą tinkamam Iu UP funkcionavimui.

4.3. TrFO ir TFO veikimas kartu

Pradiniame skambučio užmezgimo etape tinklas nežino TFO ar TrFO bus naudojamas sujungimui. Dėl to pagal nutylėjimą perkodavimo įrenginiai yra priskiriami. Jeigu pavyksta išorinės signalizacijos metodu (angl. *out of band*) įgyvendinti TrFO keliamus reikalavimus, tada perkodavimo įrenginiai yra išjungiami ir naudojamas TrFO algoritmas. Jeigu *OoBTC* negali įgyvendinti TrFO reikalavimų, tada perkodavimo įrenginiai naudoja keletą bitų iš PCM srauto ir įtraukia į juos informaciją apie TFO. Nutolę perkodavimo įrenginiai gali įgalinti TFO veikimą ir pradėti sinchronizaciją tarp IPE įrenginių. Kaip matyti, sprendimas, koks algoritmas bus naudojamas daugeliu atveju priklauso nuo tinklo konfigūracijos ir naudojamų mobiliųjų įrenginių. Daugelyje tinklų veikia abu algoritmai, todėl įranga gali tinkamai prisitaikyti prie labiausiai tinkančio varianto. Pagal nutylėjimą užmezgant skambutį UMTS tinkle yra pasirenkamas UMTS AMR kodekas su visomis spartomis. Jei įmanoma pasirenkamas geriausios kokybės kodekas, t.y. su 12,2 kbps sparta. Jei tinkle palaikomas AMR-WB kodekas, tada pagal nutylėjimą bandoma inicijuoti jį. Analogiškai ir su GSM tipo tinklais. Bandoma inicijuoti AMR-WB, jei nepavyksta ar nėra sukonfigūruotas minėtas kodekas, tada bandoma GSM FR AMR ir sudaryto prioriteto mažėjimo tvarka sekantys kodekai.

Egzistuoja daug skirtingų būdų kaip vyksta TFO ir TrFO sujungimai tarp to paties tinklo ir skirtingų technologijų tinklų. Ši informacija nėra itin aktuali šiame darbe, todėl plačiau šie scenarijai nedetalizuojami.

4.4. TrFO ir TFO protokolų apibendrinimas

Norint tinkle aktyvuoti AMR-WB šeimos kodekus, reikalinga, jog koriniame tinkle būtų aktyvuoti TFO arba TrFO protokolai. Šie protokolai eliminuoja transkoderių veikimą, todėl tinkle išvengiama papildomo balso kodavimo. TrFO yra naujesnis ir pažangesnis protokolas. Šis protokolas veikia skambučio inicijavimo metu naudodamas išorinę signalizaciją. TrFO veikimui visiškai nereikalingi transkoderiai, priešingai nei TFO. Pastarasis protokolas naudoja vidinę signalizaciją ir gali būti inicijuojamas tik po skambučio sudarymo. Sėkmingai inicijavus TFO protokolą, kodeko duomenys perduodami skaidriu 64 kbps PCM kanalu per transkoderius. Galima teigti, kad naudojant TrFO protokolą pasiekiamas daug didesnis tinklo efektyvumas, nes tinklas išskiria tokį srautą, koks reikalingas perduoti duomenys atitinkamu kodeku, o ne rezervuotu 64 kbps PCM kanalu.

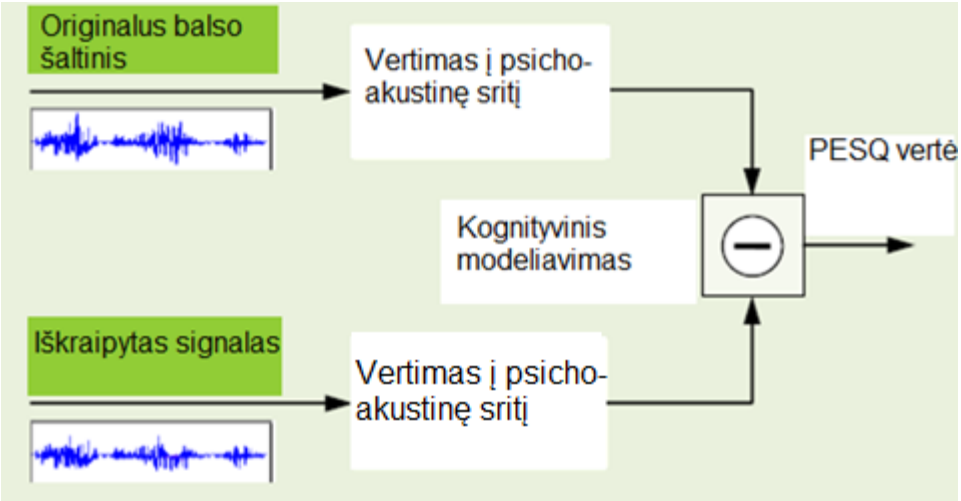
5. PESQ IR POLQA BALSO KOKYBĖS VERTINIMO ALGORRITMŲ PALYGINIMAS

Šiuo metu labiausiai paplitę balso kokybės vertinimo algoritmai − PESQ ir POLQA. Šiame skyriuje apžvelgiami šių algoritmų veikimo principai, privalumai ir trūkumai bei taikymų apribojimai.

5.1. PESQ algoritmas

PESQ (angl. *Perceptual Evaluation of Speech Quality*) – objektyvus metodas apskaičiuoti subjektyviai patiriamą balso kokybę mobiliuose tinkluose. PESQ taip pat galima apibūdinti kaip metodą, kuris leidžia įvertinti, kaip mobiliojo tinklo vartotojas suvokia girdimą balso kokybę mobiliajame tinkle. Šio algoritmo specifikacija pateikiama ITU P.862 standarte [11].

Pagrindinis PESQ algoritmo tikslas yra imituoti žmogaus garso suvokimą. Jis vertina iškraipytą signalą, kuris buvo koduotas ir perduotas mobiliuoju tinklu su originaliu, neiškraipytu signalu. Principinė PESQ algoritmo schema pateikta 9 pav.



9 pav. PESQ veikimą vaizduojanti schema [9]

Šiame algoritme originalus ir iškraipytas balsas yra vaizduojamas psichofiziniu pavidalu, t.y. kaip žmonės suvokia balsą. Iškraipyto balso kokybė yra vertinama remiantis tuo, kaip pasikeitė pagrindinės psichofizinės savybės. PESQ algoritmas balso kokybę vertina reikšmėmis nuo 1 iki 4,5. Įvertis su skaičiumi 4,5 reiškia, jog balso kokybė yra ideali – nėra jokių iškraipymų. Kokybė įvertinta 1 reiškia, kad signalas yra ypatingai iškraipytas ir jo kokybė labai prasta.

PESQ algoritmą galima išskaidyti į dvi dalis:

- balso konvertavimas į psichoakustinę sritį;
- kognityvinį modeliavimą.

Kartu su PESQ sukūrimu buvo atlikti itin svarbūs patobulinimai lyginant su ankstesniais algoritmais, tokiais kaip PSQM. Pagrindinis patobulinimas PESQ algoritme buvo atsiradusi laiko

lygiavimo galimybė, kuri leido išvengti vėlinimo sukeliamų padarinių, kurie atsirasdavo dėl handover ar VoIP technologijos. Taip pat atsirado galimybė eliminuoti filtravimo efektus. Be to, buvo patobulintas ir kognityvinio modeliavimo algoritmas.

Kaip jau minėta anksčiau, PESQ algoritmas reikšmes pateikia MOS-LQO skalėje. Vertinant subjektyvią kodekų balso kokybę dažniau naudojama MOS skalė. MOS skalė yra standartizuota P.800 rekomendacijoje. Atliekant MOS testą klausytojas vertina kiekvieną balso atkarpą (įprastai nuo 5 iki 8 s trukmės) priskirdamas atkarpai vieną iš 5 reikšmių, kurios pateiktos 2 lentelėje.

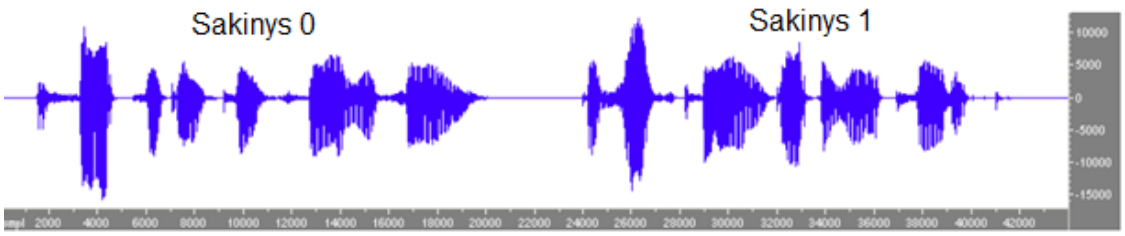
2 lentelė. MOS įverčiai

MOS	Reikšmė
5	Puikiai
4	Gerai
3	Patenkinamai
2	Prastai
1	Blogai

Ši vertinimo skalė yra pateikta tiek skaitine, tiek žodine išraiška, tam jog vertinančiam vartotojui būtų paprasčiau apsispręsti. Laisvas MOS skalės apibrėžimas daro ją gana jautrią pasikeitimams klausymo metu. Klausytojų skiriama MOS vertė gali priklausyti nuo tokių veiksnių kaip šalutinio triukšmo, garsumo lygio, klausymo įrangos ir pan. Tai reiškia, kad MOS įverčiai skirtingų testų, tačiau tos pačios telefonų sistemos gali nežymiai skirtis. Pavyzdžiui du skirtingi MOS testai su tuo pačiu AMR kodeku greičiausiai nebus įvertinti vienodomis MOS reikšmėmis.

Kadangi MOS skalė yra priimtas telekomunikacijų industrijos standartas, pageidautina, kad matavimo įranga, tokia kaip *TEMS, Nemo, JDSU, Rohde & Schwarz* ir pan., pateiktų kokybės vertinimus skalėje, kuri būtų kaip įmanoma artimesnė MOS. Tai pasiekta verčiant rezultatus į minėtą MOS-LQO skalę, specifikuotą ITU P.862.1.

Balso šaltiniai, naudojami matavimams, yra parenkami pagal tam tikrus fonetinius kriterijus. *TEMS* ir *Anite* įrangoje naudojami 4 skirtingi balso šaltiniai, iš kurių du vyriški ir du moteriški balsai. Kiekvienas šaltinis susideda iš dviejų sakinių tarp kurių yra trumpas tylos periodas. Šaltinio trukmė siekia 5.5 s ir sudaro 44 000 diskretizacijos intervalus. Kiekvienas intervalas saugomas kaip 16 bitų reikšmė. Ši struktūra parinkta remiantis ITU P.830 standartu, kuris nurodo kaip atliekami MOS testai. Kaip atrodo vienas šaltinių, pateikta 10 pav.



10 pav. Šaltinio su dviem sakiniais ir tylos intervalu tarp jų pavyzdys [9]

Balso kodekai yra jautrūs kalbėtojo balso stiprumui ir spektre atsirandantiems pikams. Kodekai taip pat jautrūs kalbos turiniui. Pats svarbiausias veiksnys yra tylos kiekis šaltinyje. Tyla dažniausiai sąlygoja kodeko veikimą be jokių iškraipymų. Tai reiškia, kad kalbos kodekai skirtingai iškraipo skirtingus kalbos šaltinius. Tylos intervalai taip pat mažiau iškraipomi radijo trukdžių. Apibendrinant galima pasakyti, kad kuo daugiau tylos intervalų koduojamame šaltinyje, tuo didesne MOS reikšme jis gali būti įvertintas. Šie veiksniai lemia, kad su skirtingais šaltiniais tomis pačiomis sąlygomis galime gauti skirtingas PESQ algoritmo MOS reikšmes.

5.2. POLQA algoritmas

POLQA yra naujos kartos balso kokybės įvertinimo algoritmas. Šis algoritmas tinka laidiniams, mobiliems ar IP technologija paremtiems tinklams testuoti. POLQA buvo pasirinktas kaip naujas ITU-T balso kokybės testavimo standartas ir apibrėžtas kaip P.863 [12]. Šis testavimo algoritmas puikiai tinka HD balso kokybės testavimams 3G ir 4G/LTE tinkluose. POLQA kūrimo užuomazgos prasidėjo 2006 metais ir tęsėsi iki 2010 m. POLQA buvo kuriamas kaip tęsinys P.862 standartui, kitaip vadinamam PESQ. POLQA algoritmas yra bendras *OPTICOM*, *SwissQual* ir *TNO* kūrinys. Kiekviena testavimo įrangą kurianti įmonė privalo pirkti licenciją, jog galėtų naudotis šiuo algoritmu. Yra daug kitų įvairių standartų balso kokybei nustatyti, tačiau visuotinai pripažįstami ir kaip oficialūs duomenys gali būti pateikiami tik tie, kurie yra standartizuoti ITU-T. Standartizavimas užtikrina patikimą algoritmo veikimą įvairiomis sąlygomis.

Testuojant POLQA algoritmą buvo atliekama daug skirtingų testų su EVRC tipo kodekais. Tai leido susieti skirtingų technologijų skirtingus kodekus ir juos vertinti tuo pačiu algoritmu. Šiandien balso kokybė nebegali būti įvertinta vien naudojamo balso kodeko tipu ar prarastų kadrų kiekiu. Šiuo metu taikomi įvairūs metodai, kurie automatiškai kontroliuoja signalo lygį, pritaiko išmanius metodus, kurie geba užmaskuoti kalbos iškraipymus ir taip padidinti perduodamos balso kokybės suprantamumą kritinėse situacijose. Šie pažangūs balso kokybės gerinimo komponentai yra įdiegti tiek tinklo pusėje, tiek mobilių įrenginių ir esant nesklandžiam jų veikimui gali sąlygoti pablogėjusią balso kokybę. POLQA yra adaptuota veikti tokiomis sąlygomis, todėl testuojant šiuo metodu galima identifikuoti įvairias problemas.

Su POLQA atsiradimu buvo iš esmės peržiūrėti psichoakustiniai ir kognityviniai modeliai. Šie pakeitimai pirmą kartą ITU-T P.86X istorijoje suteikė galimybę ypatingai kokybiškam prognozės įgyvendinimui:

- EVRC tipo kodekuose;
- triukšmo mažinimo ir balso kokybės didinime;
- laiko iškraipymų, UCC ir VoIP;
- filtravime ir spektro formavime.

POLQA labai gerai tinka testuoti esamoms balso perdavimo technologijomis ir taip pat yra orientuota į ateities balso perdavimo technologijas.

PESQ taip pat apima didelį balso technologijų kiekį, įskaitant tokias kaip POTS (angl. *Plain Old Telephone Service*), VoIP ar 3G, tačiau POLQA yra dideliu žingsniu priekyje. POLQA sukurti patobulinimai leidžia palaikyti naują spektrą paslaugų, kurias buvo sudėtinga testuoti su PESQ. Tai galėtų būti tokie pavyzdžiai kaip *Skype* skambučiai, EVRC, AMR ir AAC kodekų lyginimas. Kaip ir prieš tai buvę ITU-T P.86X standartai, POLQA palygina žinomą balso signalą su iškraipytu balso signalu simuliuojant žmogaus klausą. POLQA nėra vien tik PESQ algoritmo pakeitimas nauju, tačiau suteikia didelius patobulinimus testuojant balso kokybę tarp galinių įrenginių.

Tradicinėse telefonijos sistemose naudojamas siaurajuostis (NB) kodavimas. Tokiais atvejais ideali kokybė laikoma tada, kai MOS-LQ reikšmė siekia apie 4,5 (5 balų skalėje). Papildomi įvairūs trukdžiai šį įvertį gali sumažinti dar iki 1 balo. Tipiniu atveju, kai naudojamas AMR-FR ar EFR kodekas labai gera kokybė laikoma, jei MOS-LQ reikšmė svyruoja apie 4.

3 lentelė. POLQA MOS įverčių palyginimas prie skirtingų veikimo skalių [13]

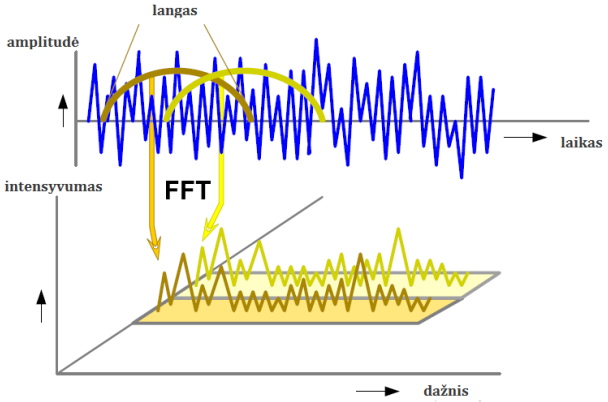
	MOS-LQ super-wideband 50-14000 Hz	MOS-LQ narrow-band 300-3400 Hz
50 – 14000 Hz or wider	4.8	-
50 – 7000 Hz ('old' wideband)	4.5	-
AMR-WB 12.65 kbps (50 – 7000 Hz)	4.0	-
300 – 3400 Hz ('POTS')	3.8	4.5
G.711 (A-Law standard PCM)	3.7	4.3
EFR / AMR-FR 12.2kbps	3.6	4.1
EVRC 9.5 kbps	3.4	3.9
EVRC-B 9.5 kbps	3.5	4.0
AMR-HR 7.95 kbps	3.4	3.8

Taikant plačiajuostį kodavimą skiriasi vertinimo skalė. Geriausia kokybe laikoma tada, kai naudojamas super plačios juostos kodekas (SWB). Naudojant tą pačią MOS skalę, kur didžiausias įmanomas įvertis − *5*, labai gera kokybė laikoma tokia, kai įvertis svyruoja apie 4,5. Tokiu atveju naudojant SWB skalę matuojamo NB kodeko kokybė net esant idealioms sąlygoms nesieks 4,5.

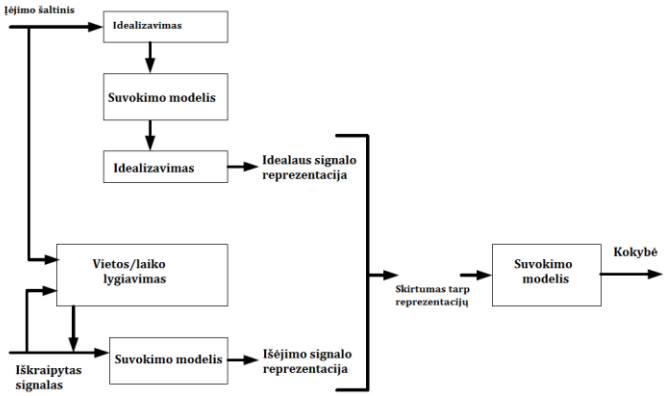
Todėl, jei žinoma, kad matuojamos sistemos palaiko tik NB kodekus, reikėtų naudoti pastarąją įverčių matavimo skalę, priešingu atveju SWB skalę. Matavimo skalė parenkama rankiniu būdu, o visi suderinimai, kad matavimai vyktų pagal pasirinktą skalę atliekami automatiškai POLQA algoritmo. NB ir SWB reikšmių palyginimas pateiktas 3 lentelėje. Taip pat verta paminėti, kad ITU-T atlikusi daug įvairių testų su POLQA algoritmų nustatė, kad POLQA veikia geriau nei P.862 tiek siaurajuosčiuose, tiek plačiajuosčiuose matavimuose.

Techninis POLQA įgyvendinimas

POLQA kaip ir ankstesni balso kokybės vertinimo metodai remiasi ITU-T P.800 standartu, kuris apibrėžia, kaip suprantama kokybė esant idealioms sąlygoms. POLQA algoritmas naudoja patobulintą psichoakustinį modelį, simuliuojantį žmogaus suvokimą ir garso pavertimą į vidinių neuronų reprezentaciją. POLQA, kaip pilnas šaltinio traktavimo metodas, palygina aukštos kokybės įvesties signalą su signalu, gautu perduodant tinklo traktu. Schema vaizduojantį šį procesą pateikta 12 pav.



11 pav. Signalo skaidymas į segmentus bei konvertavimas į spektrinę sritį [13]



12 pav. POLQA algoritmą vaizduojanti blokinė schema [13]

Nagrinėjamas algoritmas naudoja idealizuotą abiejų įėjimų signalų (originalaus ir iškraipyto) koncepciją daugelyje žingsnių. Tai leidžia užtikrinti, jog tik atitinkamai puikios kokybės balso signalo

informacija naudojama palyginimui ir bet kokios nepageidaujamos signalų komponentės yra nufiltruojamos.

Taip pat vienas svarbus POLQA komponentas – suvokimo modelis, kuriame atsižvelgiama į žmogaus paslėptus klausos efektus. Signalas šiuo atveju yra padalinamas į trumpus segmentus ir transformuojamas į spektrų sritį naudojant FFT kaip pavaizduota 11 pav. Vėliau vyksta psichoakustinių procesų apdorojimas pagal tam tikrus psichoakustinius modelius. Be to, atliekama transformacija į Barko skalę (kritines juostas) bei intensyvių iškraipymų keitimas į suvokimu pagrįstą *Sone* skalę. POLQA remiasi metodu, kuris aptinka pavienius ortogonalius iškraipymus suvokimo modelyje ir juos vėliau panaudoja kognityviniame modelyje.

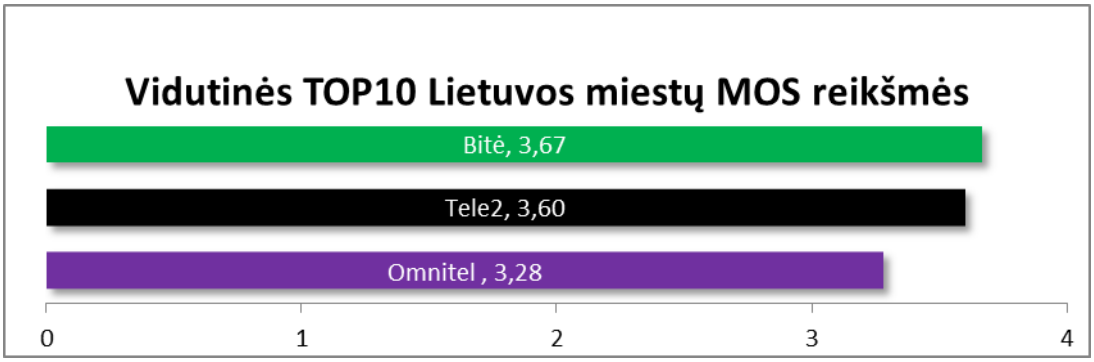
Rodikliai, kurie nurodo specifinius iškraipymus kaip triukšmas, spektro iškraipymai ar aido atsiradimas yra aptinkami ir įvertinami specializuotų suvokimo algoritmų, pradinėje algoritmo fazėje. Bendras iškraipymų rodiklis taip pat yra gaunamas pritaikius pažangius klausos ir maskavimo modelius balso signalo turiniui. Po pirmo idealizavimo proceso, kuris sugretina originalų ir perduotą tinklu signalus lygio ir spektro formos atžvilgiu, atliekamas psichoakustinis modeliavimas. Antru etapu idealizavimas susideda iš tinkamų signalų proporcijų parinkimo (angl. *scaling*) ir triukšmo šalinimo. Tai garantuoja, jog tik balso signalai bus lyginami tarpusavyje, neįtraukiant triukšmų ar kitų pašalinių veiksnių. Suprastėjimas dėl triukšmų atsiradimo taip yra apgalvotas ir įgyvendintas atskiriant triukšmų sukeliamus efektus nuo bendrų trukdžių rodiklio. Visi surinkti rodiklių duomenys yra galiausiai naudojami kognityviniame modelyje. Tuo metu, kai suvokimo modelis nusprendžia, kurie iškraipymai gali būti jaučiami klausytojo, kognityvinis modelis nusprendžia kiek stipriai jie gali paveikti klausytojo pojūčius. Kognityvinio modelio apskaičiuota reikšmė nusprendžia galutinį kokybės įvertį.

