

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Darius GURŠNYS

**BALSO KOKYBĖS VERTINIMO
METODAI IR PRIEMONĖS
MOBILIOJO RYŠIO SISTEMOMS**

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, Elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

Vilnius, 2008

Disertacija rengta 2004–2008 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo mokslinis vadovas

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

<http://leidykla.vgtu.lt>

VG TU leidyklos TECHNIKA 1528-M mokslo literatūros knyga

ISBN 978-9955-28-338-6

© Guršnys, D. 2008

© VG TU leidykla TECHNIKA, 2008

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos mobiliojo ryšio vartotojų patiriamos balso kokybės vertinimo problemos.

Darbo tikslas – ištirti GSM mobiliojo ryšio sistemos balso paketų srautus ir pasiūlyti balso kokybės vertinimo būdą ir priemones mobiliojo ryšio sistemoms.

Darbo uždaviniai:

- sukurti prarastų balso paketų srautų duomenų rinkimo būdą;
- pritaikyti prarastų balso paketų srautų matematinius modelius kintančioms ryšio sąlygoms;
- ištirti galimybes vertinti mažos trukmės balso signalo atkarpų kokybę ITU P.862 rekomendacijoje aprašytu PESQ algoritmu;
- ištirti matavimo signalo trukmės pailginimo efektyvumą, mažinant PESQ algoritmo rezultatų neapibrėžtį;
- įvertinus gautus balso paketų srautų modelius ir prarastų paketų įtaką, sukurti mobiliojo ryšio sąlygoms skirtą balso kokybės vertinimo metodą.

Disertaciją sudaro šeši skyriai. Pirmajame skyriuje nagrinėjamas problemos aktualumas, formuluojamas darbo tikslas ir uždaviniai. Aptariamie tyrimų metodai ir mokslinis darbo naujumas. Pristatomas autoriaus indėlis.

Antrasis skyrius skirtas literatūros apžvalgai. Jame pateikiama paslaugų kokybės sampratos evoliucija. Apžvelgiama nuo ko priklauso perduodamo balso kokybė. Susisteminami kalbos kokybės vertinimo metodai. Analizuojami atlikti balso kokybės vertinimo tyrimai. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados.

Trečias skyrius skirtas balso paketų GSM ryšio sistemoje tyrimams. Pateikiamas originalus prarastų balso paketų padėties laike nustatymo metodas. Balso paketų praradimus kanale aprašantys modeliai papildomi ryšio kanalo būvį įvertinančiais parametrais.

Ketvirtame skyriuje nagrinėjama galimybė PESQ algoritmu vertinti mažos trukmės balso signalų kokybę. Pateikiami segmentavimo įtakos kokybės įverčiui tyrimų rezultatai. Pasiūlomas metodas mažos trukmės signalų kokybei vertinti PESQ algoritmu, leidžiantis sumažinti segmentavimo įtaką kokybės įverčiui.

Penktame skyriuje pasiūlomas originalus vartotojo patirtos balso kokybės vertinimo metodas, pagrįstas kokybės priskyrimu kokybės kategorijoms. Pateikiami, metodui būtini, kokybės kategorijų tikimybių rinkiniai, skirti skirtingiems AMR kodeko spartos režimams.

Šeštame skyriuje pateikiamos galutinės išvados.

Disertacijos tema perskaityti 7 pranešimai mokslinėse konferencijose ir paskelbti 5 straipsniai: vienas – žurnale, įtrauktame į Thomson ISI Master Journal List sąrašą, du – Inspec duomenų bazėje cituojamame žurnale, du – kituose leidiniuose.

Abstract

Current PhD thesis presents an analysis of quality evaluation problems in mobile communications.

The aim of this work is to investigate voice frame losses in GSM and to propose the method for voice quality evaluation in mobile communication.

The tasks of the work were:

- to create the method for voice frame traces collection;
- to add channel parameters to existing frame trace mathematical models;
- to investigate possibility to use PESQ algorithm for quality evaluation of short duration voice signals;
- to investigate effectiveness of prolonged duration signals for reduce PESQ segmentation influence on quality score;
- to propose a method for voice quality evaluation in mobile communication on the basis of the data of studies of lost frame traces.

The thesis consists of 6 chapters.

In the first chapter the problem and its topicality are stated, the aim and tasks are outlined. The used methods and novelty of solutions are described. The contribution of author and structure of thesis are presented.

In the second chapter the analysis of existing publications related with problems of the thesis is presented. The evolution of quality of service conception is given. Factors which influence on voice quality are discussed. The classification of voice quality evaluating methods is presented.

The third chapter is dedicated for investigation of voice frame traces in GSM. Original method for lost frames detection is described. Evaluation of communication condition parameters is added to mathematical models of frame traces.

In the fourth chapter the possibility of evaluation of quality of short duration signals using PESQ algorithm is analysed. Impact results of segmentation on quality score are given. Original method for preparation of short duration signals to reduce the influence of segmentation is proposed.

In the fifth chapter original method based on quality classes for voice quality evaluation is presented. Distributions of quality classes for AMR codec, which are essential for proposed method, are given.

In the sixth chapter the conclusions are formulated.

The results of the thesis were announced in 7 conferences. 5 scientific papers were published, one of which is referred in the Thomson ISI Master Journal List database, two – were quoted in Inspec database, two – were published in other publications.

Žymėjimai

Simboliai

Q_{mos}	balso kokybė MOS skalėje
Q_{pesq}	balso kokybė PESQ skalėje
dQ_{pesq}	balso kokybės sumažėjimas PESQ skalėje

Santrumpos

3G	trečios kartos mobiliojo ryšio sistema
3SQM	neinvazinis balso kokybės vertinimo algoritmas (angl. <i>Single Side Speech Quality Measure</i>)
AMR	adaptyvus daugelio spartų kodekas (angl. <i>Adaptive Multi-Rate</i>)
BS	bazinė stotis (angl. <i>Base Station</i>)
CSD	duomenų perdavimas kanalo perjungimo būdu (angl. <i>Circuit Switched Data</i>)
FER	prarastų paketų tankis (angl. <i>Frame Erasure Rate</i>)
GSM	pasaulinė mobiliojo ryšio sistema (angl. <i>Global System for Mobile</i>)
iQoS	individuali paslaugos kokybė (angl. <i>individual QoS</i>)
ITU	Tarptautinė telekomunikacijų sąjunga (angl. <i>International Telecommunication Union</i>)
MOS	vidutinis nuomonių balas (angl. <i>Mean Opinion Score</i>)
MS	mobiliojo ryšio telefonas (angl. <i>Mobile Station</i>)
PESQ	objektyvus suvokiamos balso kokybės vertinimo algoritmas (angl. <i>Perceptual Evaluation of Speech Quality</i>)
PQoS	suvokiama paslaugos kokybė (angl. <i>Perceived Quality of Service</i>)
QoE	patirties kokybė (angl. <i>Quality of Experience</i>)
QoS	paslaugos kokybė (angl. <i>Quality of Service</i>)

Turinys

Reziumė	iii
Abstract	iv
Žymėjimai	v
1. Įvadas	1
1.1. Mokslo problema	1
1.2. Darbo aktualumas	3
1.3. Tyrimų objektas	4
1.4. Darbo tikslas	4
1.5. Darbo uždaviniai	4
1.6. Tyrimų metodai	4
1.7. Mokslinis darbo naujumas	4
1.8. Autoriaus dalyvavimas mokslinėse programose	5
1.9. Ginamieji teiginiai	5
1.10. Darbo rezultatų aprobavimas	6
1.11. Disertacijos struktūra	6
2. Balso kokybė ir jos vertinimo metodai	7
2.1. Telekomunikacijų paslaugų kokybės samprata ir jos evoliucija	7
2.2. Perduodamo balso kokybė	9
2.3. Balso kokybės vertinimo metodai	12
2.3.1. Subjektyvus MOS vertinimo būdas	12
2.3.2. Objektyvūs kalbos kokybės vertinimo metodai	12
2.4. Tyrimų būklė pasaulyje ir Lietuvoje	14
2.5. Antrojo skyriaus išvados	15