5.3. PESQ ir POLQA algoritmų apibendrinimas

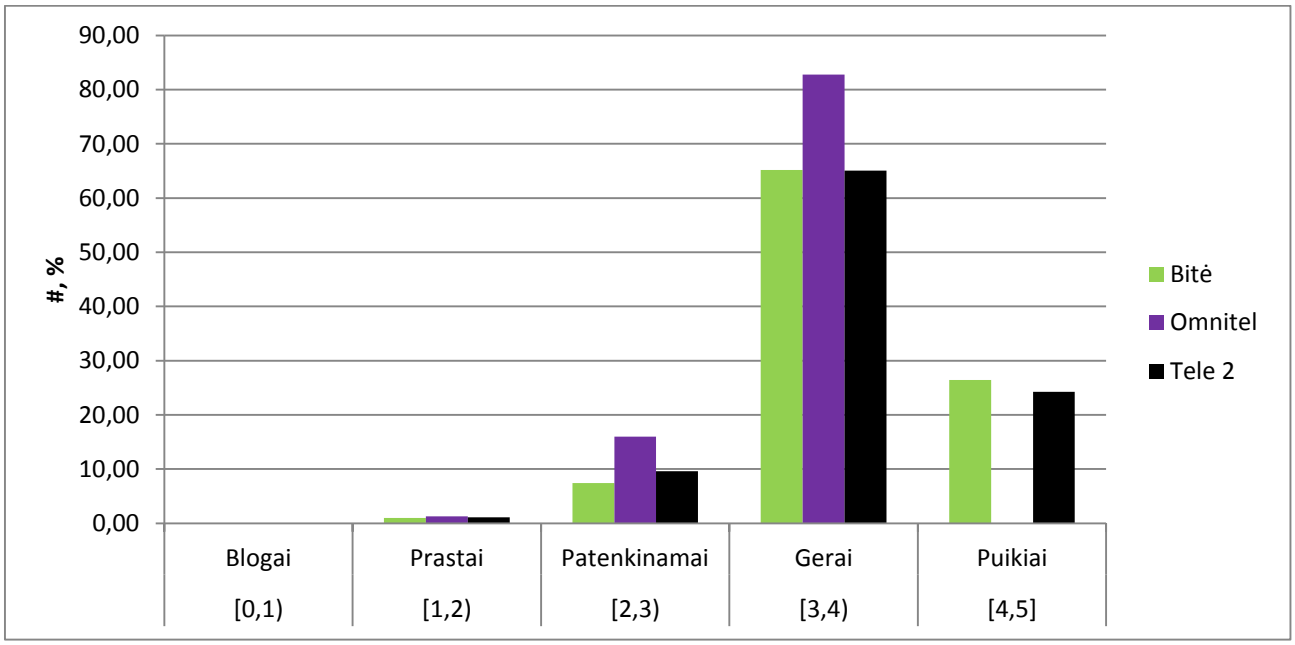
Atlikus PESQ ir POLQA algoritmų palyginamąją analizę galima teigti, jog POLQA algoritmas šiuo metu yra geriausias balso kokybės vertinimo metodas. Pagrindiniai šio metodo privalumai – plačiajuosčių kodekų vertinimo galimybė bei skirtingų kodekų tarpusavio vertinimas. Verta paminėti, jog POLQA kaip ir PESQ balsui įvertinti remiasi ITU-T P.800 rekomendacija. POLQA yra naujesnis bei PESQ pagrindu sukurtas algoritmas, kuriame buvo patobulinti psichoakustiniai ir kognityviniai modeliai. Taip pat, naudojant šį metodą galima pasirinkti skirtingas balso vertinimo skales – siaurajuostę (NB) ir plačiajuostę (SWB). SWB skalė apima visus šiuo metu palaikomus kodekus, todėl puikiai tinka įvertinti skirtingų operatorių tinklus, nepriklausomai nuo jų naudojamų kodekų. SWB vertinimo skalė pasirinkta atliekant tyrimą visų operatorių tinkluose. Tyrimų metu gauti rezultatai pateikti šeštame skyriuje.

6. TYRIMŲ METU GAUTI REZULTATAI

Toliau pateiktuose 13 pav. ir 14 pav. vaizduojami bendri visų matavimų metu gauti MOS rezultatai.



13 pav. Vidutiniai visų operatorių MOS įverčiai gauti visų matavimų metu



14 pav. MOS įverčių pasiskirstymas skirtingų operatorių tinkluose

Iš pateiktų grafikų matyti, jog didžiausias vidutinis MOS įvertis dešimtyje didžiausių Lietuvos miestų *Bitės* tinkle. Išmatuota vidutinė MOS vertė siekia 3,67 balo. Labai nedaug skiriasi *Tele2* rezultatai. Šiame tinkle išmatuota MOS vertė 0,07 mažesnė ir siekė 3,6 balo. *Omnitel* tinkle išmatuota vidutinė MOS vertė siekė 3,28 balo. Gautų MOS rezultatų skirtumą puikiai atspindi 14 pav. grafikas. Grafike matyti, kad *Omnitel* tinkle išmatuotų MOS įverčių iš intervalo [4,5] nėra, o *Tele2* ir *Bitė* imčių minėtame intervale vidutiniškai yra atitinkamai 24,2 % ir 26,42 %.

6.1. Balso kokybės vertinimas Lietuvos miestuose

Toliau apžvelgiami gauti rezultatai penkiuose didžiausiuose Lietuvos miestuose. Šiuose miestuose gyvena didžiausias gyventojų skaičius, be to šiuos miestus tranzitiniais, mokslo, verslo,

pažintiniais ar kitais tikslais aplanko didelis skaičius kitų miestų gyventojų iš Lietuvos ir užsienio. Siekiant patogiau ir glausčiau pateikti duomenis iš kitų likusių 5 didžiausių Lietuvos miestų, duomenys pateikiami susistemintai. Tyrimų metu visa įranga buvo vienodose sąlygose, taip pat buvo naudojama vienoda įranga visų operatorių testams atlikti. Testavimai buvo atliekami vienu metu. Didžiausių miestų tyrimai truko daugiau nei 2 dienas. Tyrimai buvo atliekami darbo valandomis, todėl puikiai įvertina balso kokybę esant mažai ir didelei tinklo apkrovai.

6.1.1. Balso kokybės vertinimas Vilniuje

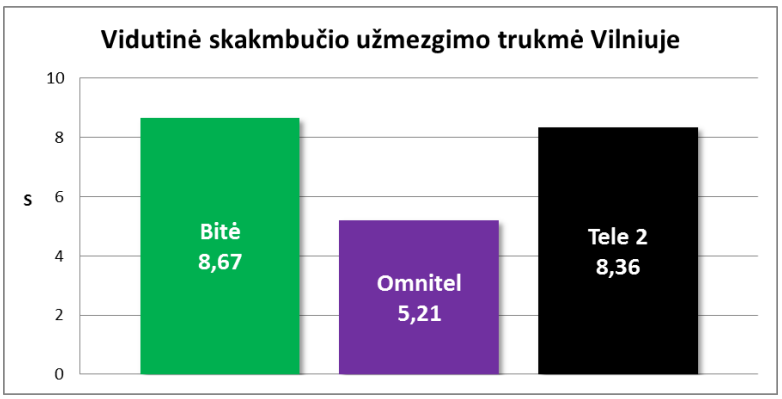
Balso kokybė Vilniuje buvo vertinama sudarius tam tikrą maršrutą Vilniaus mieste. Maršrutą buvo stengiamasi sudaryti taip, jog aprėptų kuo didesnę miesto teritorijos dalį. Maršrute taip pat stengtasi įtraukti daugiausiai žmonių lankomas vietas, miegamuosius rajonus, senamiestį, naująjį miesto centrą (NMC), pagrindines tranzitines gatves. Toliau pateiktoje 4 lentelėje pateikiami apibendrinti pagrindiniai skambučių kokybę nusakantys rodikliai Vilniaus mieste.

4 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai Vilniuje

Skambučių kokybės vertinimo rodikliai	Bitė	Omnitel	Tele 2
Inicijuoti skambučiai (#)	423	443	446
Skambučių, kurių nepavyko inicijuoti, skaičius (#)	1	1	1
Nutrūkusių skambučių skaičius (#)	5	9	14
Užmegztų skambučių sesijų kiekis (%)	**99,76**	**99,77**	**99,78**
Nutrūkusių skambučių kiekis (%)	**1,18**	**2,04**	**3,15**

Kaip matyti iš pateiktos lentelės, Vilniuje kiekvieno operatoriaus tinkle buvo atlikta daugiau nei 400 skambučių. Kiekvieno operatoriaus tinkle nepavyko inicijuoti po vieną skambutį. Mažiausias nutrūkusių skambučių kiekis buvo *Bitės* tinkle.

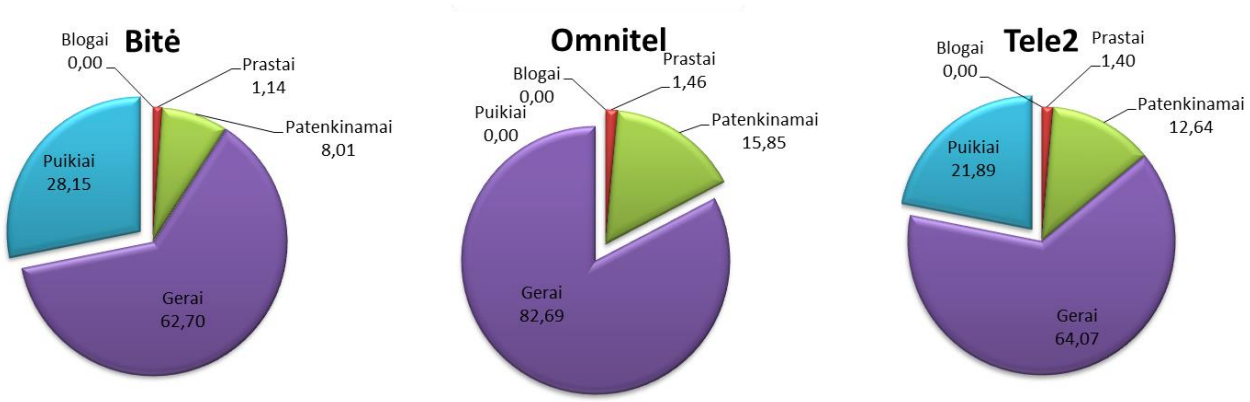
Kitas svarbus rodiklis, lemiantis vartotojo patiriamą kokybę – skambučio užmezgimo trukmė. Tai laikas nuo to momento, kai vartotojas inicijuoja skambutį iki tol, kol pradeda girdėti kvietimo signalą. Kuo šis laikas yra trumpesnis, tuo vartotojo patiriamas diskomfortas mažesnis. Ilgiau besitęsiantis skambučio užmezgimas vartotoją veikia neigiamai. Taip pat, verta paminėti, kad kvietimo signalų tonai skirtingose pasaulio šalyse yra skirtingi. Jie yra detaliai nurodyti ITU-T E.18 rekomendacijoje [19]. Toliau pateiktame 15 pav. grafike, vaizduojama skirtingų operatorių skambučio užmezgimo trukmė Vilniuje. Vertės buvo analizuojamos iš daugiau nei 400 įvykusių skambučių. Grafike vaizduojama kiekvieno operatoriaus vidutinė skambučio užmezgimo trukmė.



15 pav. Vidutinė skirtingų operatorių skambučio užmezgimo trukmė

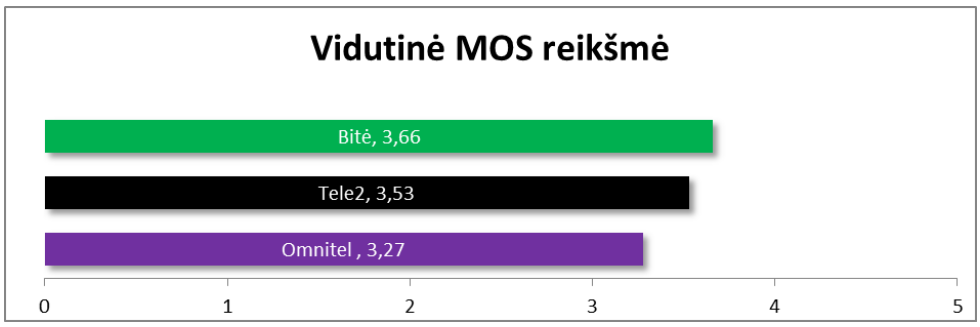
Iš pateikto 15 pav. grafiko matyti, jog labiausiai išsiskiria *Omnitel* operatorius. Jo skambučio užmezgimo trukmė mažiausia – 5,21 s. Likusių operatorių užmezgimo trukmės didesnės ir siekia apie 8–9 s.

Vienas iš svarbiausių vartotojo skambučio patiriamą kokybę vertinančių veiksnių – balso kokybė. Ji vertinama MOS skalėje nuo 1 iki 5, kur 5 reiškia, jog kokybė yra puiki, o vienetas nurodo, jog kokybė labai prasta. Grafikuose, pateiktuose 16 pav., iliustruojama kiekvieno Lietuvos operatoriaus balso kokybė Vilniaus mieste.



16 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas Vilniuje

Pateikti rezultatai 15 pav. leidžia teigti, jog *Bitės* ir *Tele2* balso kokybė yra geresnė už *Omnitel*. Iš grafikų matyti, jog *Omnitel* MOS reikšmių didesnių arba lygių keturiems nėra. Tai paaiškinama tuo, jog *Omnitel* savo tinkle nenaudoja HD balso paslaugos arba kitaip tariant – *AMR-WB* kodeko. *Tele2* ir *Bitės* MOS reikšmės gana panašios, nežymiai geresnė balso kokybė užfiksuota *Bitės* tinkle. Vidutiniai MOS įverčiai pateikti 17 pav. grafike.



17 pav. Vidutiniai MOS įverčiai Vilniuje

Kaip jau paminėta aukščiau, vidutinis *Bitės* MOS įvertis yra didžiausias, todėl galima teigti, kad šio operatoriaus teikiamos balso paslaugos kokybė Vilniuje yra geriausia. Nežymiai – per 0,13 MOS įverčio − atsilieka *Tele2* balso kokybė.

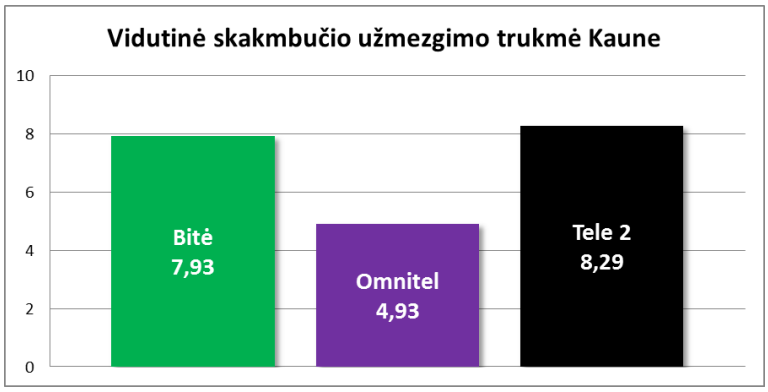
6.1.2. Balso kokybės vertinimas Kaune

Kaune buvo laikomasi tos pačios metodikos kaip ir Vilniuje, t.y. stengtasi įvertini balso kokybę pagrindinėse gatvėse, lankytinose ir didžiausiose žmonių susibūrimo vietose. Toliau pateiktoje 5 lentelėje pateikiami apibendrinti pagrindiniai skambučių kokybę nusakantys rodikliai Kauno mieste.

5 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai Kaune

Skambučių kokybės vertinimo rodikliai	Bitė	Omnitel	Tele 2
Inicijuoti skambučiai (#)	245	245	245
Skambučių, kurių nepavyko inicijuoti, skaičius (#)	0	2	0
Nutrūkusių skambučių skaičius (#)	1	0	6
Užmegztų skambučių sesijų kiekis (%)	**100,00**	**99,18**	**100,00**
Nutrūkusių skambučių kiekis (%)	**0,41**	**0,00**	**2,45**

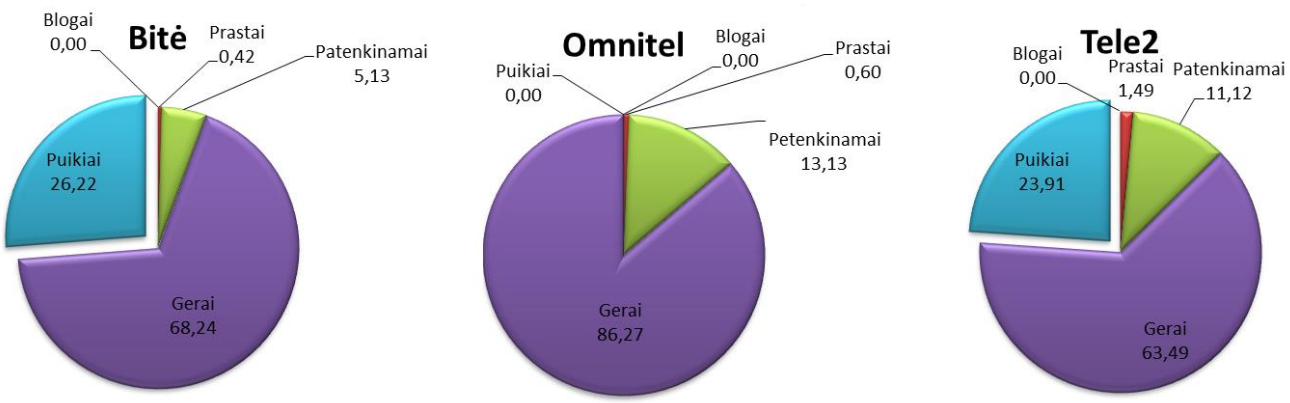
Kaip matyti iš pateiktos 5 lentelės, Kaune kiekvieno operatoriaus tinkle buvo atlikta 245 skambučiai. Visų skambučių inicijavimas buvo sėkmingas *Bitės* ir *Tele2* tinkluose. Omnitel tinkle nepavyko inicijuoti 2 skambučių. Nė vieno nutrūkusio skambučio neužfiksuota *Omnitel* tinkle.



18 pav. Vidutinė skambučio užmezgimo trukmė Kaune esant skirtingiems operatoriams

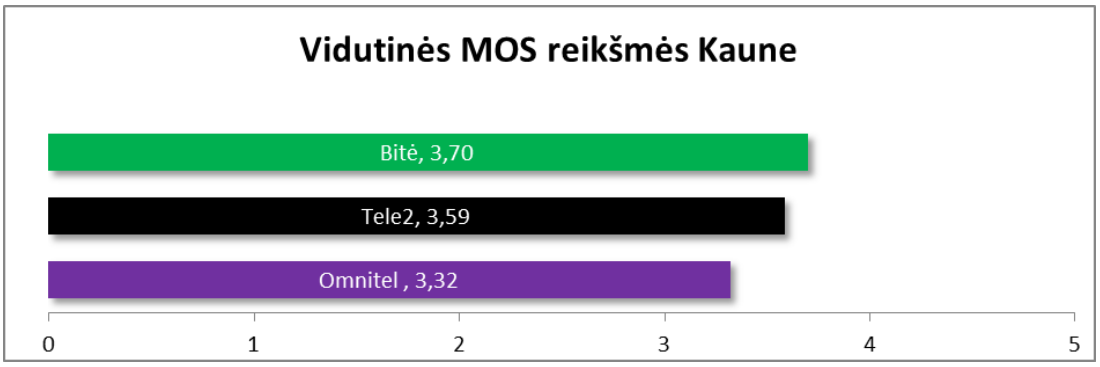
Pateiktame 18 pav. grafike, vaizduojama vidutinė operatorių skambučio užmezgimo trukmė Kaune. Šiuo atveju vėl trumpiausias laikas užtikrinamas *Omnitel* tinkle – 4,93 s. Priešingai nei Vilniaus atveju, *Bitė* Kaune užtikrina kiek mažesnę − 0,36 s − užmezgimo trukmę nei *Tele2*.

Diagramose, pateiktuose 19 pav., vaizduojama operatorių balso kokybė Kauno mieste.



19 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas Kaune

Pateikti rezultatai 18 pav. leidžia teigti, jog *Bitės* ir *Tele2* balso kokybė vėl gi yra geresnė kaip ir Vilniaus atveju. *Tele2* ir Bitės MOS reikšmės gana panašios, nežymiai geresnė balso kokybė užfiksuota *Bitės* tinkle. Vidutiniai MOS įverčiai pateikti 20 pav. grafike.



20 pav. Vidutiniai MOS įverčiai Kaune

Lygiai taip pat kaip ir Vilniaus atveju, vidutinė MOS reikšmė − 3,7 – didžiausia *Bitės*. Galima atkreipti dėmesį, jog Kaune visų operatorių MOS reikšmės 0,02−0,04 didesnės.

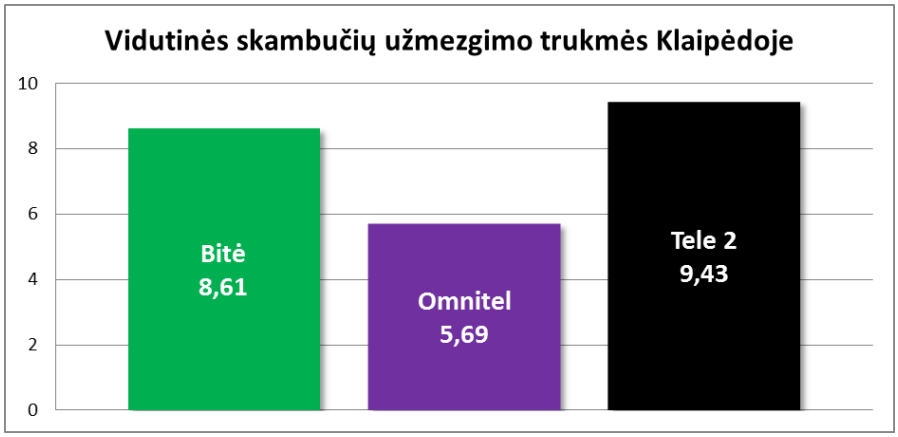
6.1.3. Balso kokybės vertinimas Klaipėdoje

Klaipėdoje buvo laikomasi tų pačių matavimo taisyklių. Toliau pateiktoje 6 lentelėje pateikiami apibendrinti pagrindiniai skambučių kokybę nusakantys rodikliai Klaipėdos mieste.

6 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai Klaipėdoje

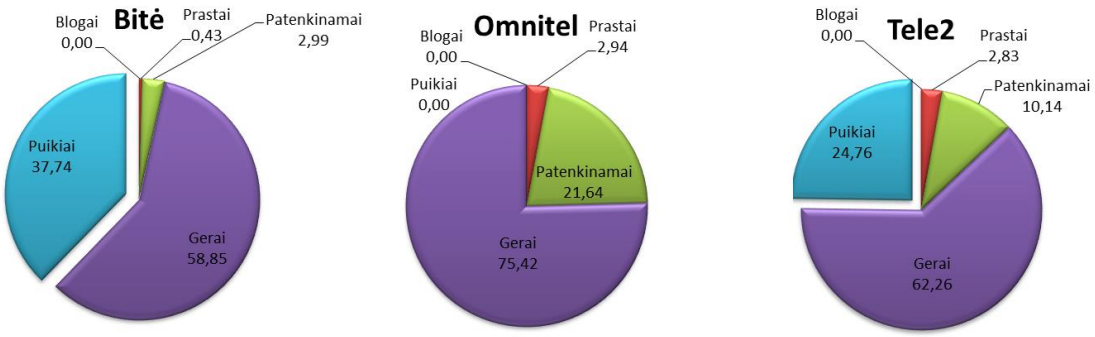
Skambučių kokybės vertinimo rodikliai	Bitė	Omnitel	Tele 2
Inicijuoti skambučiai (#)	98	98	98
Skambučių, kurių nepavyko inicijuoti, skaičius (#)	0	0	0
Nutrūkusių skambučių skaičius (#)	1	1	3
Užmegztų skambučių sesijų kiekis (%)	**100,00**	**100,00**	**100,00**
Nutrūkusių skambučių kiekis (%)	**1,02**	**1,02**	**3,06**

Kaip matyti iš pateiktos 6 lentelės, Klaipėdoje kiekvieno operatoriaus tinkle buvo atlikti 98 skambučiai. Visų skambučių inicijavimas buvo sėkmingas visų operatorių tinkluose, priešingai nei Kauno ir Vilniaus atvejais. Klaipėdoje taip pat nė vienam operatoriui nepavyko išvengti nutrūkusių skambučių. *Bitės* ir *Omnitel* tinkle jų buvo po vieną, *Tele2* tinkle – trys. Tai sudarė atitinkamai 1,02 % ir 3,06 % nuo visų užmegztų skambučių. Pateiktame 21 pav. grafike, vaizduojama vidutinė operatorių skambučio užmezgimo trukmė Klaipėdoje.



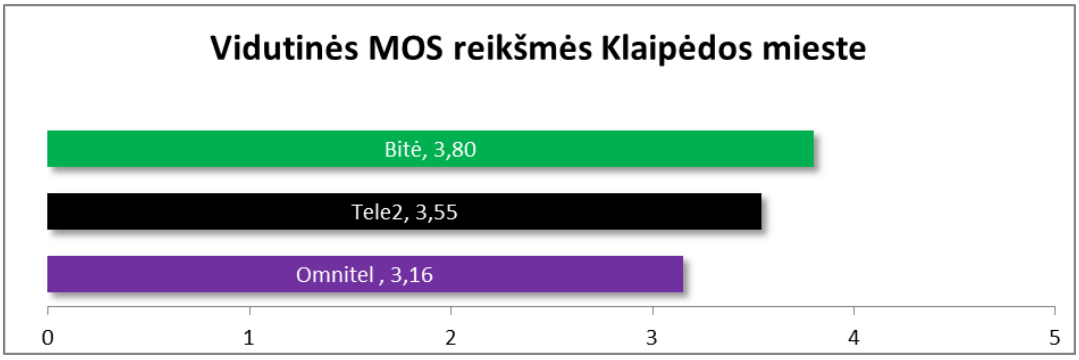
21 pav. Vidutinė skambučio užmezgimo trukmė Klaipėdoje esant skirtingiems operatoriams

Šiuo atveju trumpiausias laikas kaip ir anksčiau užtikrinamas *Omnitel* tinkle – 5,69 s. Priešingai nei Vilniaus atveju, *Bitė* Kaune ir Klaipėdoje užtikrina kiek mažesnę užmezgimo trukmę nei *Tele2*. Verta paminėti, kad skambučių užmezgimo trukmės pas visus operatorius yra didesnės nei Vilniaus ir Kauno atvejais. Grafikuose, pateiktuose 22 pav., iliustruojama kiekvieno operatoriaus balso kokybė Klaipėdos mieste.



22 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas Klaipėdoje

Pateikti rezultatai 22 pav. leidžia teigti, jog *Bitės* ir *Tele2* balso kokybė geresnė taip pat kaip Kauno ir Vilniaus atvejais. *Bitės* MOS reikšmės didžiausios, todėl galima teigti, jog ir balso kokybė *Bitės* tinkle geriausia. Vidutiniai MOS įverčiai pateikti 23 pav. grafike.



23 pav. Vidutiniai MOS įverčiai Klaipėdoje

Iš 23 pav. galima teigti, jog *Bitės* balso kokybė geresnė nei Vilniuje ar Kaune. Priešinga situacija su *Omnitel*. Šio tinklo operatoriaus MOS įverčiai gauti prastesni nei Kaune ar Vilniuje.

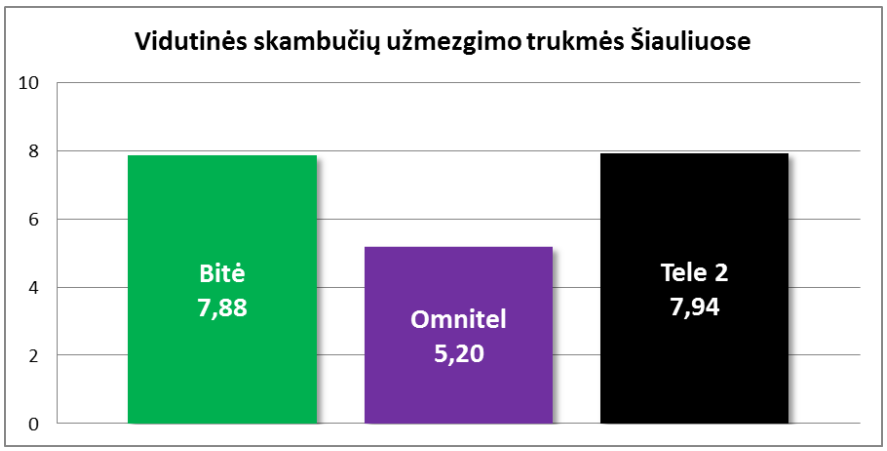
6.1.4. Balso kokybės vertinimas Šiauliuose

Toliau pateiktoje 7 lentelėje pateikiami apibendrinti pagrindiniai skambučių kokybę nusakantys rodikliai Šiaulių mieste.

7 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai Šiauliuose

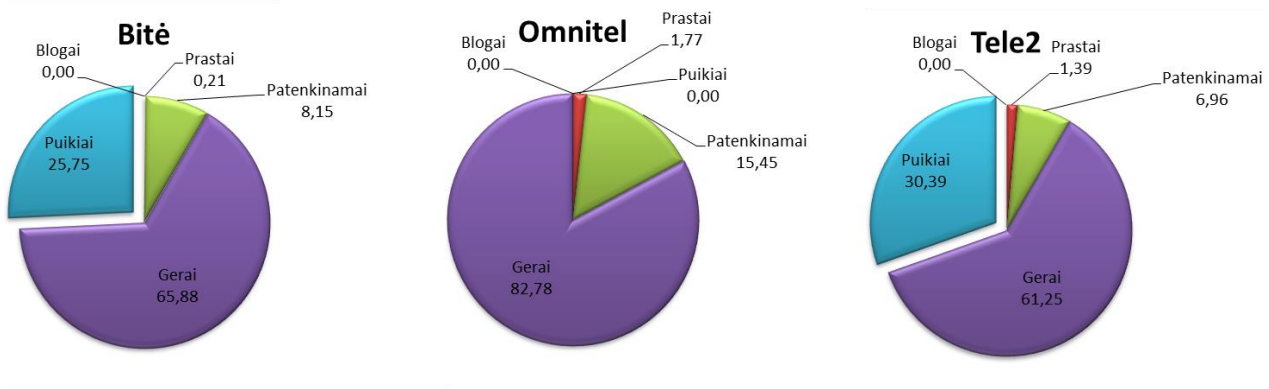
Skambučių kokybės vertinimo rodikliai	Bitė	Omnitel	Tele 2
Inicijuoti skambučiai (#)	94	94	94
Skambučių, kurių nepavyko inicijuoti, skaičius (#)	0	1	1
Nutrūkusių skambučių skaičius (#)	0	0	2
Užmegztų skambučių sesijų kiekis (%)	**100,00**	**98,94**	**98,94**
Nutrūkusių skambučių kiekis (%)	**0,00**	**0,00**	**2,15**

Kaip matyti iš pateiktos 7 lentelės, Šiauliuose kiekvieno operatoriaus tinkle buvo atlikti 94 skambučiai. Visų skambučių inicijavimas buvo sėkmingas *Bitės* tinke. *Tele2* ir *Omnitel* tinkluose nepavyko inicijuoti po du skambučius. Taip pat, *Tele2* tinkle buvo užfiksuoti du nutrūkę skambučiai. Pateiktame 24 pav. grafike, vaizduojama vidutinė operatorių skambučio užmezgimo trukmė Šiauliuose. Kaip ir ankstesniais atvejais, trumpiausias skambučio užmezgimo laikas fiksuojamas *Omnitel* tinkle – 5,2 s. Toliau seka *Bitė*, šio operatoriaus tinkle fiksuojama 7,88 s skambučio inicijavimo trukmė. Nedaug atsilieka *Tele2* operatorius, kurio skambučio inicijavimo trukmė 0,06 s didesnė nei *Bitės*.



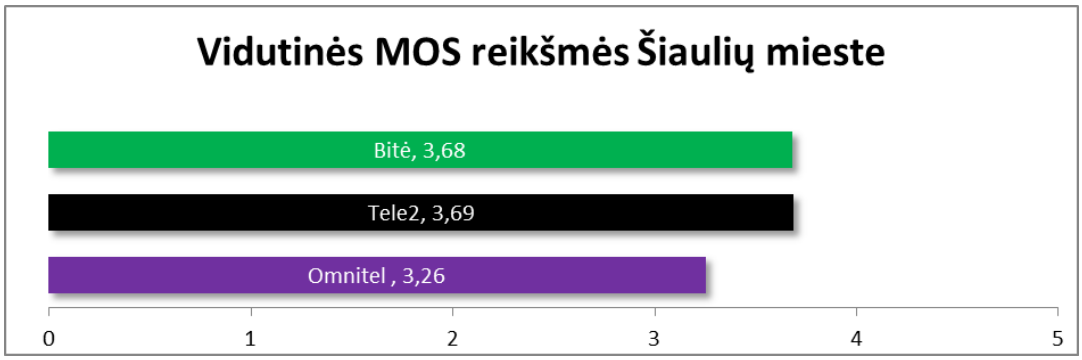
24 pav. Vidutinė skambučio užmezgimo trukmė Šiauliuose esant skirtingiems operatoriams

Grafikuose, pateiktuose 25 pav., iliustruojama kiekvieno operatoriaus balso kokybė Šiaulių mieste.



25 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas Šiauliuose

Šiauliuose daugiausiai įverčių su didesne nei keturių MOS reikšme buvo užfiksuota *Tele2* tinkle. Vidutinė MOS reikšmė didžiausia užfiksuota taip pat *Tele2* tinkle. Tai vaizdžiai iliustruojama 26 pav.



26 pav. Vidutiniai MOS įverčiai Šiauliuose

Bitės tinkle vidutinė MOS vertė buvo vos viena šimtąja mažesnė nei Tele2 tinkle ir siekė 3,68.

6.1.5. Balso kokybės vertinimas Panevėžyje

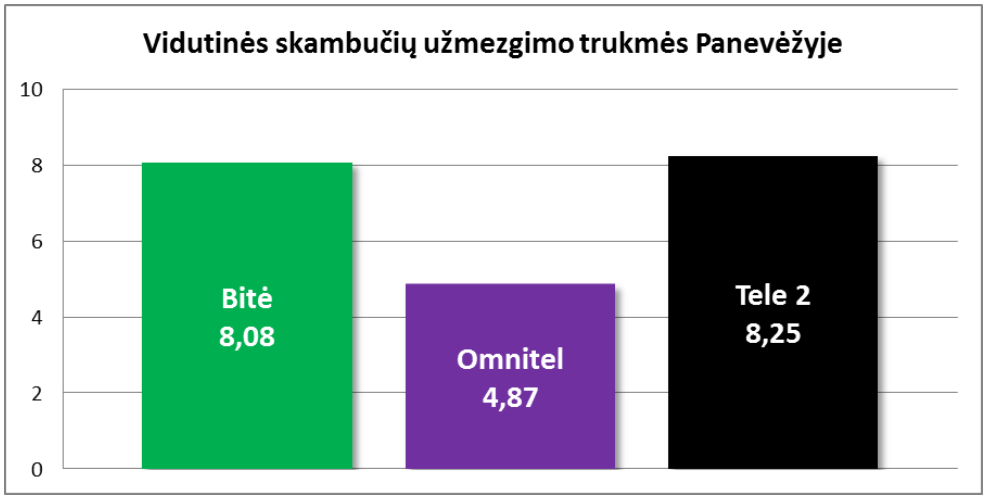
Toliau pateiktoje 8 lentelėje pateikiami apibendrinti pagrindiniai skambučių kokybę nusakantys rodikliai Panevėžio mieste.

8 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai Panevėžyje

Skambučių kokybės vertinimo rodikliai	Bitė	Omnitel	Tele 2
Inicijuoti skambučiai (#)	92	92	93
Skambučių, kurių nepavyko inicijuoti, skaičius (#)	0	0	0
Nutrūkusių skambučių skaičius (#)	0	2	1
Užmegztų skambučių sesijų kiekis (%)	**100,00**	**100,00**	**100,00**
Nutrūkusių skambučių kiekis (%)	**0,00**	**2,17**	**1,08**

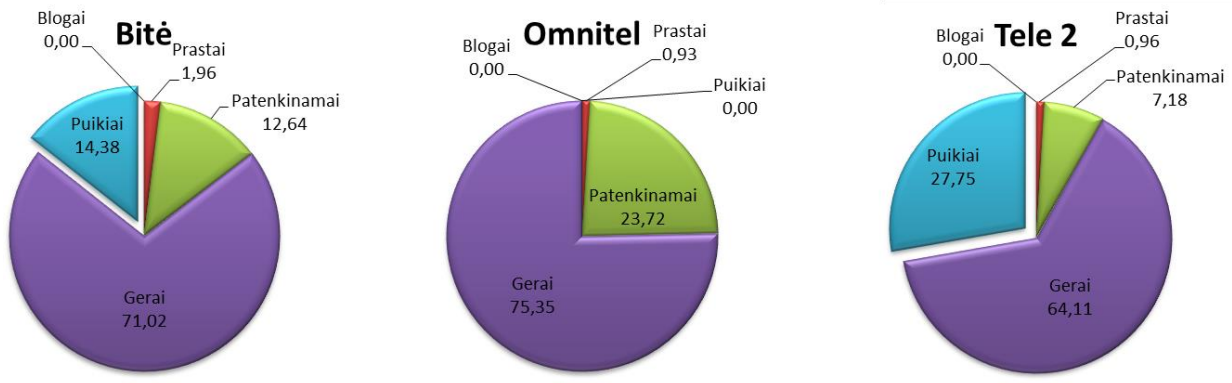
Kaip matyti, penktame pagal dydį Lietuvos mieste, testavimų metu buvo atlikti 92−93 skambučiai. Visų operatorių tinkluose pavyko inicijuoti norimą skambučių skaičių. Kaip ir Šiauliuose, *Bitės* tinkle neužfiksuota nė vieno nutrūkusio skambučio. *Omnitel* tinkle jų buvo du, o *Tele2* – vienas.

Pateiktame 27 pav. grafike, vaizduojama vidutinė operatorių skambučio užmezgimo trukmė Panevėžyje. Kaip ir prieš tai nagrinėtais atvejais, trumpiausias skambučio užmezgimo laikas fiksuojamas *Omnitel* tinkle – 4,87 s. Toliau seka *Bitė*, šio operatoriaus tinkle fiksuojama 8,08 s skambučio inicijavimo trukmė. Didžiausia skambučio inicijavimo trukmė kaip ir ankstesniais atvejais užfiksuota *Tele2* tinkle.



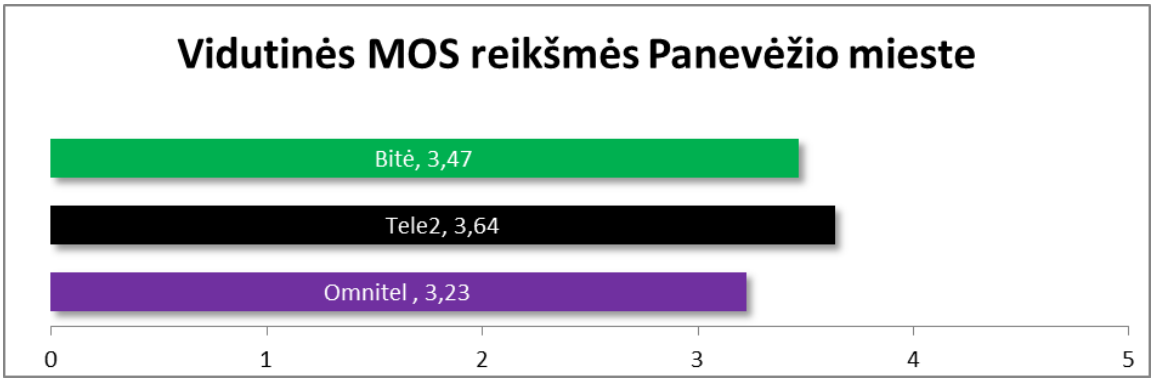
27 pav. Vidutinė skambučio užmezgimo trukmė Panevėžyje esant skirtingiems operatoriams

Grafikuose, pateiktuose 28 pav., iliustruojama kiekvieno operatoriaus balso kokybė Panevėžio mieste. *Tele2* tinkle Panevėžyje kaip ir Šiauliuose buvo užfiksuota daugiausiai MOS įverčių su puikia balso kokybe. *Tele2* tinkle tokių įverčių buvo 27,75 %, o *Bitės* 14,38 %.



28 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas Panevėžyje

Didžiausia vidutinė MOS reikšmė taip pat išmatuota *Tele2* tinkle. Tai atsispindi 29 pav. pateiktame grafike.



29 pav. Vidutiniai MOS įverčiai Panevėžyje

Panevėžyje atotrūkis tarp *Bitės* ir *Tele2* buvo didesnis nei Šiauliuose ir siekė jau 0,17 MOS įverčio. *Omnitel* kaip ir prieš tai aptartų miestų atvejais demonstravo prasčiausią iš visų trijų operatorių balso kokybę.

6.1.6. Balso kokybės vertinimas Alytuje, Marijampolėje, Mažeikiuose, Jonavoje ir Utenoje

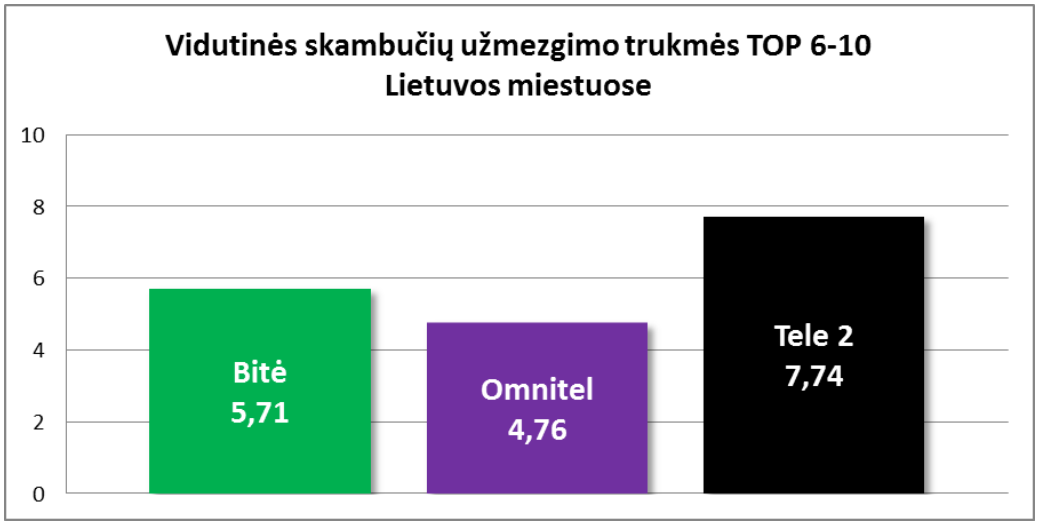
Toliau pateiktoje 9 lentelėje pateikiami apibendrinti pagrindiniai skambučių kokybę nusakantys rodikliai TOP 6−10 miestuose.

9 lentelė. Pagrindiniai skambučių kokybiniai rodikliai TOP 6−10 Lietuvos miestuose

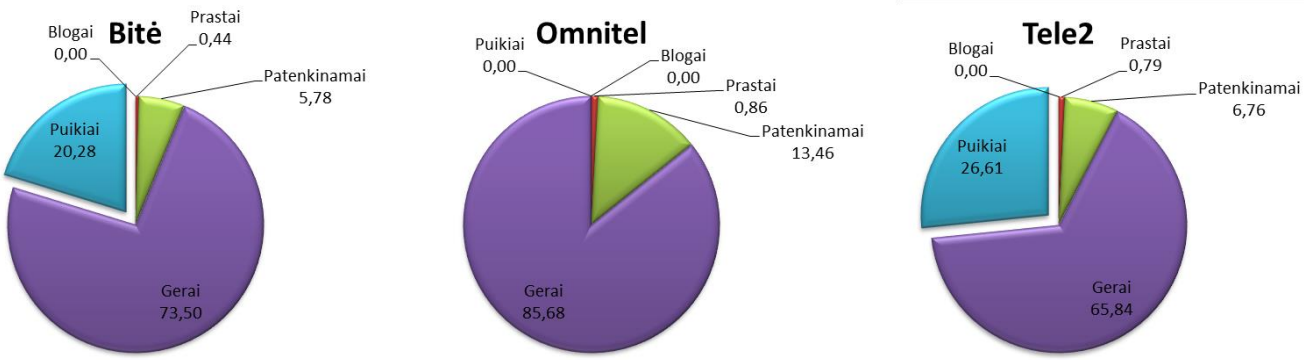
Skambučių kokybės vertinimo rodikliai	Bitė	Omnitel	Tele 2
Inicijuoti skambučiai (#)	189	189	189
Skambučių, kurių nepavyko inicijuoti, skaič	0	0	1
Nutrūkusių skambučių skaičius (#)	1	1	4
Užmegztų skambučių sesijų kiekis (%)	**100,00**	**100,00**	**99,47**
Nutrūkusių skambučių kiekis (%)	**0,53**	**0,53**	**2,13**

Iš lentelės matyti, jog didžiausias nutrūkusių skambučių kiekis užfiksuotas *Tele2* tinkle. Užfiksuoti keturi nutrūkę skambučiai. *Bitės* ir *Omnitel* tinkle tokių skambučių po vieną.

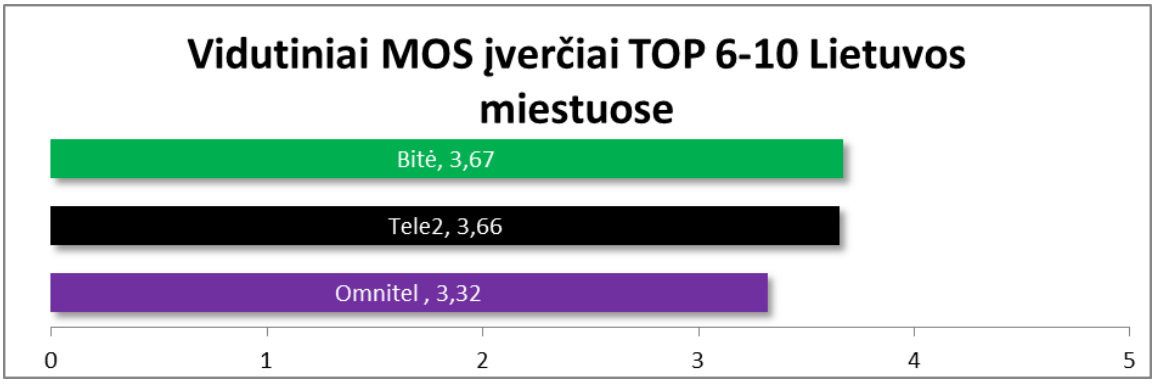
Ilgiausia skambučio užmezgimo trukmė minėtuose miestuose išmatuota *Tele2* tinkle. Tai atsispindi 30 pav. grafike. Šiuose miestuose, kaip ir prieš tai aprašytuose, trumpiausią skambučio užmezgimo trukmę turėjo *Omnitel* operatorius.



30 pav. Vidutinė skambučio užmezgimo trukmė TOP 6−10 Lietuvos miestuose esant skirtingiems operatoriams



31 pav. Operatorių MOS įverčių pasiskirstymas TOP 6−10 Lietuvos miestuose



32 pav. Vidutiniai MOS įverčiai TOP 6−10 Lietuvos miestuose

Aukščiau pateiktas 31 pav. nurodo MOS reikšmių pasiskirstymą. Balso kokybės įverčių su puikia kokybę daugiausiai užfiksuota *Tele2* ir *Bitės* tinkluose. Jų atitinkamai buvo 26,61 % ir 20.28 %.