3. GSM sistemos balso paketų praradimų analizė.....	17
3.1. Balso paketų srautų matavimo metodika	17
3.1.1. Balso perdavimo GSM sistemoje ypatumai.....	18
3.1.2. Prarasto paketo indikatoriai	20
3.1.3. Matavimo signalo sintezė	21
3.1.4. Prarastų paketų pozicijų nustatymo algoritmas	23
3.2. Balso paketų srautų matematiniai modeliai	25
3.2.1. Balso paketų srautų matavimai	25
3.2.2. Duomenų paketų srautų modeliai	28
3.2.3. Modelių pritaikymas balso paketų srautams.....	30
3.3. Trečiojo skyriaus išvados.....	36
4. Lokalizuotų defektų įtakos vertinimo PESQ algoritmu analizė.....	39
4.1. Prarastų balso paketų įtaka kokybei	39
4.2. PESQ – perduoto balso kokybės vertinimo priemonė	41
4.3. Segmentavimo įtaka	42
4.3.1. Kokybės įverčio neapibrėžties tyrimas	45
4.3.2. Matavimo lango trukmės įtaka	47
4.4. Matavimo signalo sintezė.....	48
4.5. Ketvirtąjo skyriaus išvados.....	54
5. Balso kokybės vertinimas mobiliojo ryšio sistemose.....	57
5.1. Vartotojo ir paslaugų tiekėjo santykių reglamentavimas	57
5.2. Statistinių balso kokybės įverčių nustatymo būdas.....	59
5.2.1. Išėities sąlygos	59
5.2.2. Balso kokybės vertinimo principai realaus pokalbio metu	61
5.3. Penktojo skyriaus išvados	67
6. Bendrosios išvados.....	69
Literatūros sąrašas	71
Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema	78
Priedas. D_n ir D_{An} iškraipymų koeficientai.....	79

1. Įvadas

1.1. Mokslo problema

Pagal ITU rekomendacijas, balso kokybės vertinimas grindžiamas vidutinio nuomonių balo (MOS) samprata. Tiriamos sistemos įtaką balso kokybei vertina grupė ekspertų. Kiekvienas iš jų specialiai apmokomas, klauso parengtus skirtingos kokybės balso įrašus ir vertina individualiai. Iš gautų individualaus vertinimo rezultatų skaičiuojamas vidutinis kokybės balas.

Toks metodas yra subjektyvus. Skirtingos ekspertų grupės gauna skirtingus kokybės įverčius vertinant tas pačias sistemas. Todėl yra parengta keletas objektyvaus balso kokybės vertinimo būdų. Vienas iš jų PESQ algoritmas, kuris 2001 metais įformintas ITU rekomendacijoje P.862 [1]. PESQ algoritmas balso kokybę vertina lygindamas sistemos paveiktą signalą su originaliu, neiškraipytu signalu. PESQ algoritmo parametrai yra optimizuoti taip, kad išlaikytų didžiausią koreliaciją su subjektyviais MOS vertinimais. PESQ yra laikomas objektyviu standartizuotu balso kokybės vertinimo metodu.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto telekomunikacijų mokslo centre tiriant trumpas (kelių sekundžių trukmės) balso signalo atkarpas su pavieniais, lokaliais defektais buvo pastebėta kad, PESQ algoritmu nustatyti kokybės įverčiai pastebimai priklauso nuo matavimo sąlygų, nuo balso signalo padėties matavimo lange. Todėl vienu iš pirmųjų šiame darbe sprendžiamų uždavinių yra specialūs tyrimai, kuriais siekiama nustatyti, kas lemia PESQ įverčio

neapibrėžtumus, ir ar galima juos eliminuoti. Jeigu galima, tai kaip tai galima padaryti.

Mobiliojo ryšio sistemose balso kodekas ir paketų praradimai kanale yra du kritiniai veiksniai, lemiantys vartotojo girdimo balso kokybę. Jei sistemos naudojamas balso kodekas yra pilnai kontroliuojamas, tai paketų praradimai yra atsitiktiniai ir sunkiai prognozuojami.

Paketų praradimus kanale gali iššaukti: nepakankamas signalo lygis, didelis interferencinių trukdžių santykis, mobiliojo ryšio stoties (MS) persiregistravimas tarp bazinių stočių judant ir t. t. Duomenų paketų praradimų dėsningumai ir modeliai pasaulinės mobiliojo ryšio sistemos (GSM) duomenų perdavimo perjungimo būdu kanale (CSD) ir kitose bevielėse duomenų perdavimo sistemose yra nagrinėjami daugelyje šaltinių [2–6]. Deja, realybė yra tokia, kad balso paketų srautai mokslinėje literatūroje nėra aprašyti. Šiame darbe vienas iš sprendžiamų uždavinių yra specialios įrangos prarastiems paketams eksperimentiškai tirti kūrimas ir praktiniai prarastų balso paketų srautų tyrimai bei jų modelių sudarymas.

Dar viena problema, vertinant balso kokybę mobiliojo ryšio sąlygose, atsiranda dėl nevienodo balso paketų reikšmingumo kalbos suprantamumui ir balso kokybei. Žmogaus kalba sudaryta iš pasikartojančių aktyvios kalbos ir tylos intervalų. Akivaizdu, kad tylą aprašančio paketo praradimai mažai įtakoja balso kokybę, tuo tarpu aktyvios kalbos fragmento neteksis gali žymiai pabloginti girdimą signalą ir kartais padaryti pavienius žodžius nesuprantamais.

Kalbos segmentų ir reikšmingumo tyrimai šiuo laikotarpiu yra pradinėje stadijoje. Yra žinoma, kad žodžių pradžioje esantys segmentai yra svarbesni už kitus [7, 8]. Tačiau nėra galimybės realiu laiku nustatyti konkretaus prarasto paketo įtakos kalbos suprantamumui ir balso kokybei. Balso segmentų skirtingam reikšmingumui įvertinti darbe vykdomi tyrimai, kuriais siekiama nustatyti balso paketų reikšmingumo skirstinius.

Kuriant naujos kartos telekomunikacijų tinklus, siekiama sukurti galimybes įvertinti vartotojo gautos paslaugos kokybę. Patirta kokybė turės būti siejama su paslaugų apmokestinimo kriterijais. Šiuo metu tiesiogiai matuoti balso kokybę realiu laiku nėra galimybės. Problema sprendžiama vertinant fizinio ir loginio perdavimo kanalo parametrus ir iš jų prognozuojant, galimai gautą, paslaugos kokybę. Perduoto balso kokybė vertinant vienu kokybės įverčiu nepriklausomai nuo pokalbio trukmės, bus prarandama informacija apie trumpalaikius kokybės pokyčius. Vertinant mažos trukmės balso segmentus susikurs didelis duomenų apie kokybę srautas. Šiame darbe nagrinėjama galimybė skaičiuoti skirstinius, kuriais apibūdinamos pokalbio laiko dalys, kai buvo suteikta puikios, geros, patenkinamos, prastos ar blogos kokybės balso paslauga. Tai leistų neprarasti informacijos apie trumpalaikius kokybės pokyčius ir minimizuoti duomenų srautą.

1.2. Darbo aktualumas

Mobiliojo ryšio sistemos kuriamos ir tobulinamos nuolatos. Šiuo metu teikiamų paslaugų spektras apima ne tik balso perdavimo paslaugą, bet ir vaizdo skambučius, daugialypių žinučių perdavimą, duomenų perdavimą IP tinklais ir dar daug kitų paslaugų.

Kuriant šiuolaikines telekomunikacijų sistemas prisilaikoma 1994 m. Tarptautinės telekomunikacijų sąjungos (ITU) E.800 rekomendacijoje [9] suformuluotos paslaugų kokybės (QoS) sampratos. Ji apibūdinama kaip vartotojų pasitenkinimą atspindintis paslaugos savybių bendras efektas. Prisilaikant šios sampratos, kuriamos telekomunikacijų sistemos, metodikos ir priemonės, kurios palaiko nustatytą paslaugų kokybės lygį, vertinant visų vartotojų paslaugų kokybės vidurkį. Tokios paslaugų kokybės vidutinių rodiklių vertinimo metodikos sukurtos fiksuotojo telefoninio ryšio sistemoms, kuriose visų vartotojų techninės sąlygos yra panašios, todėl ir įvairiems vartotojams teikiamų paslaugų kokybės rodikliai gali būti laikomi vienodais.