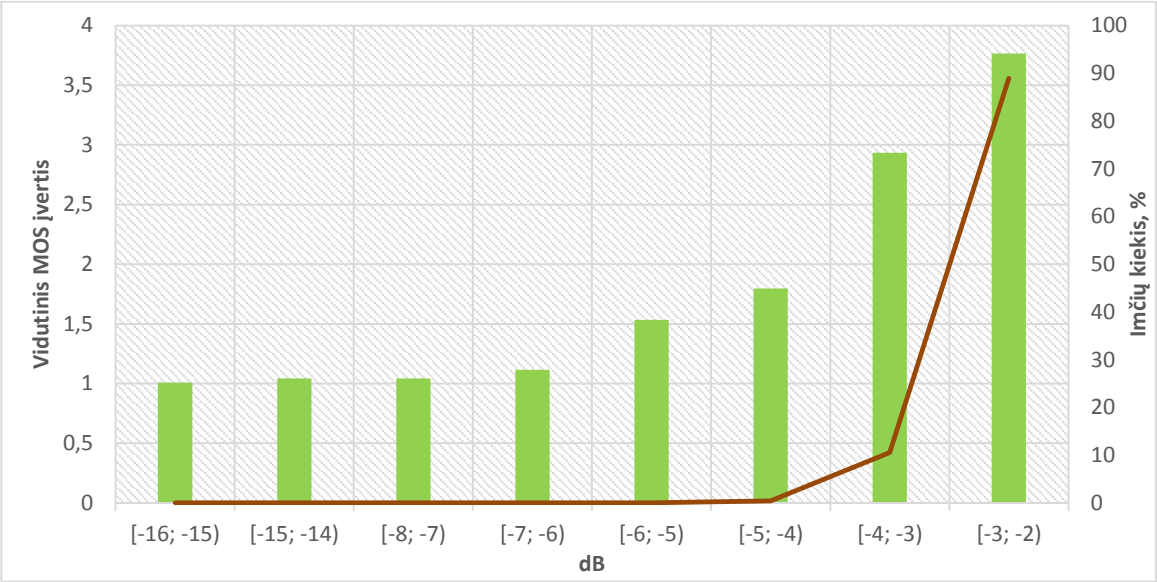
Vidutinis MOS įvertis, kaip matyti iš 32 pav., nežymiai didesnis užfiksuotas *Bitės* tinkle ir siekė 3,67. *Tele2* įvertis mažesnis tik viena šimtąja ir siekė 3,66 balo.

Aukščiau pateiktuose šešto skyriaus poskyriuose išsamiai apžvelgta Lietuvos mobiliųjų operatorių balso kokybė penkiuose didžiausiuose Lietuvos miestuose. Iš pateiktos informacijos matyti, jog Vilniuje, Kaune ir Klaipėdoje geriausia balso kokybė buvo užfiksuota *Bitės* tinkle, Šiauliuose ir Panevėžyje − *Tele2*. *Omnitel* balso kokybė buvo įvertinta mažesnėmis MOS vertėmis, todėl, jog minėtas operatorius savo tinkle nenaudoja AMR-WB kodeko, kuris užtikrina aukštesnės raiškos balso paslaugas. Mažiausiai nutrūkusių skambučių sesijų buvo *Bitės* tinkle, o greičiausiai skambutis užmezgamas *Omnitel* tinkle. Verta atkreipti dėmesį, jog skambučiai esant LTE tinklui, visada būdavo inicijuojami iš jo. Kaip žinoma, Lietuvos operatoriai balso paslaugų LTE tinkluose neteikia. Inicijuojant balso skambutį tinklas siunčia informaciją mobiliesiems įrenginiams, jog jie persijungtų į 3G (UMTS) tinklą. Minėtų pranešimų siuntimas ir persijungimo procedūra padidina skambučio inicijavimo laiką.

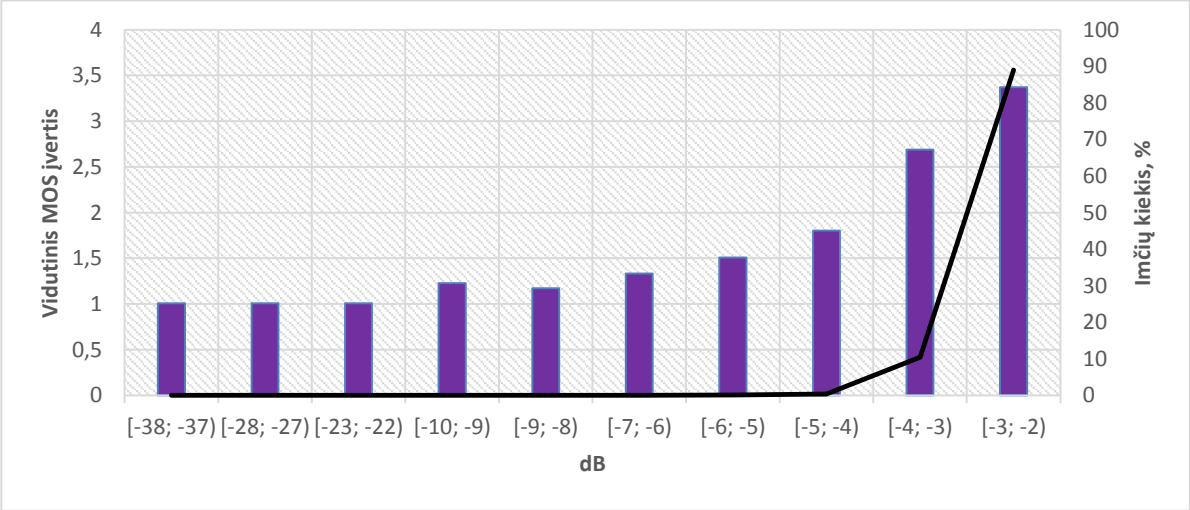
Omnitel skambučių inicijavimo laikas trumpesnis, kadangi operatorius savo tinkle yra aktyvavęs savybę – skambučio vyksmo tonas (angl. *CIP - Call in Progress Tone*) [29]. Skambučių inicijavimo trukmė suprantama, kaip laikas nuo skambučio inicijavimo momento (angl. *RRC Connection Request*) iki kvietimo signalo pranešimo pasirodymo (angl. *Alerting*). Skambinant vartotojui, kurio mobilusis įrenginys yra LTE tinkle, signalizacinis *paging* procesas gali užtrukti keletą sekundžių, kadangi informacija tarpusavyje turi apsikeisti daug tinklo mazgų: LTE tinklo bazinė stotis, MSC, MME, RNC ir UMTS tinklo stotis. Vykstant *paging* procesui, vartotojas savo mobiliajame įrenginyje girdi tylos intervalą kol išgirsta kvietimo signalą. Ši tyla gali užtrukti keletą sekundžių, todėl vartotojas tam tikrais atvejais gali jos netoleruoti ir nutraukti skambučio inicijavimą. CIP savybės įdiegimas tinkle suteikia galimybę vartotojui girdėti netikrą kvietimo signalo toną, kol įvyksta *paging* užklausa ir pasigirsta tikrasis kvietimo signalas. Tokiu būdu siekiama, jog vartotojas jaustųsi patogiau negirdėdamas ilgai trunkančios tylos. Tyrimų metu šios savybės savo tinkle nebuvo įdiegę *Tele2* ir *Bitės* operatoriai. Vartotojai kai kuriais atvejais gali būti nepatenkinti šia savybe. Vienas iš atvejų, kai vartotojo mobilusis įrenginys yra išjungtas arba užimtas. Tokiu atveju skambinantysis iš pradžių girdės normalų kvietimo signalą, o po kurio laiko išgirs pranešimą apie išjungtą arba užimtą mobilųjį įrenginį.

6.2. Garso signalo parametrai, lemiantys MOS įvertį

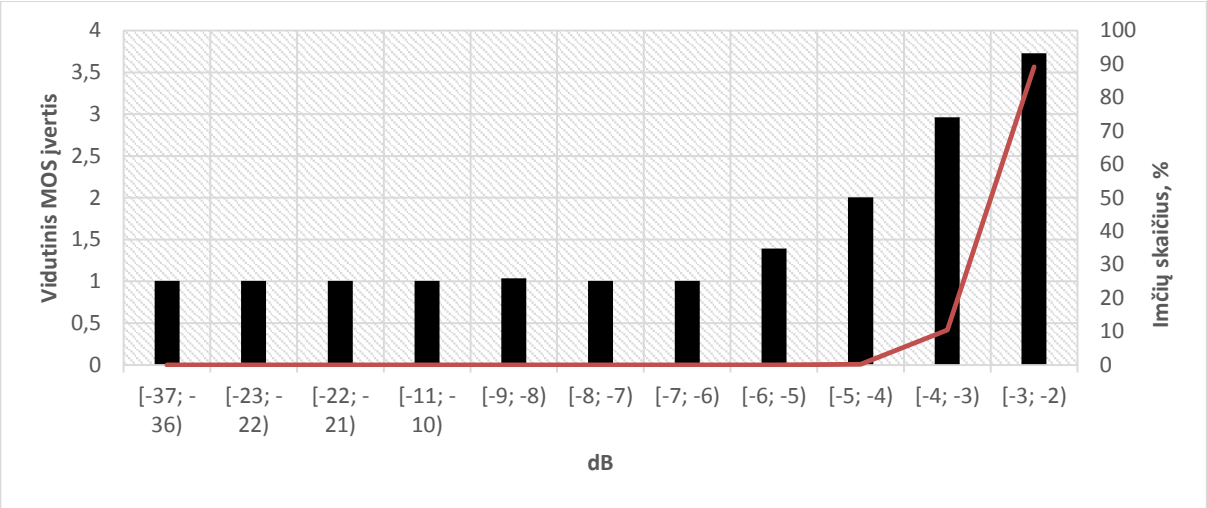
Šiame poskyryje aptariami tokie MOS įvertį lemiantys rodikliai kaip naudojama tinklo technologija, kodeko tipas, garso signalo įterpimo stiprumas, garso signalo ir triukšmo santykis, garso signalo vėlinimas. Toliau pateiktuose 33−35 pav. pateikiama MOS įverčio priklausomybė nuo įterpimo stiprumo (angl. *Insertion gain*) esant skirtingiems operatoriams.



33 pav. MOS priklausomybė nuo įterpimo stiprumo *Bitės* tinkle

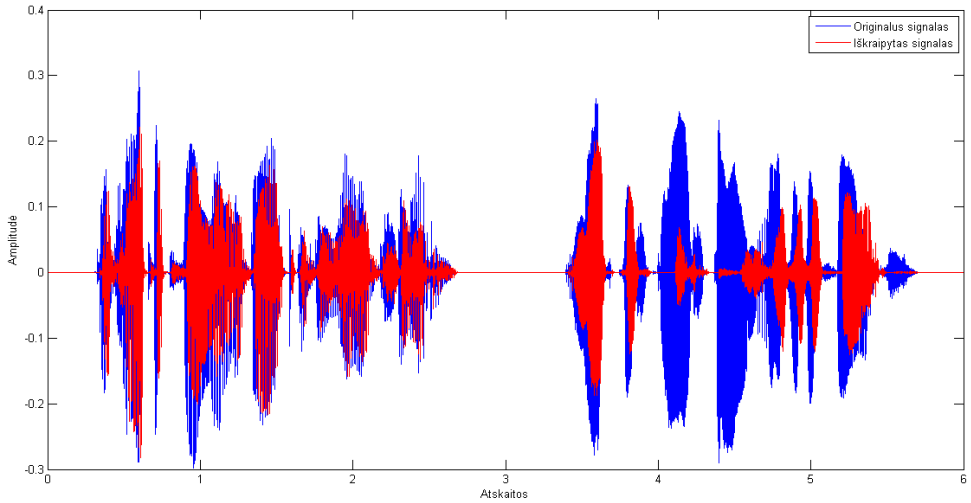


34 pav. MOS priklausomybė nuo įterpimo stiprumo *Omnitel* tinkle



35 pav. MOS priklausomybė nuo įterpimo stiprumo *Tele2* tinkle

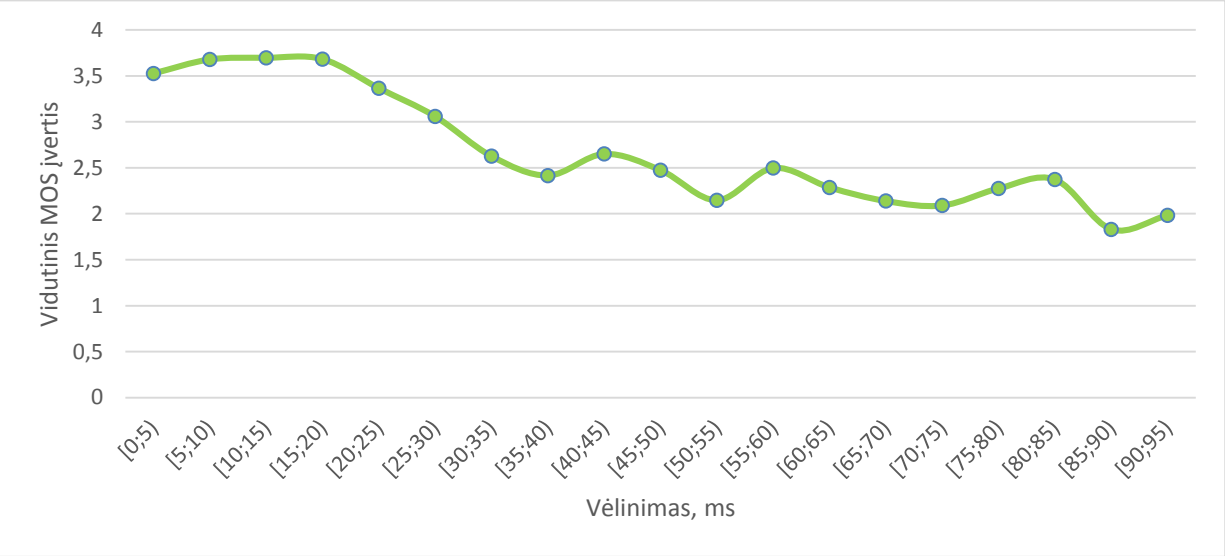
Įterpimo stiprumo rodiklis suprantamas kaip skirtumas tarp iškraipyto signalo (signalas, perėjęs sistemą) ir originalaus signalo. Šis skirtumas matuojamas *Nemo Outdoor* programinės įrangos aktyviais signalo periodais. Tai laiko momentai, kuriais perduodamas balsas neįtraukiant tylos intervalų. Iš pateiktų grafikų matyti, kad daugiausiai imčių visų operatorių tinkluose − apie 90 % − išmatuota intervale [-3;-2] dB. Idealaus signalo, perėjusio sistemą, reikšmė yra 0 dB. Tai nurodo, kad signalas visiškai neiškraipytas triukšmų ar kanalo. Tokių reikšmių užfiksuoti nepavyko nė vieno operatoriaus tinkle. Akivaizdu, jog didėjant santykiui tarp iškraipyto ir originalaus signalų, MOS įvertis mažėja. Ši koreliacija akivaizdžiai matyti pateiktuose grafikuose. Pasiekus ribą [-5;-4] dB signalo kokybė tampa prasta. Tokios kokybės balso signalas vartotojui tampa sunkiai suprantamu. Naudojantis *Matlab* programiniu paketu, iš realių matavimų metu įrašyto garso takelio pavaizduoti originalus ir 1,538 MOS įvertį turintys signalai. Iš pateikto 36 pav. grafiko matyti, kad skirtumas tarp iškraipyto ir originalaus signalo yra didesnis nei -5 dB, kuris ir lėmė itin žemą MOS įvertį.



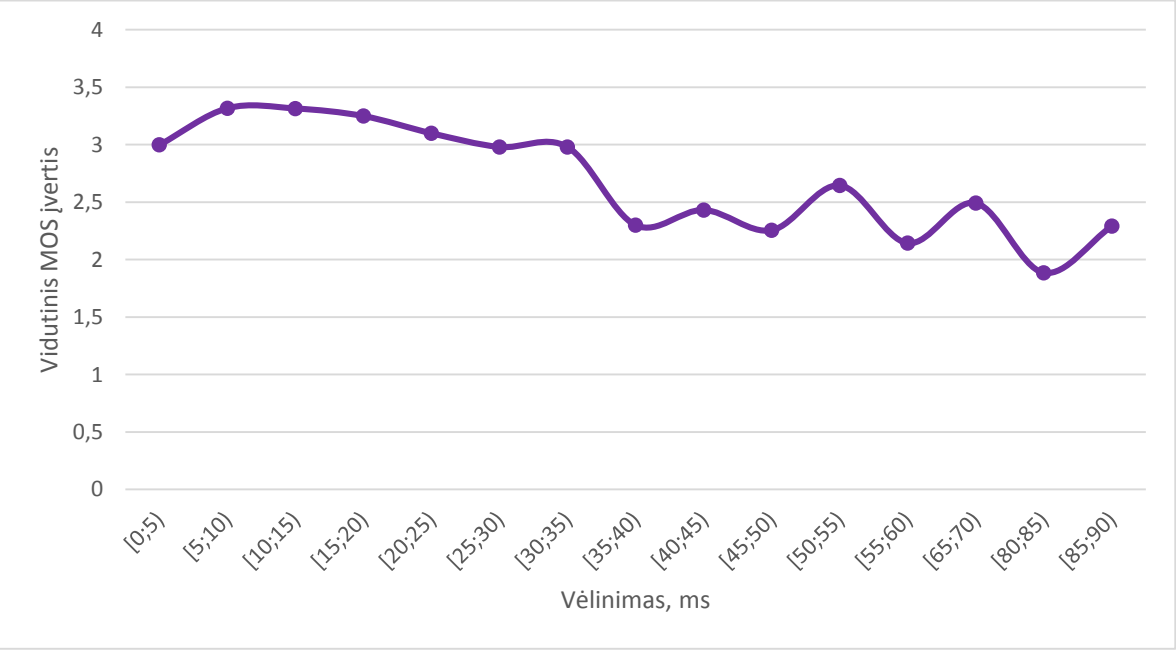
36 pav. Originalus ir iškraipytas signalas su 1,538 MOS įverčiu

Kaip jau minėta anksčiau, signalą sudaro vyriškas ir moteriškas balsai. Pirmasis sakinys yra vyro, o antrasis moters. Iš grafiko matyti, kad pastarasis yra labiausiai iškraipytas. Tai galėjo įvykti dėl itin prastų ryšio sąlygų ar atsiradusių iškraipymų kanale.

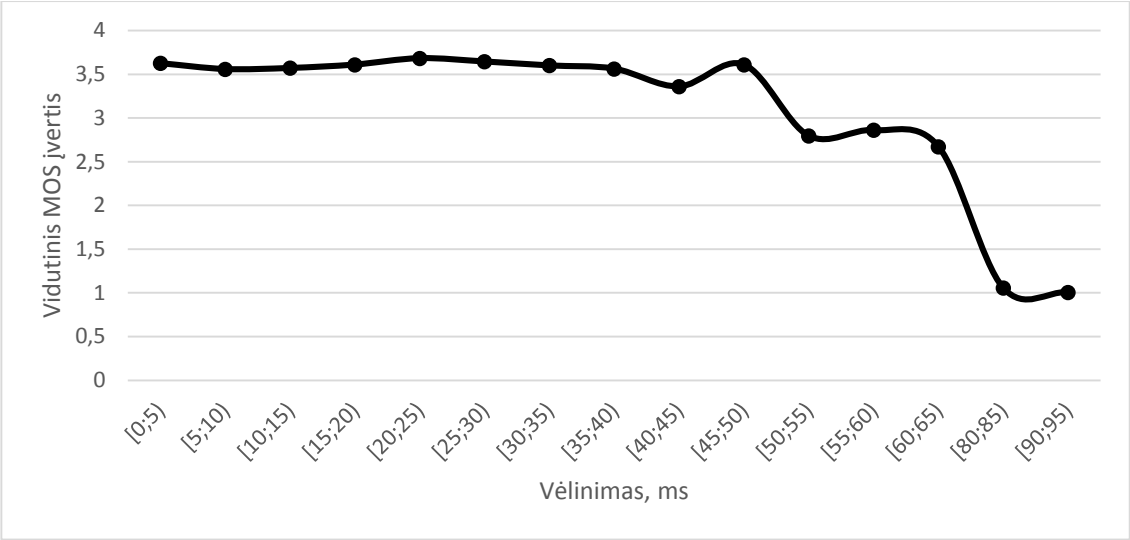
Ne mažiau svarbus parametras realaus ryšio sistemose yra vėlinimas. Skirtingose sistemose bei naudojant skirtingus kodekus tolerancijos ribos gali būti skirtingos. Toliau pateiktuose 37−39 pav. vaizduojama MOS priklausomybė nuo vienkrypčių vėlinimų skirtingų operatorių tinkluose.



37 pav. MOS priklausomybė nuo vienkrypčio vėlinimo *Bitės* tinkle



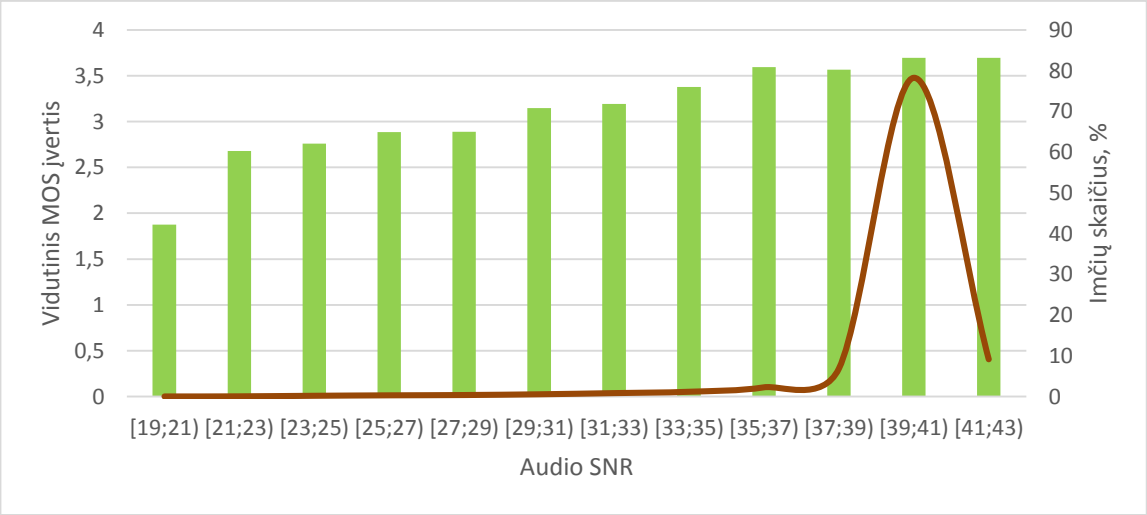
38 pav. MOS priklausomybė nuo vienkrypčio vėlinimo *Omnitel* tinkle



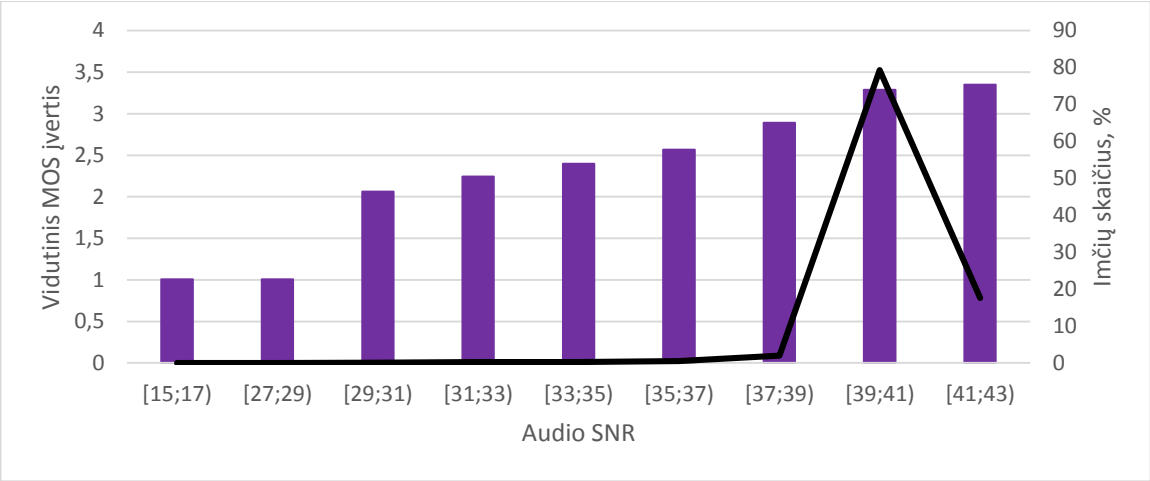
39 pav. MOS priklausomybė nuo vienkrypčio vėlinimo *Tele2* tinkle

Įvairiuose šaltiniuose teigiama, kad perduodant balsą VoIP technologijos tinklais vienakryptis vėlinimas toleruojamas iki 150 ms [20, 21]. Grandinėmis komutuojamais tinklais, kur naudojami AMR kodekai dvikryptis vėlinimas toleruojamas iki 185 ms [22], o vienkryptis neturėtų viršyti 100 ms [23]. Iš aukščiau pateiktų grafikų matyti, jog vėlinimui artėjant prie 100 ms ribos, MOS įverčio reikšmė siekia 2 arba mažiau. Vėlinimas skaičiuojamas atskirai kiekvienam 20 ms trukmės kadrui. Daugiausiai imčių minėtų operatorių tinkluose užfiksuota ties 5−30 ms riba. Galima teigti, kad vėlinimui esant lygiam arba didesniam už 85 ms, balso kokybė ima ženkliai prastėti. Vėlinimą tinkluose gali sukelti dideli *jitter* svyravimai. Tai sąlygoja tai, jog tam tikrai kadrai arba paketai yra pametami ir dėl to balse girdimi tylos intarpai arba balso iškraipymai.

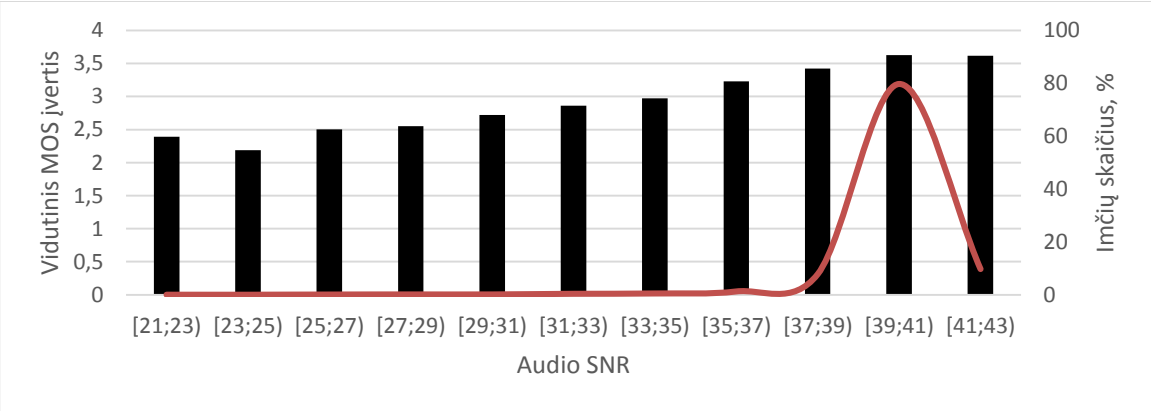
Garso signalo ir triukšmo santykis taip pat lemia balso kokybės įvertį. Grafikuose, pateiktuose 40−42 pav. matyti MOS priklausomybė nuo garso signalo ir triukšmo santykio (angl. *Signal to Noise Ratio-SNR*).



40 pav. MOS priklausomybė nuo audio SNR *Bitės* tinkle



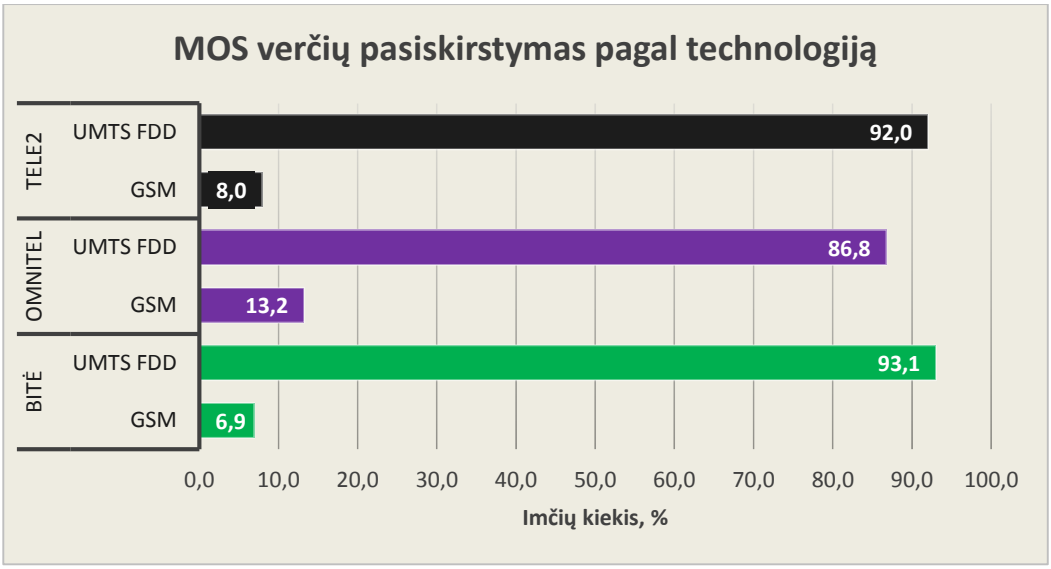
41 pav. MOS priklausomybė nuo audio SNR *Omnitel* tinkle



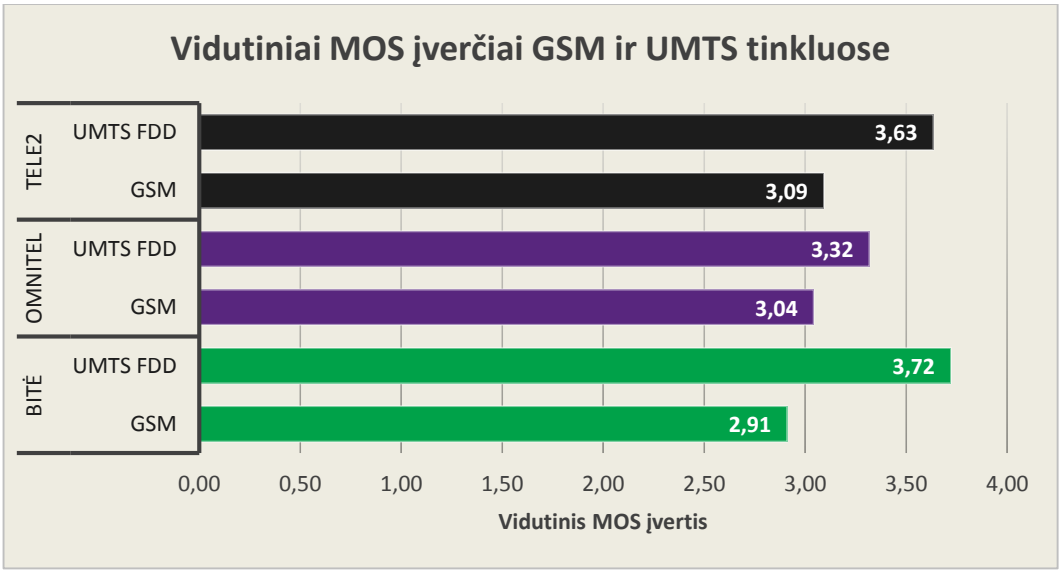
42 pav. MOS priklausomybė nuo audio SNR *Tele2* tinkle

SNR santykis gali būti suprantamas kaip kalbos srauto stiprumo ir foninio triukšmo santykis arba santykinio garsumo ir triukšmo santykis. Iš pateiktų grafikų matyti, jog daugiausiai SNR reikšmių visų operatorių tinkluose užfiksuota intervale [39;41] dB. Tokių reikšmių užfiksuota apie 80 % iš visų išmatuotų imčių. Akivaizdu, jog SNR santykiui didėjant, MOS įvertis taip pat didėja. Mažesnis nei 20 dB santykis lemia ženklų balso kokybės suprastėjimą.

Analizuojant MOS įverčius pravartu atkreipti dėmesį į tai, kurioje technologijoje atliekami skambučiai. Grafikuose, pateiktuose 43 ir 44 pav., nurodytas išmatuotų verčių pasiskirstymas pagal technologiją (GSM, UMTS) esant skirtingiems operatoriams bei vidutinis MOS įvertis kiekvienos technologijos atveju.



43 pav. Išmatuotų verčių pasiskirstymas pagal technologiją (GSM, UMTS) esant skirtingiems operatoriams

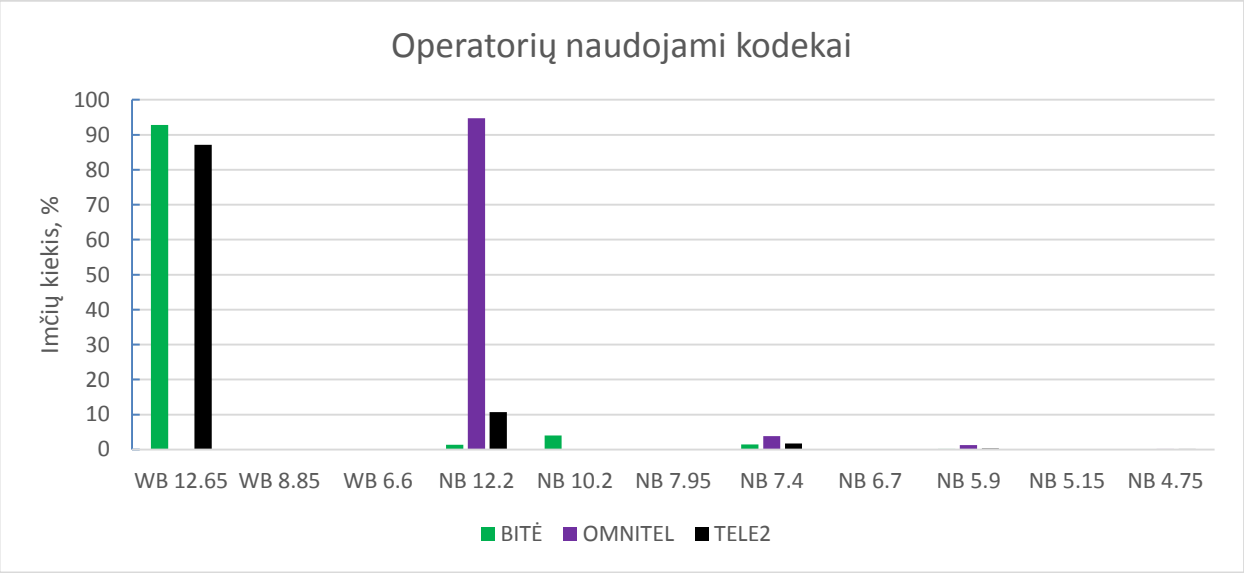


44 pav. Vidutiniai MOS įverčiai GSM ir UMTS tinkluose esant skirtingiems operatoriams

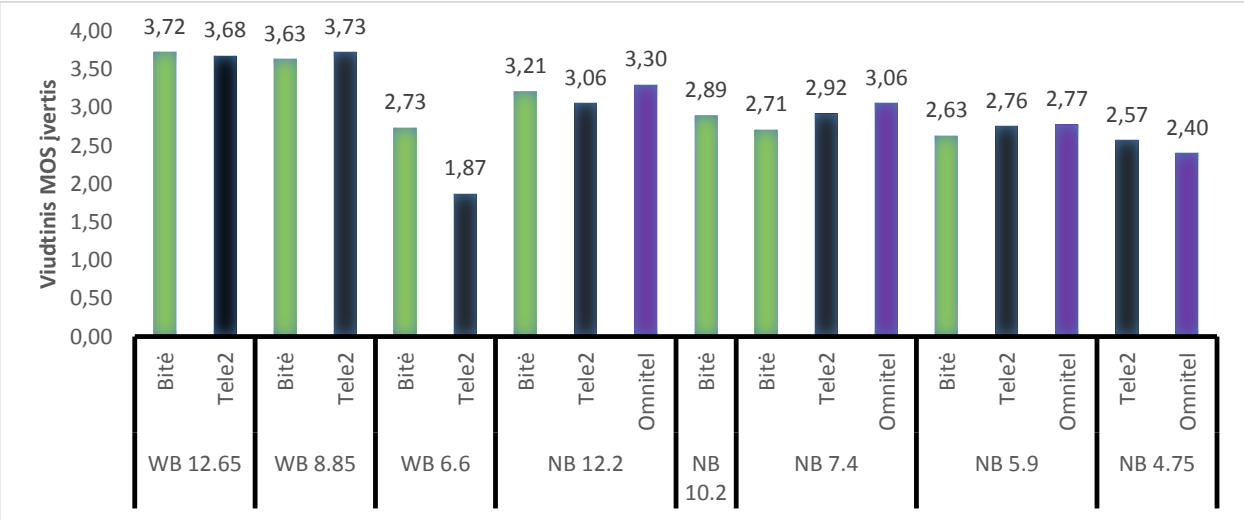
Iš pateiktų duomenų matyti, jog absoliuti dauguma skambučių buvo atlikta UMTS tinkle. Tai galima paaiškinti tuo, jog visų operatorių UMTS tinklo aprėptis matuotuose miestuose yra didesnė nei 90 %. [24] Mobilieji įrenginiai pagal nutylėjimą yra prisijungę prie to tinklo, kurio prioritetas didžiausias. Kadangi skambučiai LTE tinkle neatliekami, telefonai juos inicijuoja UMTS tinkle. Operatoriai gali keisti tinklo parametrus, kurie reguliuoja, kada mobiliajam įrenginiui privalu persijungti iš UMTS tinklo į GSM. Vieni operatoriai taiko mažesnius slenkstinius nustatymus ir į GSM tinklą įrenginiui nurodoma jungtis esant dar patenkinamai UMTS tinklo kokybei, kiti nurodo įrenginiams jungtis į GSM tinklą esant jau visiškai nepatenkinamai UMTS tinklo kokybei. Visi matuoti operatoriai leidžia tik vienpusį persijungimą iš UMTS į GSM tinklą pokalbio metu. Taip norima išvengti *ping-pong* efekto, kai pokalbio metu technologija būtų keičiama daugelį kartų. Tai

sąlygotų kokybės suprastėjimą dėl itin dažnų persijunginėjimų (angl. *handover*). Didžiausiuose miestuose operatoriai dėl ribotos 900 MHz dažnių juostos, UMTS technologijai gali naudoti tik 2100 MHz dažnį. Šio dažnio sklidimo savybės erdvėje yra prastesnės nei 900 MHz, todėl tam tikrose vietose, toliau nuo bazinių stočių, UMTS2100 signalas gali tapti nepatenkinamos kokybės ir telefonas privalės persijungti į GSM tinklą. Iš pateiktų grafikų matyti, kad daugiausiai skambučių (13,2 %) GSM tinkle buvo atlikta *Omnitel* operatoriaus tinkle. Didžiausia vidutinė MOS vertė (3,09) GSM tinkle išmatuota *Tele2* tinkle. *Omnitel* tinkle ši vertė 0,05 mažesnė ir siekė 3,04 balo.

Blogėjant ryšio sąlygoms, tinklas nurodo telefonams persijungti į žemesnės perdavimo spartos kodeko režimą. Taip siekiama išlaikyti kuo geresnę vartotojo patiriamą balso kokybę, kurioje nebūtų nutrūkimų ar kalbos nesupratimo. Operatoriai gali taikyti skirtingus kodekų rinkinius. Kodekų pasiskirstymas ir vidutinis MOS įvertis esant kiekvienam kodekui pavaizduoti atitinkamai 45 pav. ir 46 pav.



45 pav. Skirtingų operatorių tinkluose naudojami kodekai

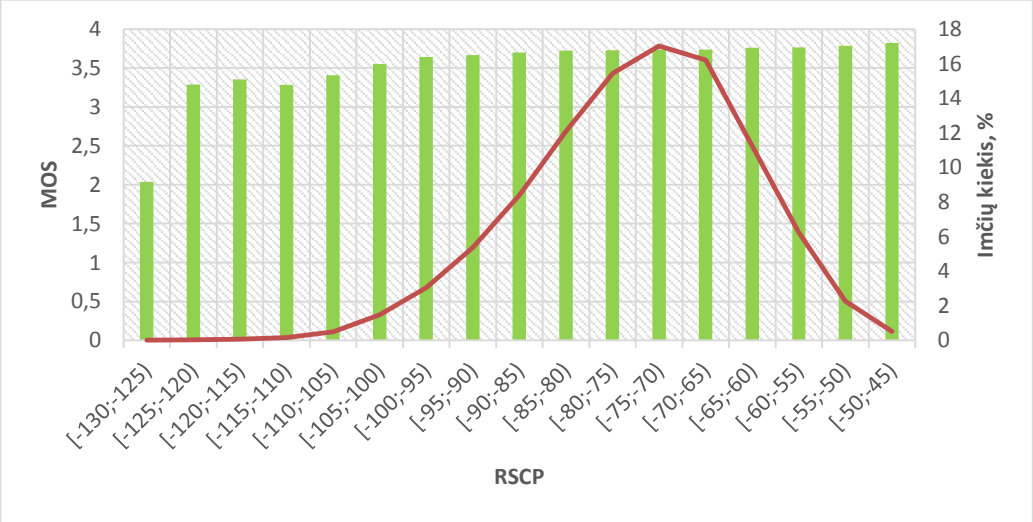


46 pav. Vidutinis MOS įvertis esant skirtingiems kodekams ir operatoriams

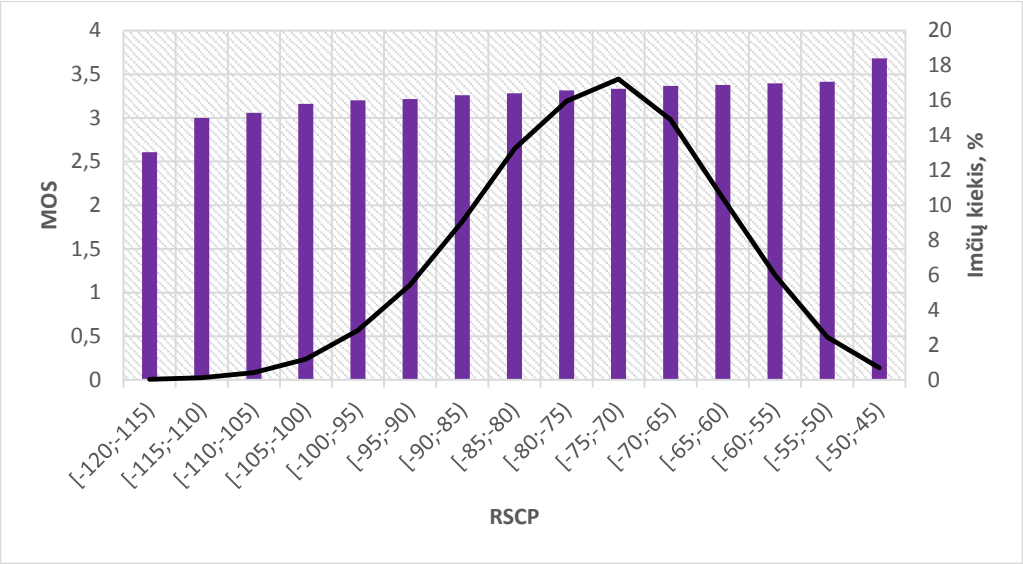
Iš pateiktų grafikų matyti, jog išsiskiria du dominuojantys kodekai: WB 12.65 ir NB 12.2. *Bitės* ir *Tele2* tinkle tai yra WB 12.65, o *Omnitel* – NB 12.2. *Omnitel*, kaip jau minėta anksčiau, nenaudoja *HD* balso paslaugos, kurios esminis veikimas ir priklauso plačiajuosčių *WB* (angl. *wideband*) tipo kodekų aktyvavimo tinkle. Geriausias MOS įvertis gaunamas veikiant pastariesiems kodekams. Kaip matyti iš 45 pav. grafiko, WB 8.85 kodeko vidutinis MOS įvertis yra geresnis nei *NB 12.2*. Verta akcentuoti tai, jog WB tipo kodekai matavimų metu veikė tik UMTS technologijos tinkle. *Tele2* ir *Bitės* GSM tinkle geriausias įmanomas kodekas galėjo būti – *NB 12.2*. Iš surinktų duomenų galima teikti, kad *Bitės* ir *Tele2* UMTS tinkluose aktyvuoti šie kodekai: *WB 12.65, WB 8.85, WB 6.6, NB 12.2. Omnitel* UMTS tinkle aktyvuotas tik NB 12.2 kodekas. Kiek kitokia situacija GSM tipo tinkluose. *Omnitel* ir *Tele2* GSM tinkle aktyvuoti šie kodekai: NB 12.2, NB 7.4 , NB 5.9, NB 4.75, o *Bitės* − NB 12.2, NB 10.2, NB 7.4, NB 5.9. Skirtingų kodekų rinkinių aktyvavimą gali lemti įrangos gamintojų rekomendacijos ar testavimų metu gauti rezultatai. Visi trys operatoriai naudoja skirtingą radijo dalies įrangą. *Bitės* tinkle naudojama *Ericsson*, *Omnitel – Huawei*, o *Tele2 – Nokia*.

6.3. UMTS tinklo parametrai, lemiantys MOS įvertį

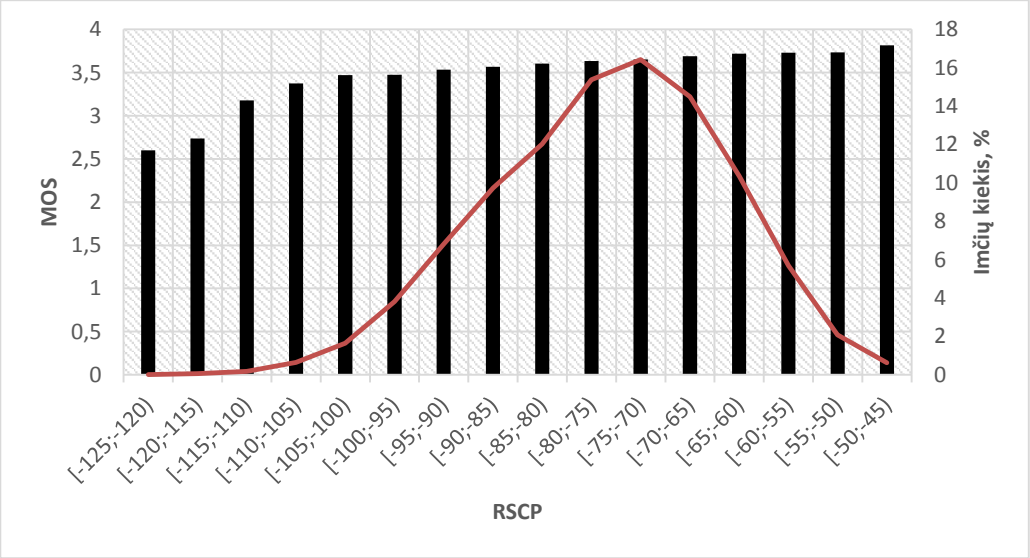
Kaip jau minėta ankstesniame skyrelyje, matavimai buvo atliekami UMTS ir GSM tinkluose. Šiame skyrelyje analizuojama kaip MOS įvertis priklauso nuo UMTS tinklo parametrų. Prie tokių pagrindinių parametrų galima priskirti: RSCP, E_c/N_0, BLER. Grafikuose pateiktuose 47−49 pav. vaizduojama skirtingų operatorių MOS priklausomybė nuo RSCP (angl. *Received Signal Code Power*). RSCP arba priimto signalo kodo galia suprantamas kaip mobiliojo įrenginio priimtas tam tikros ląstelės pilotinio kanalo lygis išreikštas dBm. Šis parametras dažnai naudojamas palyginti skirtingų ląstelių pilotinius signalus. Ši informacija naudojama atliekant perjungimus tarp ląstelių ar skirtingų technologijų. RSCP matuojamas žemynkrypčiame kanale. Šią informaciją mobilusis įrenginys specialiu pranešimu perduoda bazinei stočiai, o ši radijo tinklo valdikliui (RNC).