Mobiliojo ryšio tinkluose vartotojui suteikiamų paslaugų kokybė nėra vienoda. Dėl vartotojo judrumo ir kintančių tinklo apkrovų, ji nuolatos kinta ir ne visada bei ne visur būna pakankamai aukšta. Šiai išvadai pagrįsti paminėtinos plačiai visuomenei prieinamos trys ataskaitos [10–12] apie mobiliojo ryšio tinklų paslaugų kokybės lygio tyrimus Danijoje. Šios ataskaitos akivaizdžiai patvirtina, kad nepakankamai aukštos kokybės paslaugos šio tipo tinkluose pasitaiko gana dažnai.

Realio vartotojo patirta paslaugos kokybė gali būti nustatyta matuojant ir analizuojant vartotojo individualiai gautų paslaugų kokybę [13]. Deja, dabartinėse telekomunikacijų sistemose individualiai patirta paslaugų kokybė nėra nei matuojama, nei vertinama.

Vartotojų patirtos kokybės problematikos svarbą ir aktualumą patvirtina ir grupės Europos mokslo institucijų, pagal Šeštosios Bendrosios Programos (Sixth Framework Programme), Informacinės visuomenės technologijų tyrimų kryptį 2003–2006 m. vykdytas projektas „Socio-Economic Aspects of Next Generation Internet“ [14]. Jame išnagrinėti vartotojų patirtos kokybės tyrimų stovis, kokybės matavimų ir kokybės grįžtamojo ryšio klausimai, bei būsimų kartų interneto inžinerijos klausimai.

Apie vartotojų patirtos kokybės vertinimų aktualumą, svarbą ir su tuo susijusius uždavinius savo nuomonės yra paskelbę didieji telekomunikacinių sistemų kūrėjai: „Nokia“ [15], „Nortel Networks“ [16] ir kiti.

Išsakytos mintys ir pastebėjimai leidžia teigti, kad visi tyrimai, kuriais siekiama sukurti metodikas ir technines bei programines priemones mobiliojo ryšio paslaugų patirtai kokybei stebėti ir analizuoti yra akivaizdžiai aktualūs.

1.3. Tyrimų objektas

Tyrimų objektas yra balso kokybė, kurią patiria mobiliojo ryšio paslaugų vartotojai.

1.4. Darbo tikslas

Darbo tikslas – ištirti GSM mobiliojo ryšio sistemos balso paketų srautus ir pasiūlyti balso kokybės vertinimo būdą ir priemones mobiliojo ryšio sistemoms.

1.5. Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Sukurti prarastų balso paketų pozicijų aptikimo būdą ir priemones.
2. Pritaikyti žinomus matematinius modelius prarastų balso paketų srautams, įvertinant ryšio sąlygas.
3. Ištirti galimybę vertinti mažos trukmės balso signalų atkarpų, su pavieniais prarastais paketais, kokybę PESQ algoritmu.
4. Sukurti atstojoamojo signalo sudarymo iš trumpų balso signalų atkarpų būdą ir ištirti jo efektyvumą vykdant kokybės vertinimą PESQ algoritmu.
5. Įvertinus gautus balso paketų srautų modelius ir prarastų paketų įtaką, sukurti mobiliojo ryšio sąlygoms tinkamą balso kokybės vertinimo metodą.

1.6. Tyrimų metodai

Darbe taikoma kalbos signalų apdorojimo metodai, koreliacinė analizė, matematinė statistika. Eksperimentais tikrinami teorinio tyrimo teiginiai. Darbo išvados grindžiamos matavimais ir modeliavimo rezultatais.

1.7. Mokslinis darbo naujumas

Rengiant disertaciją buvo gauti šie elektros ir elektronikos inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Pasiūlytas GSM mobiliojo ryšio sistemoje prarastų balso paketų aptikimo ir jų padėties laiko ašyje apskaičiavimo metodas, panaudojant galinę vartotojų įrangą.
2. Sudaryti GSM prarastų balso paketų srautų matematiniai modeliai susieti su fizinio kanalo parametrais.
3. Sukurtas balso signalų paruošimo metodas leidžiantis PESQ algoritmu vertinti mažos trukmės balso signalus.
4. Sukurtas mobiliojo ryšio sąlygoms pritaikytas balso kokybės vertinimo būdas, pagrįstas balso kokybės skirstymu į kokybės kategorijas.

1.8. Autoriaus dalyvavimas mokslinėse programose

Autorius disertacijos rengimo laikotarpyje dalyvavo šiuose mokslinėse programose:

1. Lietuvos valstybinio mokslo ir studijų fondo remiamas projektas „Telekomunikacinių paslaugų kokybės individualaus vertinimo sistema“. 2005 metai. Projekto vadovas – prof. habil. dr. Algimantas Kajackas.
2. COST 290 tarptautinis projektas „Būsimų telekomunikacijų sistemų paslaugų kokybės dinamikos tyrimai ir vertinimo priemonių sintezė“. Sėkmingai baigta 2006–2007 metai. Projekto vadovas – prof. habil. dr. Algimantas Kajackas.
3. Lietuvos valstybinio mokslo ir studijų fondo remiamas Aukštųjų technologijų plėtros programos projektas „Autonominė telekomunikacinių paslaugų kokybės stebėjimo sistema“. 2008 metai. Projekto vadovas – prof. habil. dr. Algimantas Kajackas.

1.9. Ginamieji teiginiai

1. Prarastų balso paketų padėties aptikimo būdas, pagrįstas specialių testinių signalų panaudojimu ir koreliaciniu prarastų paketų identifikavimu.
2. Eksperimentiniais matavimais paremti prarandamų balso paketų srautų modeliai mobiliojo ryšio sistemai.
3. Naujas eksperimentais ir algoritmo analize paremtas signalo konstravimo metodas, minimizuojantis PESQ balso kokybės vertinimo algoritmo sukuriamus įverčių neapibrėžtumus.

4. Mobiliojo ryšio sistemomis perduoto balso, kokybės vertinimo metodas, pagrįstas balso kokybės skirstymu į kokybės kategorijas.

1.10. Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tematika yra atspausdinti 5 moksliniai straipsniai: vienas – žurnale, įtraukta į Thomson ISI Master Journal List sąrašą [1A]; du – žurnale, cituojamame Inspec duomenų bazėje [2A, 3A], du – kituose leidiniuose [4A, 5A]. Taip pat, kartu su bendraautoriais, paruošti 2 poskyriai COST290 baigiamajai tyrimų ataskaitai.

Darbo tema buvo perskaityti 7 pranešimai mokslinėse konferencijose:

- 2 pranešimai jaunųjų mokslininkų konferencijoje „*Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities*“ 2005 ir 2006 m., Vilniuje.
- 5 pranešimai respublikinėje konferencijoje „*Elektronika*“ 2005, 2006, 2007 ir 2008 m., Vilniuje.
- Tarptautinio projekto COST290 valdymo komiteto posėdžiuose.

1.11. Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro šeši skyriai, iš kurių pirmasis yra įvadas, o paskutinis – rezultatų apibendrinimas. Taip pat yra vienas priedas.

Darbo apimtis yra 78 puslapiai, neskaitant priedų, tekste yra 28 numeruotos formulės, 39 paveikslai ir 6 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 82 literatūros šaltiniai.

Balso kokybė ir jos vertinimo metodai

Šiame skyriuje pateikiama telekomunikacinių paslaugų kokybės sampratos evoliucija. Disertacijoje telekomunikacijų paslaugų kokybė suprantama kaip perduoto balso kokybė. Analizuojami faktoriai, įtakojantys perduodamo balso kokybę. Apžvelgiama balso kokybės vertinimo būdai ir priemonės.