47 pav. MOS priklausomybė nuo RSCP *Bitės* tinkle



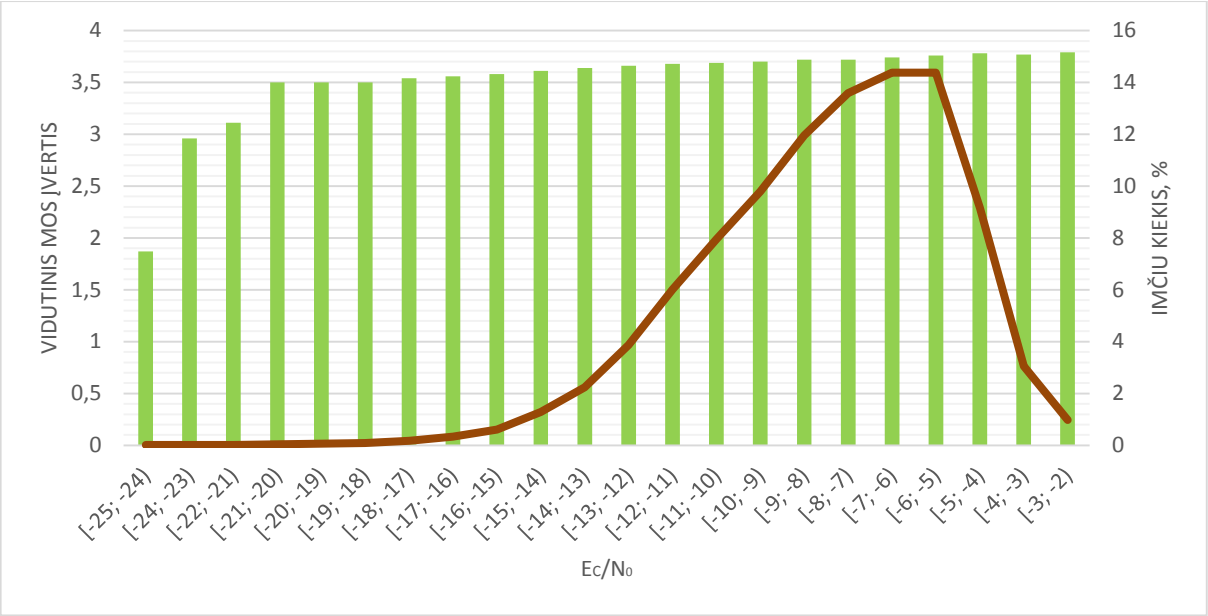
48 pav. MOS priklausomybė nuo RSCP *Omnitel* tinkle



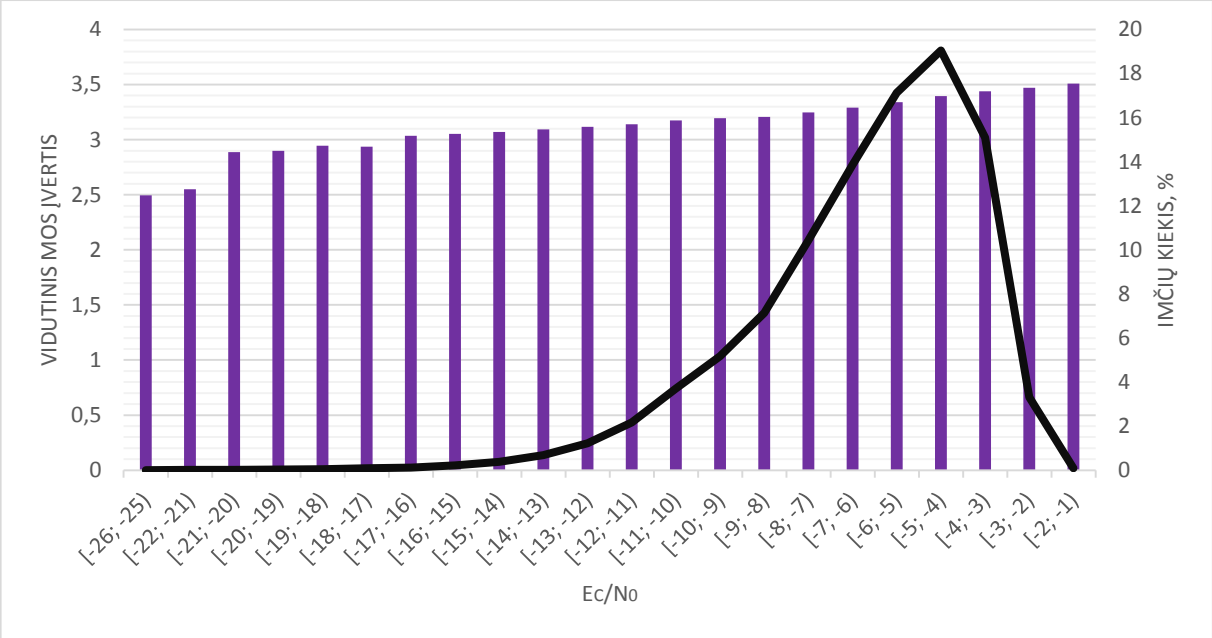
49 pav. MOS priklausomybė nuo RSCP *Tele2* tinkle

Grafikai puikiai iliustruoja, jog ryškios koreliacijos tarp RSCP ir MOS nėra. Balso kokybė ima sparčiai mažėti pasiekus ribines RSCP vertes, kurios yra nuo -120 dBm. Dažniausiai operatoriai ties šia ar aukštesne RSCP verte nurodo mobiliajam įrenginiui persijungti į GSM tinklą, jog būtų išvengta balso ar duomenų perdavimo kokybės suprastėjimo. Taip pat matyti, jog daugiausiai matavimų atlikta esant labai geram RSCP lygiui.

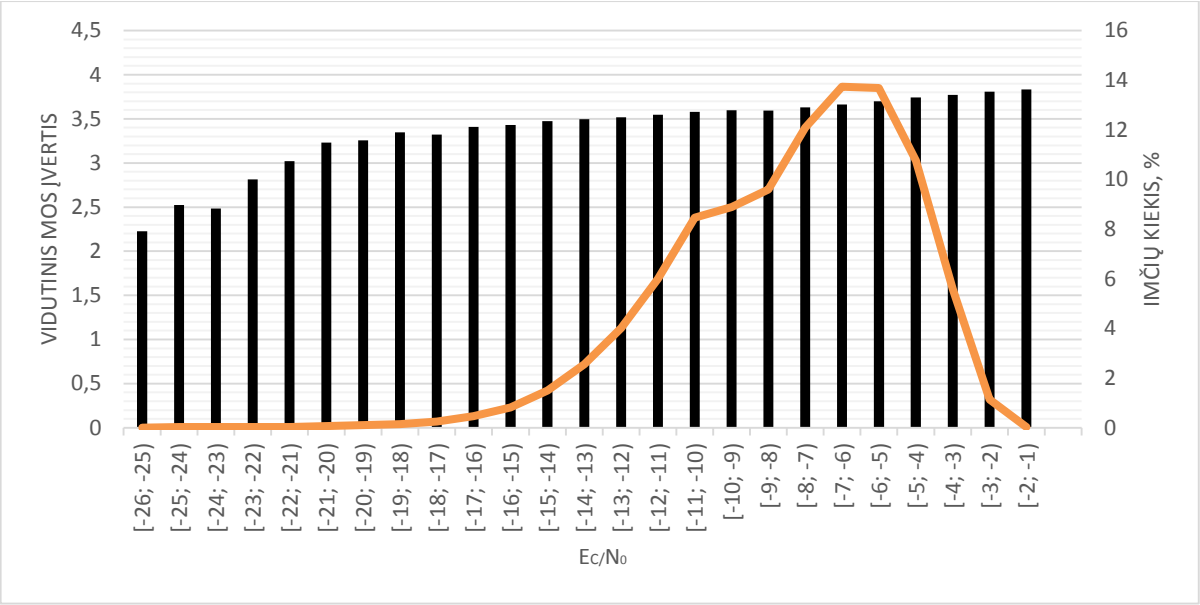
Kitas, glaudžiai su RSCP susijęs parametras – Ec/N_0. Tai priimtos pilotinio kanalo (CPICH) čipo energijos (Ec) santykis su bendru visus juosto galios tankiu (N_0). Ec/N_0 ir RSCP yra susiję santykiu: Ec/N_0 (dBm) = RSCP (dBm)/ RSSI (dBm). MOS nuo Ec/N_0 priklausomybės grafikai pavaizduoti 50−52 pav. esančiuose grafikuose.



50 pav. MOS priklausomybė nuo Ec/N0 *Bitės* tinkle



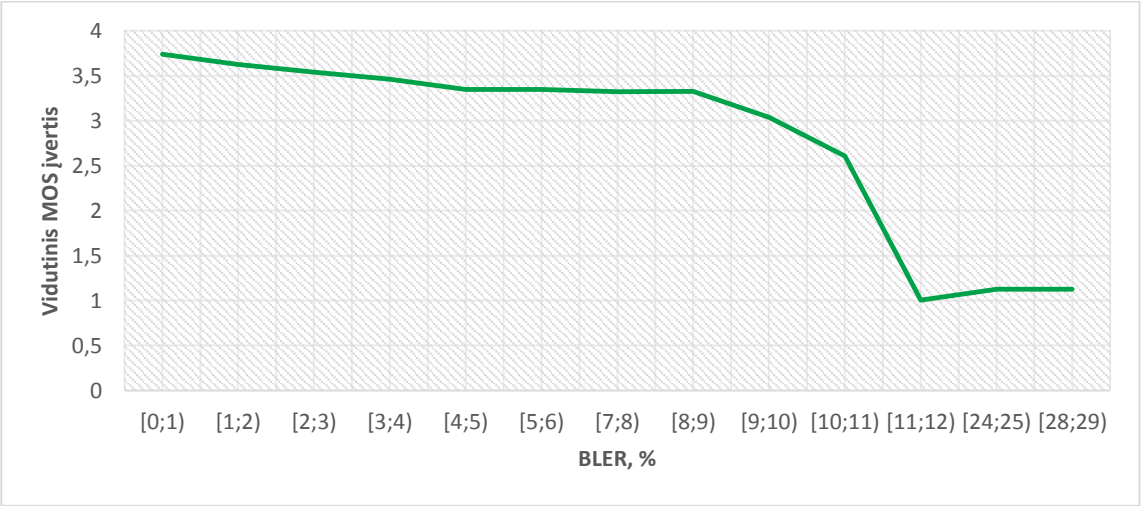
51 pav. MOS priklausomybė nuo Ec/N0 *Omnitel* tinkle



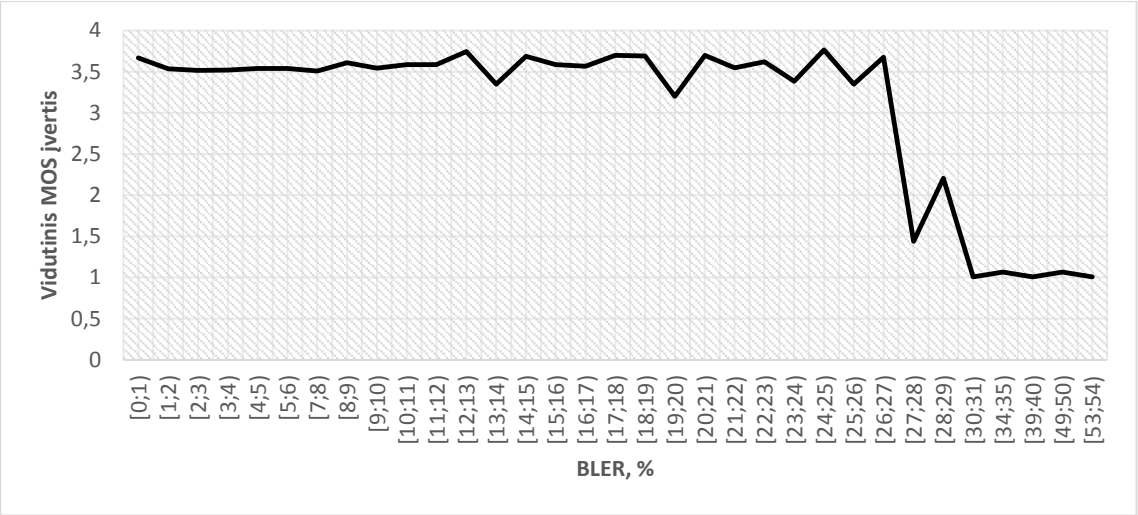
52 pav. MOS priklausomybė nuo Ec/N0 *Tele2* tinkle

Iš pateiktų priklausomybių matyti, jog MOS vertė labiausiai mažėja esant ypatingai žemam Ec/N_0. Tik pasiekus mažesnę nei -22 dB Ec/N_0 reikšmę, kokybė suprastėja iki mažesnio nei 2,5 MOS įverčio. Toks Ec/N_0 realiomis sąlygomis yra labai retai sutinkamas, kadangi dažniausiai tinklas blogu Ec/N_0 laiko -15 dBm reikšmę, ties kuria priima sprendimą perjungti mobilųjį į kitą ląstelę arba technologiją. Gerą visų operatorių Ec/N_0 lygį matavimų metu nurodo imčių skaičius iš atitinkamų intervalų. Daugiausiai imčių visų operatorių tinkluose buvo iš intervalo (-15;-3) dBm.

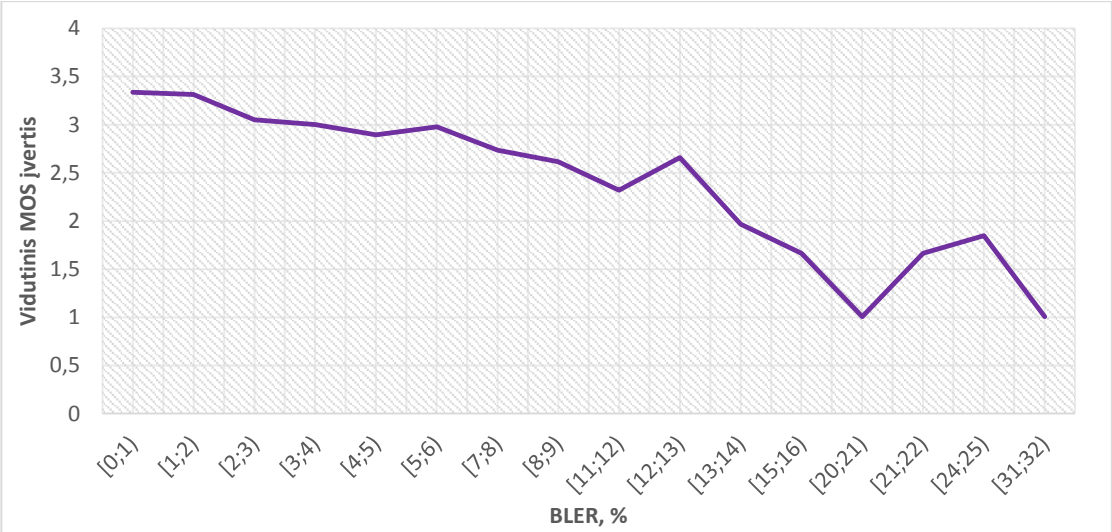
Apie kokybišką duomenų perdavimą UMTS tinkle galima spręsti iš BLER (angl. *Block Error Ratio*) parametro. BLER parametro matavimą atlieka mobilusis įrenginys. Šis parametras nurodo, kiek procentų iš visų perduotų duomenų blokų buvo priimta klaidingai. Apie priimtus klaidingus blokus tinklas informuojamas specialiu pranešimu. Gavęs tokį pranešimą tinklas bando kartoti klaidingai mobiliojo įrenginio gautus duomenų blokus. MOS priklausomybė nuo BLER pavaizduota 53−55 pav. esančiuose grafikuose.



53 pav. MOS priklausomybė nuo BLER *Bitės* tinkle



54 pav. MOS priklausomybė nuo BLER *Tele2* tinkle



55 pav. MOS priklausomybė nuo BLER *Omnitel* tinkle

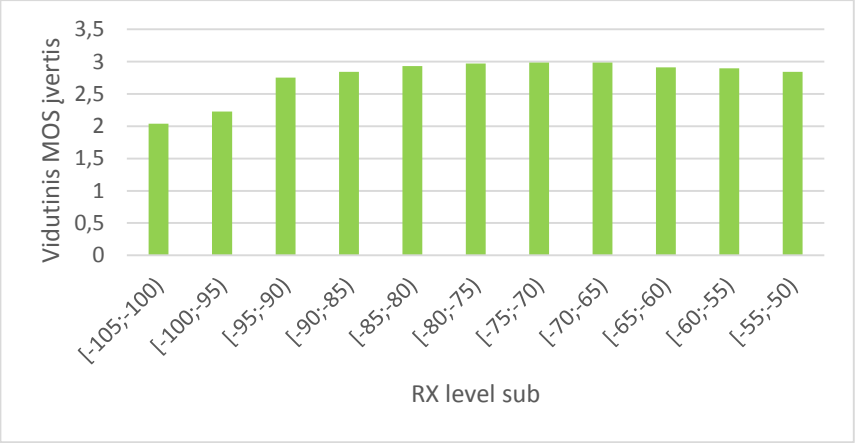
Iš išmatuotų reikšmių matyti, jog *Bitės* ir *Omnitel* tinkle balso kokybė ima ženkliai mažėti pasiekus 13 % ir didesnį BLER. Tele2 atveju, ženklus MOS kokybės mažėjimas pastebimas esant 27 % ir didesniam BLER santykiui. Literatūroje teigiama, kad priimtinas BLER yra 10 %. Nuo didesnio BLER kokybė ima mažėti. Nepatenkinama BLER reikšmė įvairiuose šaltiniuose įvardijama kaip 30−40 % [25]. Iš aukščiau pateiktų rezultatų, akivaizdu, kad MOS įvertis koreliuoja su BLER.

6.4. GSM tinklo parametrai, lemiantys MOS įvertį

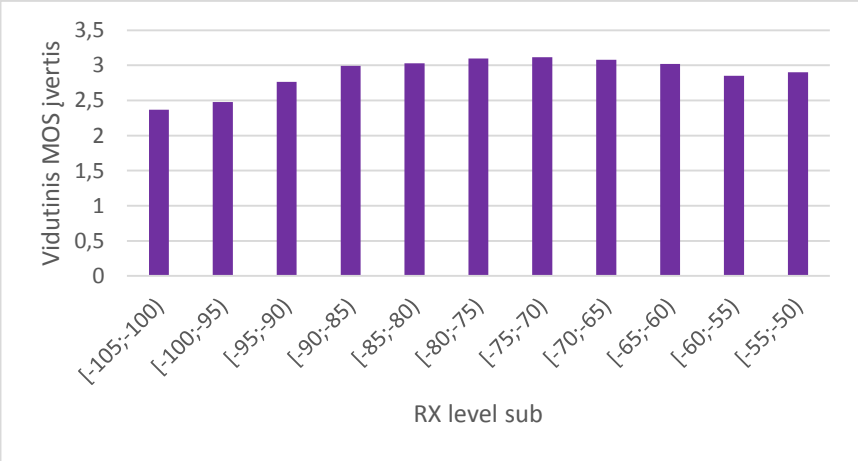
Šiame skyrelyje aptariami labiausiai MOS įvertį GSM tinkle lemiantys parametrai. Prie tokių parametrų galima priskirti *RX level sub bei RX quality sub*. *RX level* parametras nurodo mobiliojo įrenginio priimtą signalo lygį, o *RX quality* – signalo kokybę. *RX quality* siejamas su BER (angl. *bit error rate*). Mobilusis įrenginys atlieka matavimus laiko intervalo (angl. *timeslot*) 26 bitų *training* skiltyje. Šie matavimai vyksta 480 ms intervalais, o rezultatai siunčiami SACCH (angl. S*low*

Associated Control Channel) kanalu. Iš viso *RX quality* matavimas galimas 104 TDMA kadruose, tačiau praktikoje dažniausiai naudojami 100 kadrų, neįtraukiant 4 *idle* tipo kadrų. Išmatuota reikšmė yra suvidurkinta visų kadrų BER vertė, sureitinguota skalėje nuo 0 iki 7. Geriausią kokybė nurodo reikšmė su verte 0, blogiausią – 7.

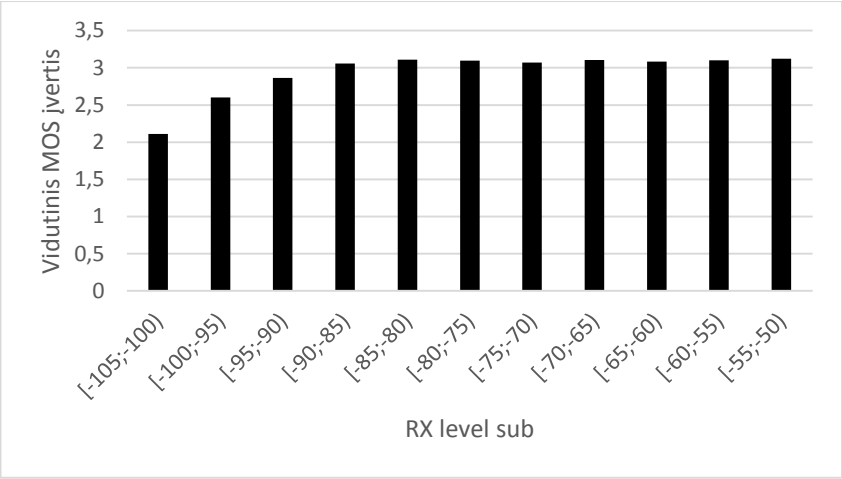
Matuojami parametrai su poaibiu *sub* (angl. *subset*) pasirinkti ne atsitiktinai. Visų operatorių tinkluose naudojama DTX opcija, kuri suteikia galimybę nesiųsti jokios informacijos nesant aktyvios kalbos. Pašnekovas tokiu metu girdi pašalinį, specialiai kuriamą komfortišką triukšmą, tam jog jaukiai jaustųsi. Todėl pasirinkus ne *sub*, o *FULL* matavimą jis būtų ne tikslus, kadangi visuose pokalbiuose apie 40−60 % laiko būna tylos intervalai. Gauta *RX quality FULL* vertė būtų aukšta ir nurodytų prastą BER, neatspindintį realios situacijos. Tokiu atveju, kai tinkle naudojamas DTX, daug tikslingiau remtis *sub* parametrais. Šie matavimai atliekami panaudojant 12 kadrų (4 SACCH + 8 SID), kurie yra visada perduodami nepriklausomai ar naudojamas DTX ar ne [26]. Toliau pateiktuose 56−58 grafikuose vaizduojama MOS parametro priklausomybė nuo *RX level sub*.



56 pav. MOS priklausomybė nuo *RX level sub Bitės* tinkle

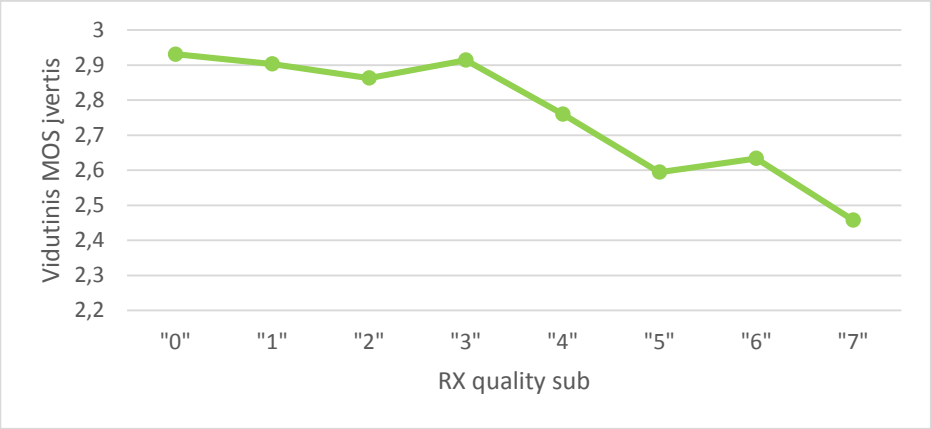


57 pav. MOS priklausomybė nuo *RX level sub Omnitel* tinkle

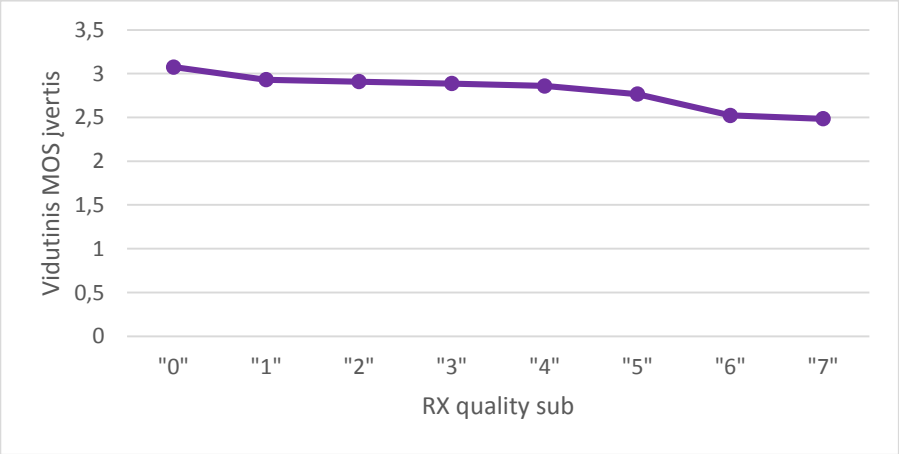


58 pav. MOS priklausomybė nuo *RX level sub Tele2* tinkle

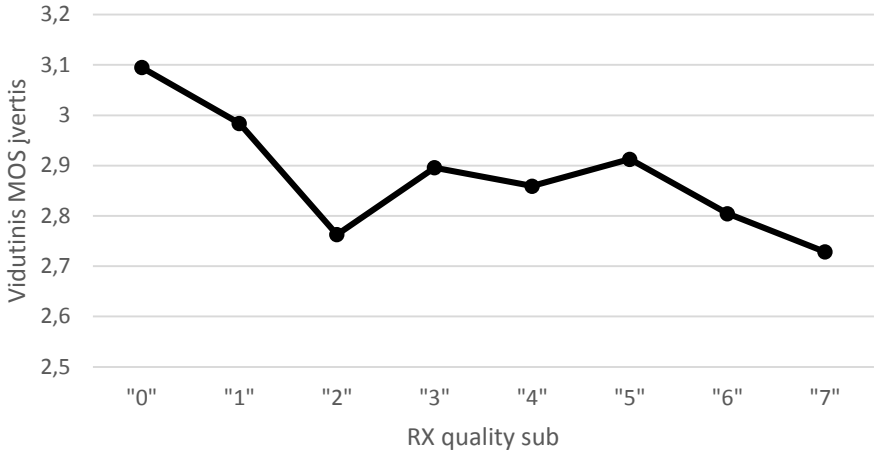
Iš pateiktų grafikų matyti, jog esant žemam signalo lygiui, kokybė pastebimai mažėja. Signalo lygis žemesnis nei -95 dBm sąlygoja žemesnį nei 3 MOS įvertį visų operatorių tinkluose. Toliau pateiktos MOS ir *RX quality sub* priklausomybės.



59 pav. MOS priklausomybė nuo RX quality sub *Bitės* tinkle



60 pav. MOS priklausomybė nuo RX quality sub *Omnitel* tinkle



61 pav. MOS priklausomybė nuo RX quality sub *Tele2* tinkle

Aukščiau pateikti 59−61 pav. grafikai iliustruoja, kad priimamoms signalo kokybės įverčiui esant 5 ir didesniam, MOS įvertis pastebimai mažėja ir artėja ties 2 MOS riba. Galima teigti, kad signalo kokybė ir MOS koreliuoja.

Toliau pateiktoje 10 lentelėje nurodyti gautų MOS verčių koreliacijos koeficientai. Koreliacijos koeficientai apskaičiuoti nurodytiems GSM ir UMTS tinklų parametrams.

10 lentelė. MOS priklausomybė nuo 2G ir 3G tinklų parametrų

MOS lemiantis parametras		Insertion gain	E_c/N_0	BLER	RSCP	Delay	AQ SNR	RX quality sub	RX level sub
Koreliacijos koeficientas	***Bitė***	0,73	0,11	0,13	0,10	0,18	0,25	0,12	0,02
	Omnitel	0,50	0,28	0,19	0,17	0,14	0,37	0,20	0,11
	Tele2	0,48	0,18	0,10	0,16	0,02	0,29	0,11	0,04

Iš lentelėje pateiktų koreliacijos koeficientų akivaizdu, jog MOS įvertį labiausiai lemia *Insertion gain* parametras. Šio parametro koreliacijos koeficientas didžiausias visų operatorių tinkluose. UMTS tinkle MOS įvertis daugiausiai koreliuoja su E_c/N_0 parametru, o GSM tinkle − *RX quality sub*. Kiti GSM ir UMTS tinklo parametrai nebuvo vertinami dėl itin mažo koreliacijos koeficiento arba dėl matavimo įrangos apribojimų.

IŠVADOS

1. Remiantis Lietuvos ir užsienio operatorių duomenimis, AMR-WB kodeko naudojimas įrenginiuose pastaruoju metu didėja. AMR-NB ir AMR-WB tipo kodekų įdiegimui GSM ir UMTS tinkluose reikalinga, jog tinkle būtų aktyvuoti TFO arba TrFO protokolai. Galima paminėti, kad TrFO daugiau taikomas 3G tipo tinkluose, o TFO – 2G tipo tinkluose.
2. POLQA – naujausias standartizuotas balso kokybės matavimo mobiliuose tinkluose standartas. Šio standarto privalumai prieš PESQ – skirtingų matavimų skalių naudojimas, platesnis skirtingų kodekų suderinimas, plačiajuosčių kodekų vertinimo galimybė.
3. Atlikti Lietuvos mobiliųjų tinklų operatorių *Bitė Lietuva*, *Omnitel* ir *Tele2* balso kokybės matavimai dešimtyje didžiausių Lietuvos miestų pagal gyventojų skaičių parodė, jog didžiausias vidutinis MOS įvertis (3,67) gautas *Bitė Lietuva* tinkle. *Tele2* ir *Omnitel* tinkluose gauti įverčiai atitinkamai 3,6 ir 3,28. Vertinant tik penkis didžiausius miestus matyti, jog Vilniuje, Kaune ir Klaipėdoje išmatuota didžiausia vidutinė MOS vertė buvo *Bitė Lietuva* tinkle, o Klaipėdoje ir Šiauliuose – *Tele2*. *Omnitel* tinkle vidutinis MOS įvertis visuose miestuose buvo mažiausias. Mažiausią *Omnitel* MOS įvertį lėmė, jog tinkle neaktyvuoti AMR-WB kodekai. Matavimai buvo atliekami naudojant POLQA metodą, o vertinant pasirinkta SWB vertinimo skalė. Iš matavimų metu surinktų duomenų, akivaizdu, jog greičiausias skambučio inicijavimo laikas išmatuotas *Omnitel* tinkle. Pagrindinis veiksnys lėmęs *Omnitel* greitesnį skambučio inicijavimo laiką − tinkle aktyvuota *Call in Progress Tone* savybė.
4. Atlikti tyrimai parodė, jog vidutinis WB 8.85 kodeko MOS įvertis didesnis nei NB 12.2. Taip pat nustatyta, jog *Tele2* ir *Bitės* UMTS tinkluose sutinkami WB 12.65, WB 8.85, WB 6.6, NB 12.2 kodekai, o *Omnitel* tinkle − NB 12.2. Gauti rezultatai leidžia teigti, kad 93,1 % visų imčių *Bitės* tinkle buvo gauta naudojant UMTS technologiją. *Tele2* ir *Omnitel* tinkluose šie skaičiai atitinkamai buvo 92 % ir 86,8 %.
5. Labiausiai MOS parametrą lemia *Insertion gain* parametras. Minėto parametro ir MOS koreliacijos koeficientas priklausomai nuo operatoriaus siekė 0,48–0,73. Akivaizdu, kad esant net itin blogoms ryšio signalo sąlygoms, galima priimti geros kokybės balso signalą. Tai parodo itin maži koreliacijos koeficientai tarp MOS ir UMTS bei GSM tinklų parametrų. Ryšio sąlygoms tapus visiškai nepatenkinamomis, pastebimas ženklus vidutinis MOS įverčio mažėjimas.
6. Iš gautų rezultatų galima teigti, kad AMR-WB kodekų naudojimas UMTS tinkle akivaizdžiai pagerina vartotojo patiriamą balso kokybę. Operatoriai naudojantys šiuos kodekus tinkle sugeba užtikrinti aukštesnės kokybės balso paslaugas vartotojams.

LITERATŪRA

1. *Ericsson Mobility Report Appendix November 2014* [interaktyvus]. 2014. ERICSSON [žiūrėta 2015 m. sausio 9 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ericsson.com/res/docs/2014/emr-november2014-regional-appendices-europe.pdf>.

2. Jarvinen, K. 2001. GSM and UMTS: The Creation of Global Mobile Communication. Singapure: John Wiley & Sons Ltd.

3. *3G TR 26.975 ver. 1.1.0 Performance Characterization of the AMR Speech Codec*. France, 2000. 46 p.

4. Koistinen, T. Voice Coding in 3G Networks [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 m. gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38130/k01/Papers/Koistinen -VoiceCoding.pdf>.

5. *Evolved HD voice for LTE* [interaktyvus]. 2014. ERICSSON [žiūrėta 2015 m. gegužės 25 d.]. Prieiga per internetą: < http://www.ericsson.com/news/141003-evolved-hd-voice-for-lte-a-new-mobile-voice-experience_244099435_c>.

6. Birkehammar, C; Bruhn, S; Eneroth, P; Hellwig, K and Johansson, S. 2006. New high-quality voice service for mobile networks [interaktyvus]. [žiūrėta 2015 m. gegužės 25 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ericsson.com/ericsson/corpinfo/publications/review/2006_03/02.shtml>.

7. Avsar, A. 2013. *Different mechanisms for feedback based control of operating modes and TFO/TrFO*: Summary of Master Thesis. Technikum Wien. Viena. 84 p.

8. *Open Issues for TrFO-TFO Harmonisation* [interaktyvus]. 2000. ERICSSON [žiūrėta 2015 m. gegužės 25 d.]. Prieiga per internetą: <ftp://www.3gpp.org/tsg_cn/TSG_CN/TSGN_08/tdocs/PDF/NP-000374.pdf>.

9. *AQM in TEMS Products (Including PESQ and POLQA)* [interaktyvus]. 2012. ASCOM [žiūrėta 2015 m. gegužės 30 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.ascom.com/nt/en/index-nt/nt-about-us-resources/tems-white-papers.htm>.

10. *Mobile HD voice: Global Update report.* [interaktyvus]. 2015. GSA [žiūrėta 2016 m. gegužės 15 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.aeta-audio.com/fileadmin/downloads/pdf_uk/GSA_mobile_hd_voice.pdf>.

11. *Recommendation P.862: Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs*. Geneva, 2001. 14 p.

12. *Recommendation P.863 : Perceptual objective listening quality assessment*. Geneva, 2011. 9 p.

13. *Perceptual Objective Listening Quality Analysis* [interaktyvus]. 2010. POLQA Coalition [žiūrėta 2015 m. gegužės 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php /67075/mod_forum/attachment/167487/POLQA_White_Paper_0710.pdf>.

14. Partila, P; Kohut, M; Voznak, M; Mikulec, M; Safarik, J; Tomala, K. 2013. A Methodology for Measuring Voice Quality Using PESQ and Interactive Voice Response in the GSM Channel Designed OpenBTS [interaktyvus]. VSB–Technical University of Ostrava. [žiūrėta 2015 m. gegužės 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/101400/894-5026-1-PB-partila.pdf?sequence=1>.

15. Stapleton, O; Melvin, H; Pocta, P. Quantifying the effectiveness of PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality), in copingwith frequent time shifting [interaktyvus]. University of Žilina. [žiūrėta 2015 m. gegužės 29 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.academia .edu/3510816/ Quantifying_the_effectiveness_of_PESQ_Perceptual_Evaluation_of_Speech_Quality_in_coping_with_frequent_time_shifting>.

16. Guršnys, D. 2008. *Balso kokybės vertinimo metodai ir priemonės mobiliojo ryšio sistemoms*: daktaro disertacija. Vilnius:Technika. 82 p.

17. Stankevičius. E. 2013. Balso kokybė mobiliojo ryšio sistemose, *MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS* 5(2): 150–154.

18. Hines, A; Skoglund, J; Kokaram, A; Harte, N. Robustness of Speeh Quality Metrics to Background Noise and Network Degradations: Comparing VISQOL, PESQ AND POLQA. [žiūrėta 2015 m. birželio 1 d.]. Prieiga per internetą: <http://static.googleusercontent.com/media/research. google.com/lt//pubs/archive/41218.pdf>.

19. *Recommendation E.180: VARIOUS TONES USED IN NATIONAL NETWORKS.* Geneva, 2003. 31 p.

20. *Latency and QoS for Voice over IP Analysis* [interaktyvus]. 2004. SANS Institute [žiūrėta 2016 m. balamdžio 30 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.sans.org/reading-room/whitepapers /voip/latency-qos-voice-ip-1349>.

21. *Quality of Service for Voice over* [interaktyvus]. 2001. CISCO [žiūrėta 2016 m. balamdžio 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/ios/solutions_docs/qos_solutions/ QoSVoIP/QoSVoIP.pdf>.

22. *3GPP TS 26.131 version 11.0.0 Release 11: Terminal acoustic characteristics for telephony;*

Requirements. France, 2012. 41 p.

23. Rahnema, M. 2008. UMTS Network Planning, Optimization, and Inter-Operation with GSM. . Singapure: John Wiley & Sons Ltd.

24. *Judriojo ryšio tinklų tikėtinos aprėpties zonos* [interaktyvus]. 2016. RRT [žiūrėta 2016 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://epaslaugos.rrt.lt/apreptis/>.

25. Del Ser, J. 1998. Mobile Lightweight Wireless Systems. Bilbao: ICST. 70-80.

26. *Optimizing Your GSM Network Today and Tomorrow* [interaktyvus]. 2001. Agilent [žiūrėta 2016 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5980-2828EN.pdf.>.

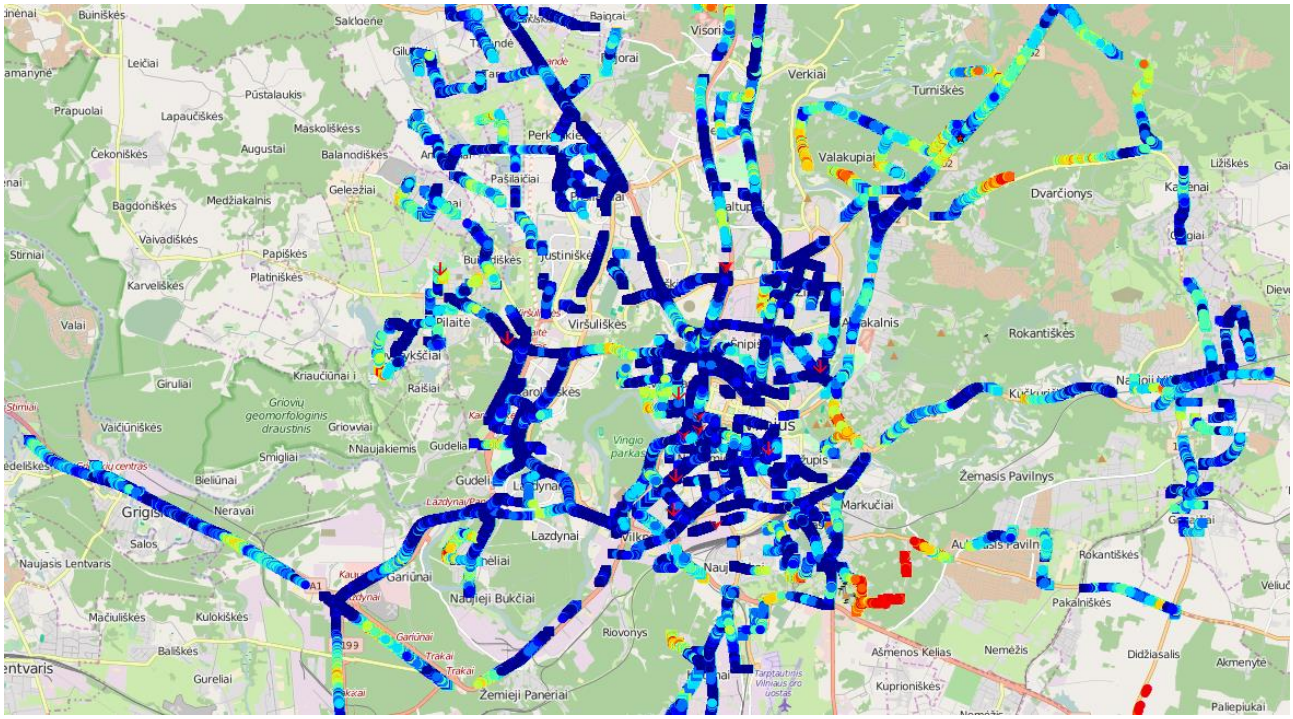
27. *The Adaptive Multirate Wideband Speech Codec (AMR-WB)* [interaktyvus]. 2002. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing [žiūrėta 2016 m. gegužės 5 d.]. Prieiga per internetą: <https://www.researchgate.net/publication/3333904.>.

28. Werner, M; Vary, P.Speech Quality Improvement in UMTS by AMR Mode Switching. [žiūrėta 2016 m. gegužės 1 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.iks.rwth-aachen.de/fileadmin/ publications/werner02.pdf>.

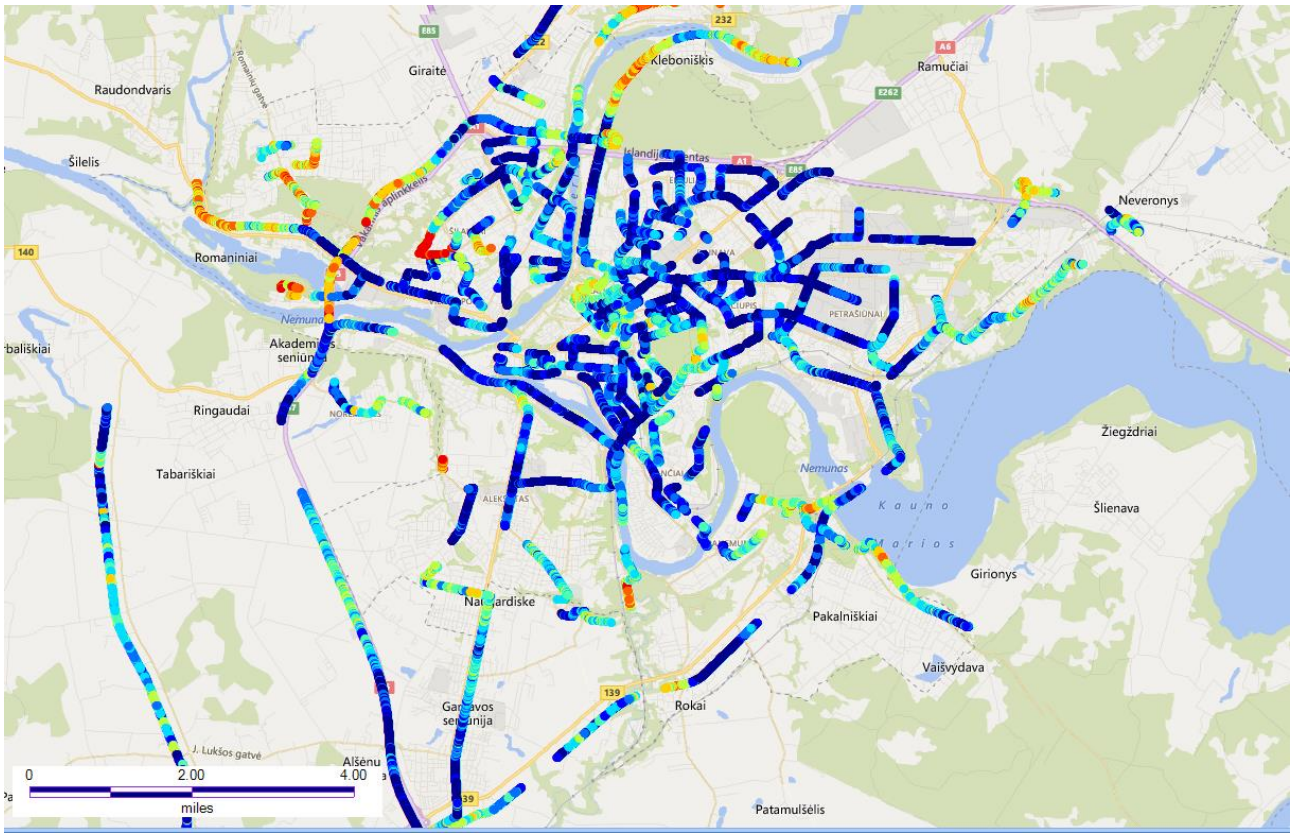
29. *All Features in MSC-S 16A.* 2016. Ericsson.

PRIEDAI

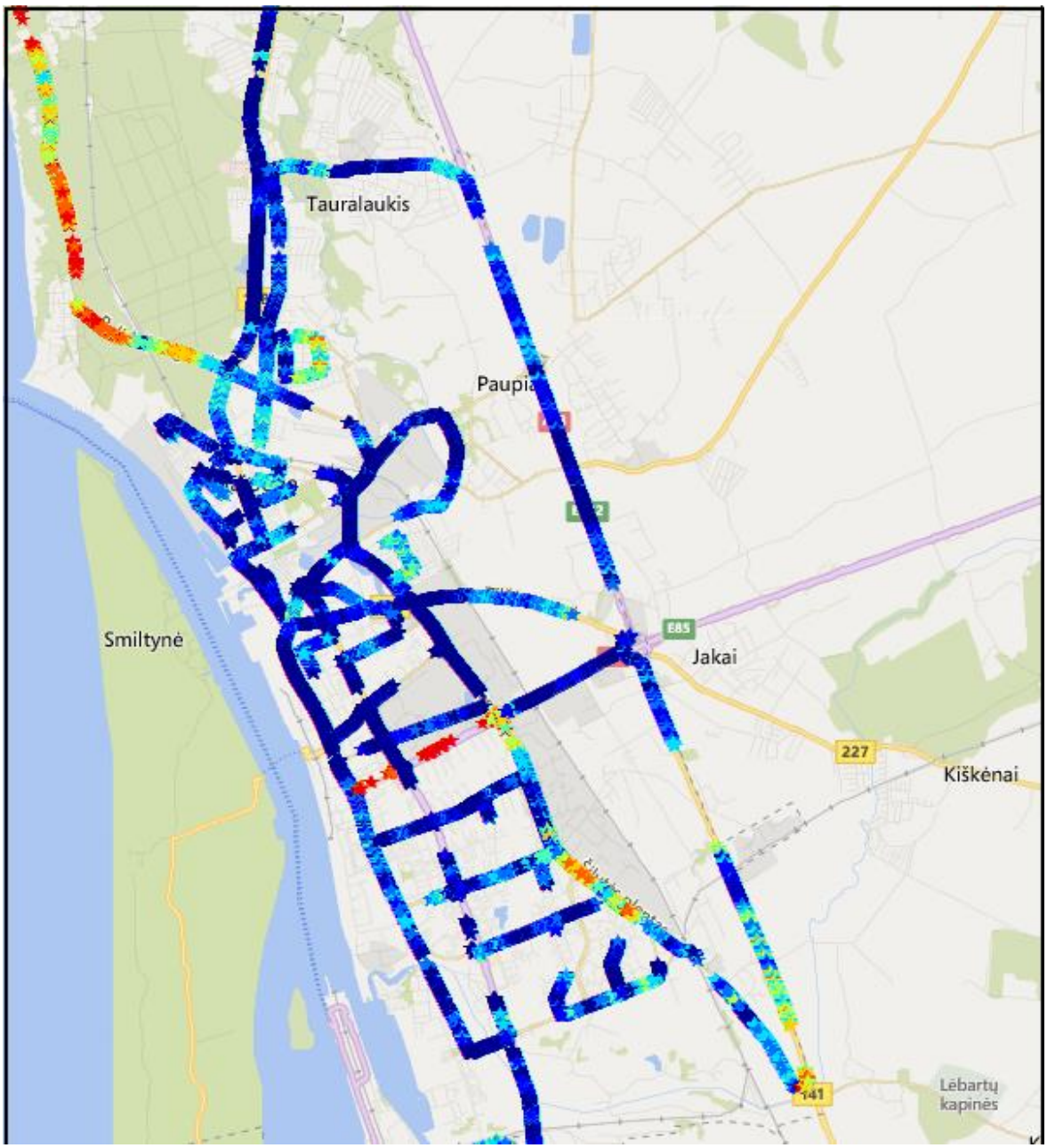
A priedas. Matavimų aprėpties ribos dešimtyje didžiausių Lietuvos miestų