2.1. Telekomunikacijų paslaugų kokybės samprata ir jos evoliucija

Visų kartų telekomunikacijų sistemose šalia techninių signalų perdavimo klausimų buvo sprendžiamos ir teikiamų paslaugų kokybės problemos. Analoginių telekomunikacijų laikotarpiu didžiausias dėmesys buvo skiriamas paslaugų kokybę įtakojantiems fiziniams faktoriams, pavyzdžiui, triukšmai linijoje ir kokybės matas buvo susiejamas su linijos signalo/triukšmo santykiu. Kai buvo sukurtos skaitmeninės perdavimo sistemos, kokybės įvertis tapo priklausomas nuo visos eilės naujų veiksnių: kvantavimo, diskretizacijos, naudojamo signalo glaudinimo metodo – kodeko. Paslaugų kokybės sąvoka tapo ganėtinai kompleksiška.

Pagal bendrąsias ITU nuostatas QoS yra sutartinis dalykas. Paslaugos kokybės samprata tapo subjektyvia ir priklausė nuo daugelio faktorių, tačiau pagrindinis

kriterijus yra vartotojo pasitenkinimo laipsnis.

Paslaugų kokybės telekomunikacijų tinkluose subjektyvumą lemia tai, kad vartotojo pasitenkinimo laipsnis priklauso nuo daugelio techninių faktorių, nuo alternatyvių paslaugų, nuo vartotojo patirties ir savaime aišku – nuo paslaugos kainos. Kaip žinoma, paslaugų kaina yra svarbi valdant telekomunikacijų paslaugų vartojimą. Dinamiškai keičiant tarifus valdoma telekomunikacijų sistemų apkrova. Kai tam tikru laikotarpiu, pavyzdžiui, vakarais tarifai mažinami, apkrova padidėja. Darbo metu padidinus paslaugų tarifus, apkrova sumažinama. Taip išlyginama tinklo apkrova paros laikotarpiu. Svarbu, kad taip ITU suformuluota QoS koncepcija pagal OSI modelį orientuota pagal taikomąjį lygmenį, nustatoma iš vartotojo pozicijų.

Būtina atkreipti dėmesį į kitą momentą. Nusistovėjusi telekomunikacinių sistemų kūrimo ir jų teikiamų paslaugų kokybės vertinimo praktika orientuota į statistinį vartotoją. Sistemos bendrieji parametrai bei kokybės rodikliai nustatomi kaip vidurkiai. Jie randami apdorojant daugeliui vartotojų suteiktų paslaugų kokybės rodiklius. Tokia praktika pasiteisino fiksuotojo ryšio sąlygomis, kai tos sąlygos visiems vartotojams buvo panašios.

Nauja paslaugų kokybės samprata pradėta vystyti kartu su mobiliojo ryšio sistemomis. Atsirado nauji faktoriai didinantys QoS problemos sudėtingumą mobiliojo ryšio sąlygose. Netiksliai nusakomos įvairių diapazonų radijo bangų sklaidimo sąlygos ir kaip to pasekmė, labai padidėjusi signalų interferencija bei tarpusavio trukdžiai iššaukia informacijos paketų praradimus. 3G mobiliojo ryšio sistemose balso kokybę įtakoja ir jose naudojamo AMR balso kodeko duomenų spartos režimas. Mažinant kodeko sukuriama duomenų srautą (didinant glaudinimo laipsnį) atsiranda galimybė taikyti stipresnį kanalinių kodavimą. Bendras paketo atsparumas trukdžiams padidėja, tačiau sumažėja perduodamo balso kokybė [17].

Svarbu yra tai, kad priešingai nei fiksuotojo ryšio tinkluose, mobiliojo ryšio sąlygos kiekvienam vartotojui yra nevienodos ir individualiai nagrinėjant, faktiškai patirta paslaugų kokybė nustatoma labai skirtinga.

Keletą paskutinių metų atsiranda mokslinių darbų apie balso, vaizdo ir kitų duomenų perdavimų faktiškai patirtos kokybės vertinimus. Šiai problemai apibūdinti vartojami ir nauji terminai:

- suvokiama paslaugos kokybė – PQoS (angl. perceived Quality of Service) [18],
- patirta kokybė – QoE (angl. Quality of Experience) [7, 8, 19–22].

Daugeliu atveju sąvoka QoS keičiama naujesne – QoE. QoE sąvokos apibrėžimą 2007 m. pradžioje reglamentavo ITU [23]. QoE – subjektyviai suvoktas, bendras paslaugos priimtumas vartotojui.

QoE problematikai skirtas publikacijas galima suskirstyti į dvi dalis. Pirmoji iš jų nagrinėja perduodamų balso ir vaizdo specifinius iškraipymus ir siekia

nustatyti, kaip tuos iškraipymus pastebi bei suvokia vartotojai. Yra parengtos metodikos, kaip organizuoti subjektyvaus vertinimo testus, nustatant tam tikrų iškraipymų įtaką balso bei vaizdo signalams. Tokių tyrimų rezultatai yra įvertinti kuriant modernius balso ir vaizdo kodekus. Kita QoE problematikos dalis skirta faktiškai vartotojo patirtos paslaugos kokybės įvertinimui realiu laiku ir tam tikrai patirtos kokybės apskaitai.

Šiuo metu, kai trečiosios kartos mobiliųjų telekomunikacijų sistema yra plataus diegimo fazėje, mokslo visuomenė intensyviai diskutuoja apie būsimų kartų telekomunikacijas. Kiekvienai naujai kartai keliama ne tik naujų galimybių reikalavimai, bet ir reikalavimai kokybei. Mokslinėje spaudoje gausu publikacijų, kuriose nagrinėjami diferencijuotos kokybės paslaugų teikimo principai.

Vystant tyrimus turėtų būti sukurtos vartotojams prieinamos priemonės, pritaikytos vertinti vartotojų patirtą paslaugų kokybę, įvertinti realią paslaugos vertę, kai suteikiama paslauga nėra pakankamai aukštos kokybės, nustatyti problemines, kokybės prasme, vietas.

2.2. Perduodamo balso kokybė

Visose mobiliojo ryšio sistemose yra realizuotas signalo galios valdymo mechanizmas, leidžiantis minimizuoti siųstuvo spinduliuojamą galią išlaikant reikiamą radijo signalo lygį. Mažinant spinduliuojamas signalų galias, mažėja ir interferenciniai trukdžiai, gretimuose kanaluose veikiantiems vartotojams. Galios valdymo mechanizmai yra realizuoti tiek MS, tiek bazinėse stotyse (BS). Galios valdymo kriterijai yra pagrįsti priimamo signalo kokybe (fizinio lygmens signalų kokybė ir balso kokybė yra skirtingos sąvokos). Radijo kanalo kokybė yra apibūdinama visa eile išmatuotų ir apskaičiuotų parametrų: priimamo signalo lygis (RxLev), nešlio ir interferencinio signalo santykis (C/I), klaidingų bitų tankis (BER), prarastų paketų tankiu (FER).

Bendras galios valdymo mechanizmas yra ganėtinai paprastas. Kai i -ojo radijo kanalo kokybė Q_i yra geresnė nei reikalaujama Q_{reik} :

$$Q_i > Q_{\text{reik}}, \quad (2.1)$$

siųstuvo galia yra mažinama, jei radijo kanalo kokybė yra prastesnė nei reikalaujama, galia yra didinama.

Kol siųstuvo galia neviršija didžiausios įmanomos galios P_{max} , priimamo signalo kokybė kinta nežymiai, nes galios valdymo mechanizmas kompensuoja kanalo parametrų kitimus. Tokiose sąlygose vartotojo gaunamo balso kokybė kinta nedaug.

Deja, net ir gerai išvystytame mobiliojo ryšio tinkle atsiranda tokių vietų ir laiko momentų, kai konkrečiam vartotojui priskirtame kanale siųstuvų spinduliuojamos galios daugiau padidinti negalima, nes pasiekta leistina galios

riba:

$$P_i = P_{\max} . \quad (2.2)$$

Jei tokioje situacijoje nėra galimybės perjungti MS prie kitos bazinės stoties, radijo kanalo kokybė tampa nebepatenkinama. Šiuo atveju vartotojo gaunamų paslaugų kokybė tampa nebekontroliuojama ir apibūdinama kaip geriausio bandymo paslauga (angl. *best effort service*). Nesant galimybės didinti galią, stebimas perduodamo balso kokybės mažėjimas. GSM ir 3G ryšio sistemose balsas, vaizdas ir duomenys yra skaitmenizuoti ir perduodami informacijos paketais. Nepatenkinama radijo kanalo kokybė lemia duomenų paketų praradimus. O paketų praradimai iššaukia paslaugų kokybės sumažėjimą. Apibendrinant signalo galios valdymo įtaką paslaugų kokybei, galima suformuluoti šiuos teiginius:

- Kiekvienai MS išskirtas kanalas yra unikalus. Kiekvieno kanalo parametrai yra skirtingi ir priklauso nuo geografinės padėties, tinklo apkrovos ir kitų parametrų.
- MS judant, ryšio sąlygos nuolat kinta, gali pasitaikyti laiko intervalų, kuomet nebeįmanoma padidinti siųstuvo galios, dėl ko padažnėja paketų praradimai.
- Paketų praradimai stipriai įtakoja balso ir kitų paslaugų kokybę.
- Klasikiniai tinklų planavimo metodai negarantuoja ir negali garantuoti reikiamo signalo lygio visuose aprėpties taškuose.

Prarastų paketų poveikis balso kokybei yra nagrinėtas mokslinėse publikacijose [24–26]. Paskelbtose išvadose teigiama, kad esant mažam praradimų lygiui (iki 2 %) pavieniai prarasti paketai ir trumpos prarastų paketų grupės (keletas iš eilės prarastų paketų) daro panašų poveikį balso kokybei. Didėjant praradimų dažniui, grupuoti praradimai labiau pastebimi ir daug labiau įtakoja balso kokybę. Esant paketų grupių praradimams, iš perduodamos kalbos gali būti ištrintos ne tik žodžių dalys, bet ir ištisi žodžiai.

Priimamo signalo parametrai mobiliojo ryšio sistemose yra matuojami ir naudojami radijo ištekliams, galiai valdyti, komutuojuant ir keičiant balso kodekus. Tačiau faktiškai vartotojo gauta paslaugos kokybė nėra kontroliuojama. Šio laikotarpio vartotojams prieinama galinė įranga neturi techninių galimybių įvertinti gautų paslaugų kokybę.

Nors dabartinių mobiliojo ryšio operatorių tinklai yra išvystyti ir padengia didžiąją Lietuvos teritorijos dalį, tačiau dėl mobilumo ir specifinės, miesto sąlygoms būdingos, interferencinės aplinkos, vartotojas visuomet gali atsidurti lokaliuose, prasto ryšio sąlygose [27, 28]. Tokiose situacijose atsiranda paketų praradimai, kurie ir lemia perduodamo balso kokybės sumažėjimus. Vartotojai,

esantys „blogose“ vietose, patiria perduodamo balso kokybės sumažėjimą dažniau – daug dažniau, negu vidutinis vartotojas.

Kaip pavyzdį galima pateikti ataskaitą [2, 3], kuri pateikia matavimų, atliktų Danijoje, duomenis. Šiuose matavimuose buvo nustatyta, kad kalbos kokybė yra tik patenkinama 5,3 % visų skambučių, o bloga – 2,3 %. Kaip matome, vidutinis prastos kokybės skambučių skaičius nėra didelis, bet šie skambučiai nėra tolygiai pasiskirstę tarp vartotojų. Blogos kokybės skambučiai dažniausiai įvyksta tiems vartotojams, kurie yra tam tikrose geografinėse vietovėse ar skambina tuo metu, kai tinkle apkrova yra didelė. Taip pat, blogos kokybės skambučiai dažnai įvyksta ribose tarp mobiliojo tinklo celių.

Balso paketų praradimų srautų savybės mobiliojo ryšio sistemose nėra išsamiai nagrinėtos. Didesnis dėmesys buvo skirtas tik CSD – duomenų perdavimo kanalui [10–12], tačiau minėti tyrimai apsiribojo prarastų paketų matematiniais modeliais vidutinėms ryšio sąlygoms.

Darbuose [10, 11] pasiūlytų modelių generuojami prarastų paketų srautai neatspindi specifinių ryšio situacijų, kurios pasitaiko realiam vartotojui. Nepakankamai dėmesio skirta informacijai apie prarastų paketų tendencijas grupuotis esant labai prastoms ryšio sąlygoms. Nepilnas kanalo modelis lemia neapibrėžtus rezultatus modeliuojant kalbos perdavimą ir jos kokybę.

Balso kokybės vertinimas yra sudėtingas uždavinys. Žmogaus kalba susideda iš aktyvios kalbos ir tylos intervalų. Paketas gali būti prarastas tiek kalbos, tiek ir tylos intervale. Dažniausiai tylos intervalo netektis neturi įtakos balso kokybei. Tačiau perduoto balso kokybė priklauso nuo to, kurioje aktyvios kalbos dalyje bus prarastas paketas [25].

Balso kodekas yra antrasis pagal svarbumą veiksnys, įtakojantis balso kokybę. Trečios kartos ryšio sistemose naudojamas kintamos spartos AMR kodekas. Prastėjant ryšio sąlygoms yra jungiamas kodekas su mažesne generuojamų duomenų sparta, o likęs srautas yra panaudojamas papildomam kanaliniam kodavimui. Taip padidinamas atsparumas trukdžiams ir sumažinama paketo praradimo tikimybė. Deja, mažėjant naudingų duomenų srautui, sumažėja ir perduodamo balso kokybė.

Siekiant sumažinti prarastų paketų įtaką balso kokybei, dekoderiuose yra naudojami šiuos praradimus maskuojantys mechanizmai. GSM 06.10 (angl. *full rate*) ir GSM 06.20 (angl. *half rate*) dekoderiai vietoje prarasto paketo sugeneruoja naują, iš prieš tai buvusio teisingai priimto paketo parametrų [29, 30]. Šis metodas yra efektyvus, kai prarandami pavieniai paketai iš tų balso segmentų, kurie tarpusavyje yra stipriai koreliuoti. Šie garso signalai yra periodiški, todėl paketo pakartojimas neblogai kompensuoja prarastą informaciją. Tačiau esant keletui iš eilės prarastų paketų, dėl paketų pakartojimo susikuria nemalonūs impulsiniai trukdis. Ši problema išspręsta GSM 06.60 (angl. *enhanced full rate*) ir AMR kodekuose, realizuojant sudėtingesnę maskavimo mechanizmą [31, 32].

Mobiliojo ryšio sistemose perduotos kalbos kokybės modeliavimas ir vertinimas yra sudėtingas ir iki galo neišnagrinėtas klausimas.

2.3. Balso kokybės vertinimo metodai

2.3.1. Subjektyvus MOS vertinimo būdas

Vystantis telefonijai kito ir balso kokybės vertinimo principai. Analoginės telefonijos kūrimo laikotarpiu nagrinėtos spektro juostos pločio, signalo bei triukšmų lygių sąsajos su suvokiama balso kokybe. Atsiradus galimybėms sukurti skaitmeninius balso kodekus, kuriais koduotas ir perduotas balso signalas gali pastebimai skirtis nuo originalaus, teko peržiūrėti ir balso kokybės vertinimo principus. Šiuo metu labiausia paplitusios MOS pagrindu veikiančios balso kokybės vertinimo priemonės [33]. Kiekvienas ekspertų grupės narys individualiai įvertina pateiktus balso įrašus. Priklausomai nuo vykdomo testo rūšies, kiekvienas įrašas yra įvertinimas pažymiu. MOS įvertis gaunamas suvidurkinus ekspertų vertinimus. Yra visa eilė MOS testų rūšių, tačiau vertinant perduoto balso kokybę svarbiausieji yra klausymosi testai. Dažniausiai įvertinimams naudojama 1 – 5 balų skalė. Vienas balas reiškia prasčiausią įvertį – iškraipyto signalo kokybė nepriimtina, 5 – signalo kokybė puiki.

Svarbu pastebėti, kad daugelį kalbos iškraipymų klausantysis eliminuoja, nes prasmę supranta pagal kontekstą. Iš kitos pusės, yra situacijų, pavyzdžiui, perduodant įvairias komandas, kai pasikliauti MOS kokybės testais nepakanka. Tiksliesni vertinimai gaunami tiriant kalbos suprantamumą (angl. *intelligibility*).