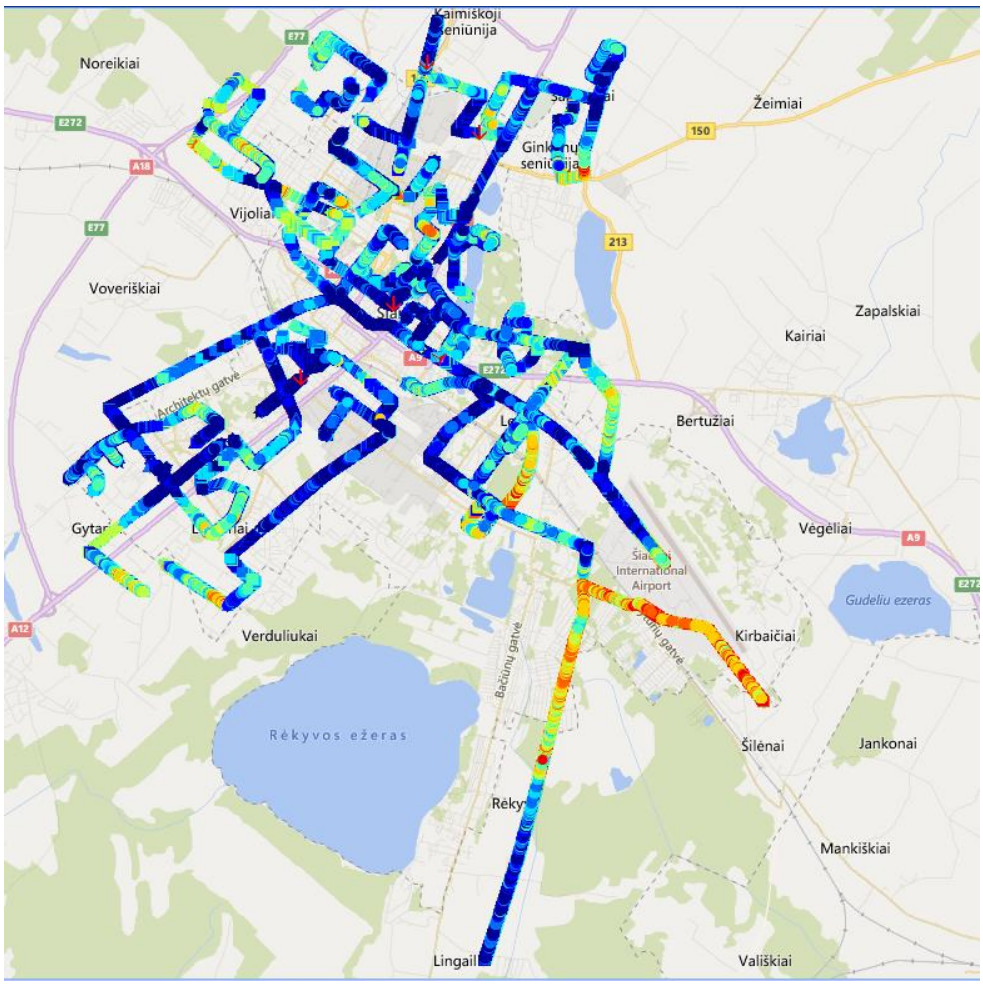
A.1 pav. Matavimų aprėpties ribos Vilniuje



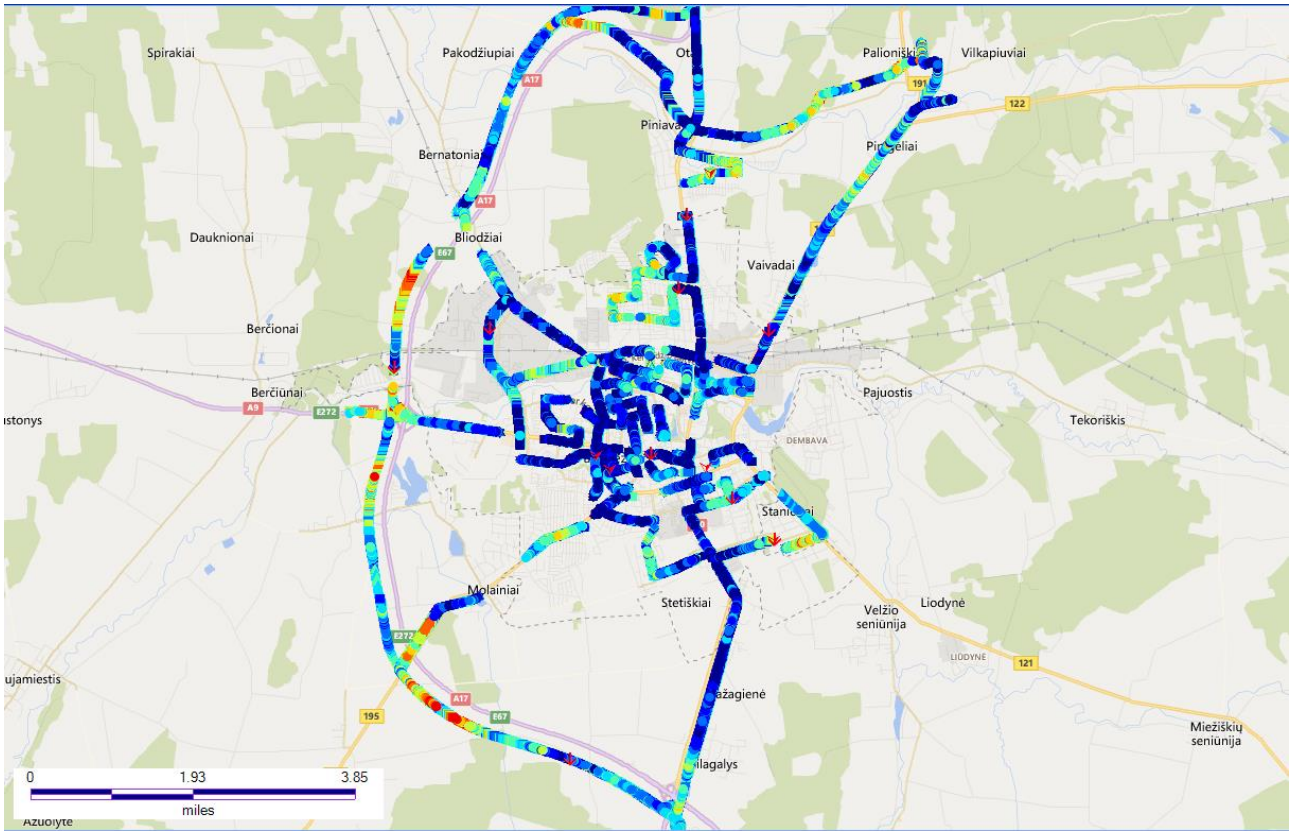
A.2 pav. Matavimų aprėpties ribos Kaune



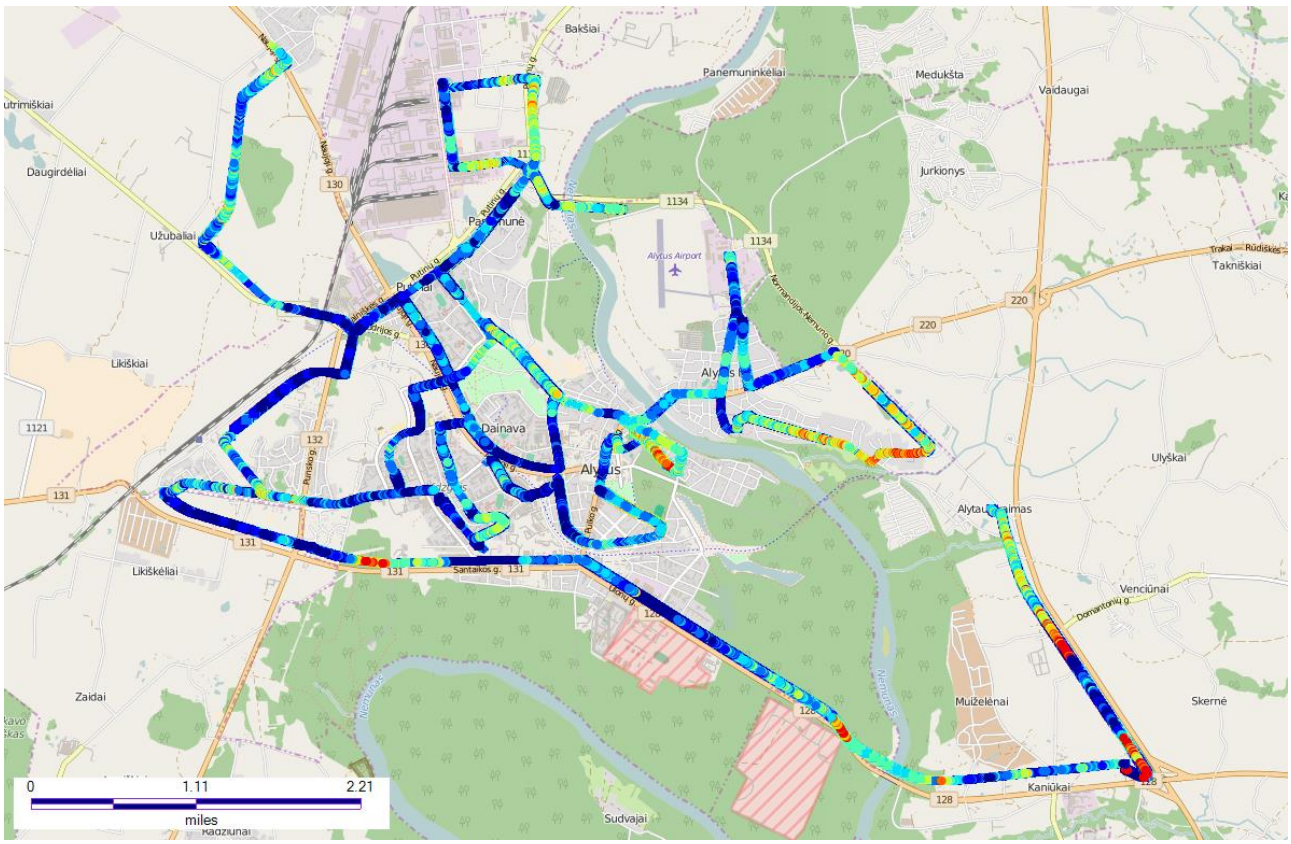
A.3 pav. Matavimų aprėpties ribos Klaipėdoje



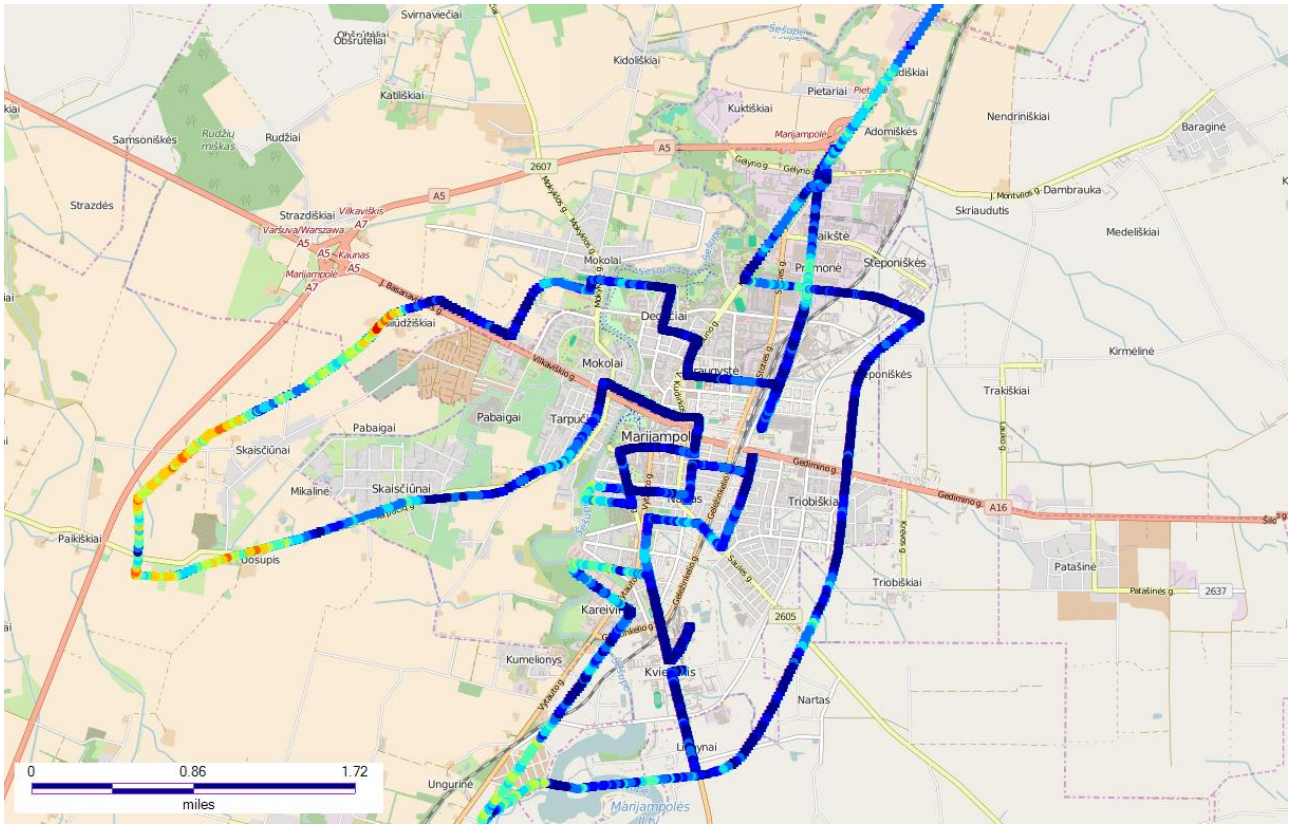
A.4 pav. Matavimų aprėpties ribos Šiauliuose



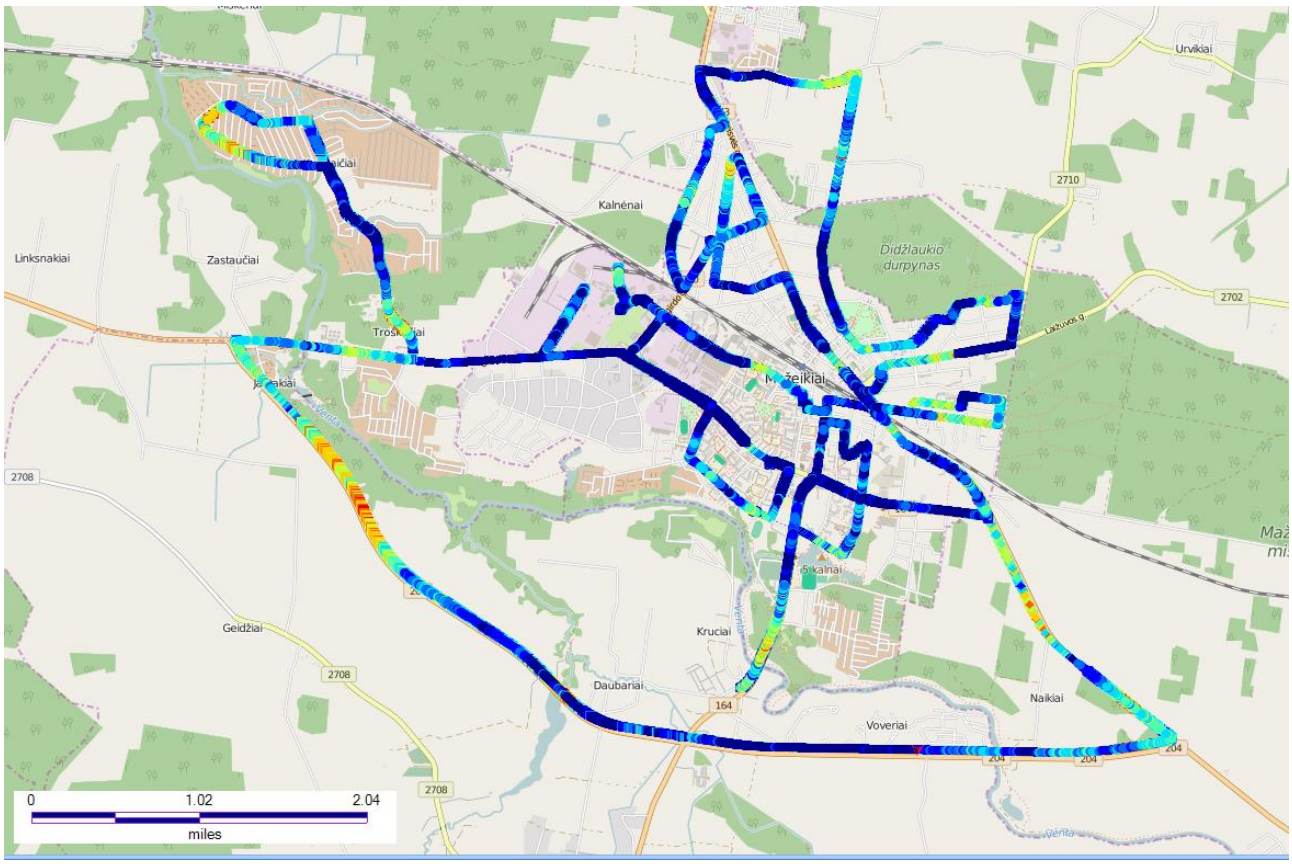
A.5 pav. Matavimų aprėpties ribos Panevėžyje



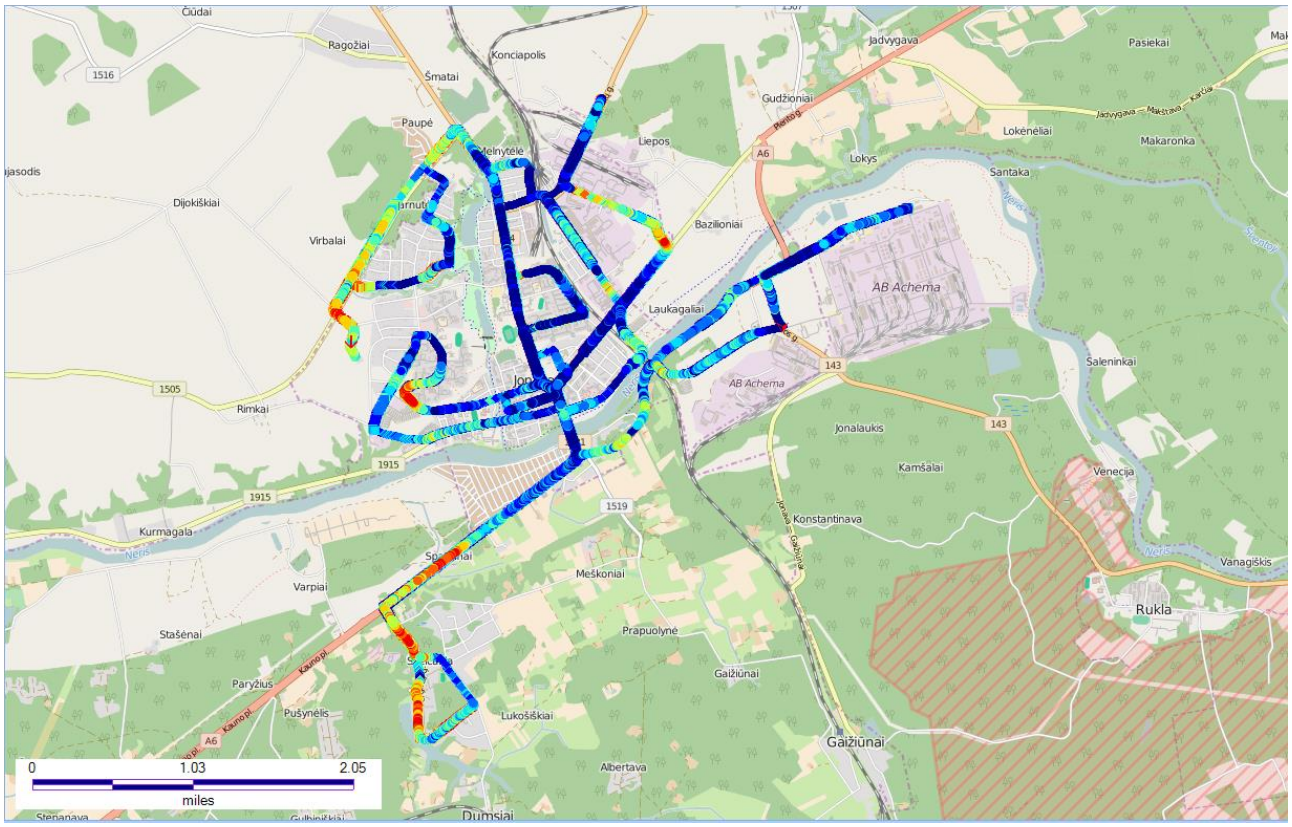
A.6 pav. Matavimų aprėpties ribos Alytuje



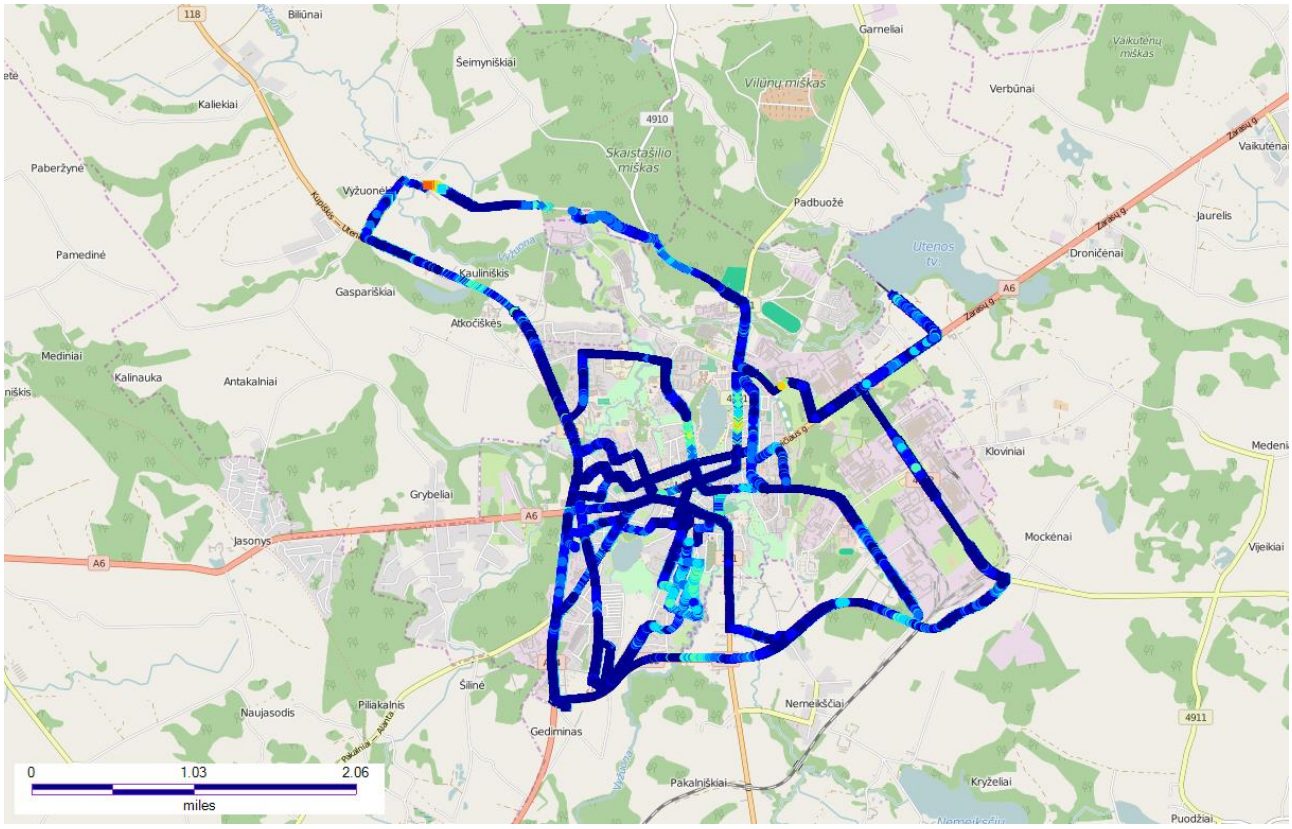
A.7 pav. Matavimų aprėpties ribos Marijampolėje



A.8 pav. Matavimų aprėpties ribos Mažeikiuose



A.9 pav. Matavimų aprėpties ribos Jonavoje



A.10 pav. Matavimų aprėpties ribos Utenoje

B priedas. Pažyma apie dalyvavimą XIX-tojoje jaunųjų mokslininkų konferencijoje

VILNIAUS GEDIMINO
TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

XIX-toji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija
„MOKSLAS – LIETUVOS ATEITIS“

ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA

PAŽYMA

Martynas Stirbys

Telekomunikacijų inžinerijos (T180) sekcijoje perskaitė pranešimą

BALSO KOKYBĖS MOBILIUOSE TINKLUOSE TYRIMAS

Mokslo komiteto pirmininkas prof. habil. dr. Romanas Martavičius

Sekcijos pirmininkas doc. dr. Aurimas Anskaitis

2016 m. kovo 18 d.
Vilnius