MOS vertinimų atlikimas yra sudėtingas ir daug laiko reikalaujantis procesas, kurio rezultatai gali skirtis vertinimą kartojant ar jį atliekant kitai ekspertų grupei. Dėl šių priežasčių, jau kurį laiką yra kuriami ir standartizuoti algoritmai, leidžiantys objektyviai vertinti balso kokybę.

2.3.2. Objektyvūs kalbos kokybės vertinimo metodai

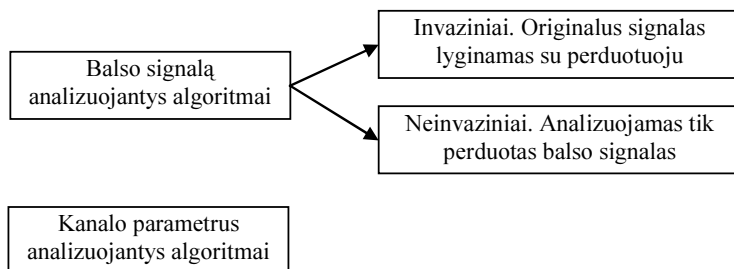
Objektyvių perduoto balso kokybės vertinimo algoritmų klasifikacija pateikta 2.1 paveiksle. Balso kokybės algoritmus galima būtų suskirstyti į dvi pagrindines grupes:

- kanalo parametrus analizuojančių algoritmų grupė;
- balso signalą analizuojančių algoritmų grupė.

Pirmosios grupės algoritmai dažniausiai yra adaptuojami konkrečiai ryšio sistemai. Pavyzdžiui, kompanijos Ericsson gaminamuose „TEMS investigation“ įrenginiuose naudojamas SQI (angl. *Speech Quality Index*) – kalbos kokybės

indeksą skaičiuojantis algoritmas ir yra skirtas GSM ir 3G ryšio sistemoms [34].

Balso signalą analizuojančius algoritmus galima suskirstyti į neinvazinius (angl. *non-intrusive*) ir invazinius (angl. *intrusive*). Neinvaziniai (pvz. 3SQM) algoritmai analizuoja tik per ryšio sistemą perduotą ir iškraipytą signalą. Ir nors realiose ryšio sistemose šie algoritmai yra lengviau pritaikomi, tačiau jie yra skaičiavimams imlūs, ne visada pasižymintys pakankama rezultatų koreliacija su MOS vertinimais.



2.1 pav. Objektivaus balso kokybės vertinimo algoritmų klasifikavimas

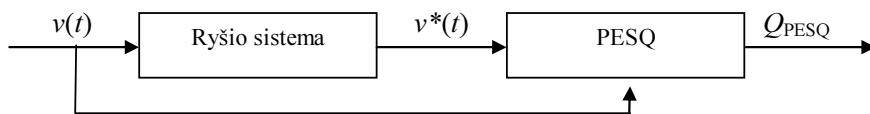
Invazinio tipo algoritmai (PAMS, PSQM+, PESQ) balso kokybę vertina lygindami atraminį signalą su sistemoje iškraipytu signalu. Tyrimai rodo, kad invaziniai algoritmai pasižymi stipresne koreliacija su ekspertiniais MOS vertinimais.

Šiuo metu yra pripažinta, kad perduoto balso signalo kokybei vertinti geriausiai tinkamas yra PESQ, invazinio tipo algoritmas [35]. Šis algoritmas yra plačiai taikomas ir naudojamas daugelyje šiuolaikinių balso kokybės vertinimo priemonių. PESQ algoritmas sukurtas kaip objektyvaus balso kokybės vertinimo būdas, skirtas telefonijai. Jis gali vertinti balso iškraipymus, kuriuos sukuria:

- Balso kodavimas bei pakartotini kodavimai.
- Perdavimo kanalo klaidos.
- Kodekų įtaka balso signalams.
- Išoriniai triukšmai.
- Duomenų paketų praradimai.

Įvairiais eksperimentais įrodyta, kad šiuo algoritmu gauti kokybės įverčiai yra artimi subjektyviems MOS įverčiams [36]. Aprašant PESQ algoritmą [9] yra pateikti ir šio algoritmo palyginamieji testai su MOS įverčiais. Šių įverčių tarpusavio koreliacija yra gana aukšta – apie 0,935.

Balso kokybės įvertis Q_{PESQ} yra apskaičiuojamas lyginant neiškraipytą $v(t)$ signalą su ryšio sistemoje iškraipytu signalu $v^*(t)$ (2.2 pav.).



2.2 pav. Balso kokybės vertinimo PESQ algoritmu schema

PESQ algoritmas vis labiau įsitvirtina kaip pagrindinis objektyvaus balso kokybės vertinimo metodas. Tačiau literatūros analizė rodo, kad tose pačiose sąlygose apskaičiuoti kokybės įverčiai, skirtinguose darbuose, pateikiami gana skirtingi. Pavyzdžiui, tiriant prarastų paketų įtaką kokybei, esant $FER = 1\%$, ataskaitoje [37] pateikiama, kad balso kokybė sumažėja keletu (0,2 ... 0,4) dešimtųjų balo pagal MOS skalę. Tuo tarpu kituose moksliniuose straipsniuose parodoma, kad esant tam pačiam prarastų paketų lygiui (1 %) gaunamas 0,17 [38] ir dar mažesnis 0,07 [39] MOS balo vidutinis kokybės pablogėjimas. Tai verčia atsargiau vertinti PESQ algoritmu gautus rezultatus ir išsamiau panagrinėti rezultatų neapibrėžties atsiradimo aplinkybes.

2.4. Tyrimų būklė pasaulyje ir Lietuvoje

Mokslo pasaulis jau keletą dešimtmečių sprendžia klausimus susijusius su žmogaus kalba. Vystantis technologijoms šalia kalbos atpažinimo ir sintezės uždavinių atsirado ir naujos tyrimų kryptys: balso koderiai leidžiantys minimizuoti duomenų srautus, kalbos signalų rekonstrukcija, kalbos kokybės vertinimas ir t. t.

Lietuvoje taip pat yra vykdoma nemažai tyrimų susijusių su kalba. Pirmieji žingsniai analizuojant ir sisteminant atliktus tyrimus pateikti [40] straipsnyje. Kaip ir visame pasaulyje, Lietuvoje daugiausiai dėmesio yra skiriama kalbos signalo sintezei ir atpažinimui.

Kalbos sintezės klausimai sprendžiami net kelių mokslininkų grupių [40–43]. Lietuvių kalbos sintezės ir automatinio žodžių kirčiavimo klausimai buvo nagrinėjami P. Kasparaičio darbuose [41, 44, 45]. Reikia pastebėti, kad šių tyrimų rezultatai realizuoti praktikoje. Sukurtų algoritmų pagrindu pasiūlyta internetinė svetainė vykdanči lietuvių kalbos sintezę iš įvesto teksto [46].

Kalbos atpažinimo tyrimuose nagrinėjami plataus spektro uždaviniai. Nuo pavienių žodžių išskyrimo ir atpažinimo [47, 48] iki ištisinės kalbos atpažinimo [49, 50]. Kalbos atpažinimui adaptuojama visa eilė metodų: taikant tiesinės prognozės koeficientus [51], dinaminio laiko mastelio keitimą [52], paslėptuosius Markovo modelius [53], dirbtinius neuroninius tinklus [54] ir t. t.

Garso signalų rekonstrukcija yra naujesnio tipo uždavinys. Buvo sprendžiami

dainų įrašų rekonstrukcijos klausimai [55, 56], šiam tikslui pritaikant dirbtinius neuroninius tinklus [55]. Vėliau nagrinėtas balso signalo atstatymas [57, 58].

Telekomunikacijų tinklų kokybės tyrimai daugelį metų buvo vykdomi Kauno technologijos universitete (KTU). Tie tyrimai orientuoti į informacijos rinkimą apie tinklo įrenginių būsenas ir tinklo, kaip sistemos, vertinimą. Atskirų su kokybe sietinų temų, kaip paketinio perdavimo, IP paslaugų kokybės klausimai, nagrinėti disertacijoje [59].

Balso kokybės problematika yra viena naujesnių tyrimų kryptių, kuri nors ir negausiai, tačiau vystoma ir Lietuvoje. Balso ir duomenų perdavimo bevieliais duomenų tinklais ir su tuo susijusios kokybės klausimai buvo nagrinėjami [60, 61] disertacijose. Paslaugų kokybės klausimai mobiliojo ryšio tinkluose taip pat nagrinėti [28] disertacijoje.

Paslaugų (balso, vaizdo, duomenų perdavimo) kokybės valdymas yra vienas svarbesnių uždavinių kuriant naujų kartų telekomunikacines sistemas. Naujausi tyrimai yra orientuojami į kokybės kaip parametro bei ją įtakančių veiksnių analizę.

2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Paplitus mobiliojo ryšio sistemoms, tenka keisti požiūrį į paslaugų kokybę. Anksčiau dominusią bendros tinklo vidutinės kokybės sampratą ir su ja susijusias vertinimo priemones tenka keisti nauja kokybės supratimo ir vertinimo versija. Šios versijos kertinis veiksnys – individualaus vartotojo patirta paslaugos kokybė.
2. GSM ir 3G ryšio sistemose balso signalas yra skaitmenizuojamas ir perduodamas paketais. Paketų praradimai kanale yra esminis veiksnys, lemiantis perduoto balso kokybę. Naudojamas balso kodekas taip pat įtakoja perduodamo balso kokybę, todėl kuriant kokybės vertinimo priemones tenka jas adaptuoti kiekvienam kodekui.
3. Literatūros analizė rodo, kad paketų praradimų dėsningumai yra nagrinėti įvairioms duomenų perdavimo sistemoms. Tačiau jų pagrindu sukurti paketų srautų modeliai neįvertina ryšio sąlygų. Balso paketų srautai GSM ar 3G sistemose nėra išsamiai nagrinėti.
4. PESQ algoritmas yra standartizuotas ir šiuo metu plačiausia taikomas vertinant balso kokybę. Tačiau tyrimai rodo, kad tam tikrose sąlygose PESQ gali sukurti dideles matavimo rezultatų neapibrėžtis.

GSM sistemos balso paketų praradimų analizė

Šiame skyriuje trumpai apžvelgiamas balso perdavimas mobiliojo ryšio sistemose. Pateikiamas metodas, leidžiantis nustatyti pokalbio metu pasitaikiusių sugadintų balso paketų pozicijas laiko ašyje. Apdorojus sukauptus eksperimentinius balso paketų srautų duomenis, sukuriama matematiniai modeliai.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai [3A, 5A].

3.1. Balso paketų srautų matavimo metodika

Antros ir trečios kartų mobiliojo ryšio sistemose perduodamas ne tik balsas, bet ir vartotojo duomenys. Visais atvejais pradinė naudinga informacija yra skaidoma į paketus, paskaičiuojamos kontrolinės sumos ir atliekamas kanalinis kodavimas. Reikia pastebėti, kad dėl skirtingų kontrolinių bitų skaičiavimų ir konvoliucinių kodų taikymo, balso ir duomenų paketų atsparumas trukdžiams yra nevienodas [62]. Literatūroje nors ir negausiai tačiau yra nagrinėti GSM CSD kanalu perduotų duomenų paketų srautų modeliai, o balso paketų praradimų kanale klausimai liko nepaliesti.

Standartinė, inžinerinė GSM tinklų parametrų matavimo įranga (pvz. *Ericsson TEMS Investigation 4.1*, *Motorola Cell Optimization Platform*) pateikia visą eilę

fizinio kanalo tarp MS ir BS parametrų. Tačiau tarp jų nėra balso paketų srautų parametrų, kurie yra būtini nagrinėjant paketų praradimų dėsninumus, vertinant perduoto balso kokybę. Dėl šios priežasties, teko gilintis į problemos esmę ir kurti metodiką bei priemones informacijai, apie balso paketų srautus, rinkti. 3.1 paveiksle parodyta balso paketų srautų rinkimo schema [5A].



3.1 pav. Balso paketų srautų duomenų rinkimo schema

Kompiuteris AK1 formuoja matavimo signalą $S(t)$, kuris per laisvą rankų įrangos mikrofono grandinę paduodamas į mobilių telefoną MS1. AK1 ir MS1 yra stacionarūs, nekilnojami. Tarp MS1 ir BS1 parenkamas geras ryšio kanalas su mažais klaidų kiekiais. Šioje vietoje laidinio ryšio telefono linija galėtų būti alternatyva, kuri garantuotų patikimą kanalą.

Matavimų metu sudaromas ryšio kanalas tarp mobiliųjų telefonų MS1 ir MS2. Abu telefonai gali būti prisiregistravę prie tos pačios bazinės stoties arba prie skirtingų bazinių stočių. Tai priklauso nuo jų geografinės padėties ir įtakos matavimams neturi.

Balso paketų srautai matuojami žemynkrypčiame kanale tarp BS2 ir MS2. Balso signalas $S^*(t)$ iš MS2 patenka į kompiuterį AK2 ir įrašomas į bylą. MS2 gali būti paprastas mobiliojo ryšio telefonas, tokiu atveju bus sukaupta informacija tik apie paketų srautus. 3.1 paveiksle parodytoje schemoje yra galimybė MS2 vietoje panaudoti inžinerinį telefoną (pvz.: TEMS Investigation 4.1). Tai leistų papildomai išmatuoti kitus kanalo parametrus ir juos susieti su balso paketų srautais.

Priimto signalo $S^*(t)$ analizė parodo ar konkretus balso paketas buvo priimtas ar prarastas.

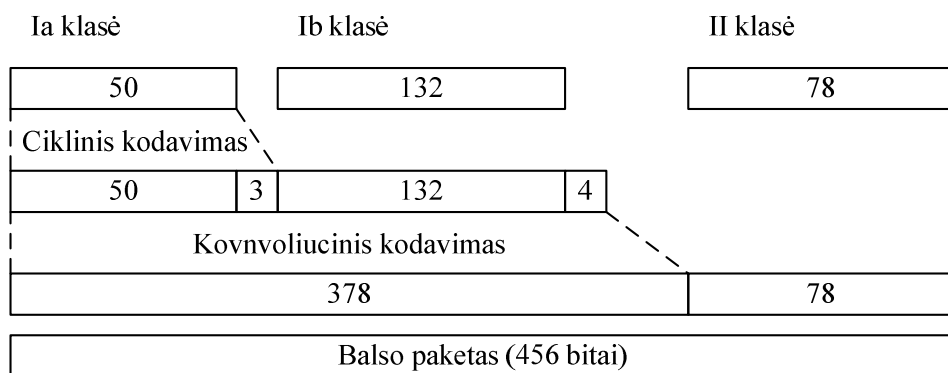
3.1.1. Balso perdavimo GSM sistemoje ypatumai

GSM ir 3G ryšio sistemose koduojamas balso signalas yra skaidomas į blokus po 20 ms, kvantuojamas 13 bitų ir diskretizuojamas 8 kHz. GSM 06.10 [63] kodekas kiekvieną segmentą koduoja ir sukuria 260 bitų duomenų masyvą.

Prieš kanalo kodavimą, masyvo bitai yra suskirstomi į klases pagal funkcijas ir svarbą. 182 bitai iš 260 bitų priskiriame I klasei, o likę 78 bitai – II klasei. I klasė yra papildomai padalinta į: Ia ir Ib klases.

Pati svarbiausia yra Ia klasė kurią sudaro 50 reikšmingiausių bitų. Ji koduojama cikliniu kodu ir papildoma 3 kontroliniais bitais. Antra, pagal svarbą, yra Ib klasė, kuri sudaryta iš 132 bitų.

Prie I klasės papildomai yra pridedami keturi nuliniai bitai, skirti dekodavimui. Toliau turimas bitų masyvas yra koduojamas konvoliuciniu kodu, kurio koeficientai $r = 0,5$, $K = 5$. Gaunamas 378 bitų masyvas. Mažiausiai svarbūs yra II klasės bitai. Šiai klasei netaikomas joks kodavimas. Bitai tiesiog pridedami prie konvoliucinio koderio išėjimo bloko ir eteriu perduodami be jokios apsaugos (3.2 pav.).



3.2 pav. Kalbos kanalo kodavimas

Jei dekoduoiant perduotą paketą Ia klasėje aptinkama klaida, balso paketas laikomas prarastu.

Praradus paketą ar keletą jų iš eilės, dekoduoiant signale susidarytų tušti segmentai. Tokiame iškarpytame signale neužpildyti segmentai būtų girdimi kaip impulsiniai trukdžiai ir klausant sudarytų labai nemalonų įspūdį.

Yra žinoma keletas algoritmų, kaip sukurti prarastų signalo segmentų pakaitalus. Vienas iš jų yra skirtas GSM 06.10 kodekui ir aprašytas ETSI rekomendacijoje GSM 06.11 [30]. Čia aprašytos taisyklės kaip MS užpildomi vietoj prarastų paketų atsiradę tušti laikotarpiai.

GSM 06.10 dekoderis pirmą prarastą paketą pakeičia prieš tai buvusiu, teisingai dekoduoju paketu. Taigi, i – ojo prarasto paketo balso signalo segmentas rekonstruojamas pagal 3.1 formulę:

$$v_i = a_i v_0. \quad (3.1)$$

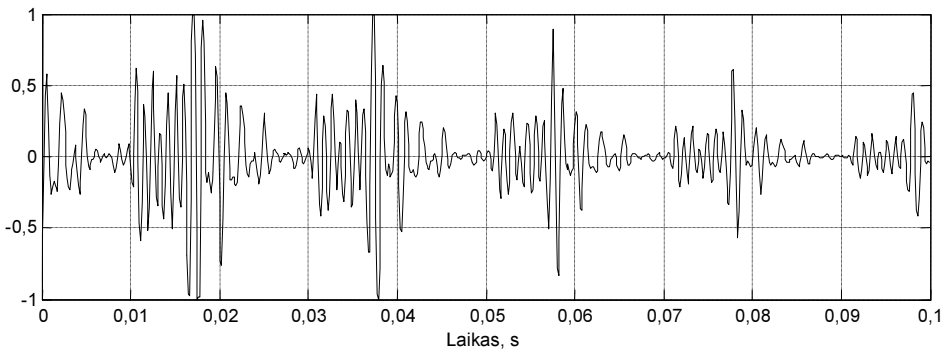
Čia v_0 – paskutinis teisingai priimtas balso signalo segmentas (paketas), v_i – rekonstruotas balso signalo segmentas, i – iš eilės prarasto paketo numeris, a_i – slopinimo koeficientas.

Kai pasitaiko keli iš eilės prarasti paketai, tuomet kiekvieno jų vietoje

kartojamas paskutinis teisingai priimtas paketas ir papildomai mažinama signalo energija.

Pagal GSM 06.11 rekomendaciją, visais atvejais, po 16 paketų pakartojimų iš eilės signalo energija tampa lygi nuliui.

3.3 paveiksle parodytas 0,1 s (5 paketai) trukmės signalo fragmentas. Pirmasis paketas (0–0,02 s) priimtas be klaidų, likę keturi paketai buvo prarasti. Jų vietoje dekoderis kartoja pirmąjį paketą, mažindamas signalo energiją.



3.3 pav. Signalas MS „Motorolla 350“ dekoderio išėjime esant 4 iš eilės prarastiems balso paketams

Kaip matyti iš (3.1) išraiškos ir 3.3 paveikslo, praradus vieną ar kelis paketus, dekoderio išėjime susikuria dvi arba daugiau viena paskui kitą einančios identiškos (skiriasi tik amplitudėmis) 20 ms trukmės signalo atkarpos.

3.1.2. Prarasto paketo indikatoriai

Išvertinant (3.1) išraišką, dekoduojamame signalė tarp rekonstruoto signalo segmento v_i ir prieš jį esančio v_{i-1} (teisingai priimto ar taip pat rekonstruoto) yra stipri koreliacija:

$$R(v_i, v_{i-1}) = \frac{\int_0^T v_i(t) \cdot v_{i-1}(t) dt}{\sqrt{\int_0^T v_i(t)^2 dt \cdot \int_0^T v_{i-1}(t)^2 dt}} \approx 1, \quad (3.2)$$

čia $T = 20$ ms – dekoduojamo balso segmento trukmė.

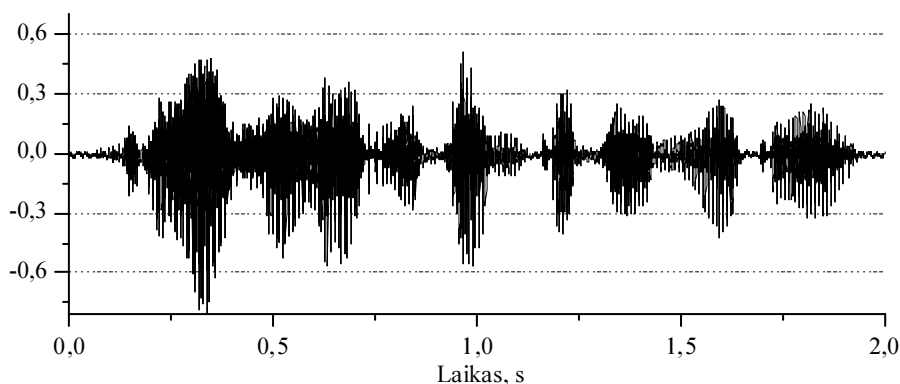
Kaip matyti, kai balsas koduojamas ir dekoduojamas GSM 06.10 kodėku, laikotarpiams, kai prarandami paketai, gretimų segmentų tarpusavio koreliacijos koeficientas tampa artimas vienetui.

Gretimų segmentų tarpusavio koreliacijos koeficiento žymūs padidėjimai yra

pagrindinis prarasto balso paketo požymis. Kuriant prarastų balso paketų matavimo bei analizės sistemą kartu su šiuo požymiu panaudotas ir kitas – signalo atkarpos v_i energija, kuri didėjant i mažėja.

3.1.3. Matavimo signalo sintezė

Žmogaus kalbos sukurto signalo galia, kaip matyti 3.4 paveiksle nuolat kinta. Laiko ašyje gretimos signalo atkarpos yra tarpusavyje koreliuoja. Be to, kalboje yra tylos intervalai, kurių metu balso kodekų DTX mechanizmas stabdo balso paketų perdavimą [64]. Siunčiami tik pavieniai, tylą aprašantys SID paketai [65]. Dėl šių priežasčių kalba negali būti panaudota kaip matavimo – $S(t)$ signalas.



3.4 pav. Dviejų sekundžių trukmės balso segmento pavyzdys

Siekiant išskirti kiekvieną kalbos paketą reikia, kad testinis signalas keistų savybes kas 20 ms. Paprasčiausias sprendimas – panaudoti 20 ms trukmės, keleto dažnių sinusinius virpesius. Iš kodeko dažninės amplitudės charakteristikos [63] matyti, kad dažnių juostoje nuo 300 Hz iki 1300 Hz signalai perduodami su mažiausiu slopinimu, todėl sinusiniai virpesiai galėtų būti parenkami iš šio nurodyto diapazono.

Kita problema atsiranda dėl kalbos aktyvumo detektoriaus (KAD). Jei signalas yra siaurajuostis, mažos energijos, tai KAD sprendžia, kad tai aplinkinis triukšmas, įjungia DTX mechanizmą ir neperduoda šių paketų. Ši problema gali būti sprendžiama generuojant kompleksiškesnį matavimo signalą. Neblogų rezultatų pavyko gauti formuojant signalą $S(t)$ pagal (3.3) formulę [3A]. Jis sudarytas iš 11 skirtingo dažnio sinusinių virpesių segmentų:

$$S(t) = s_1(t) + s_7(t - T) + s_2(t - 2T) + \dots + s_{11}(t - 10T) + s_6(t - 11T), \quad (3.3)$$

čia $T = 20$ ms – vienos sinusoidės trukmė, o

$$s_i(t) = \begin{cases} \sin(\Omega_i \cdot t), & \text{kai } t \in [0, T] \\ 0, & \text{kai } t \notin [0, T] \end{cases} \quad (3.4)$$

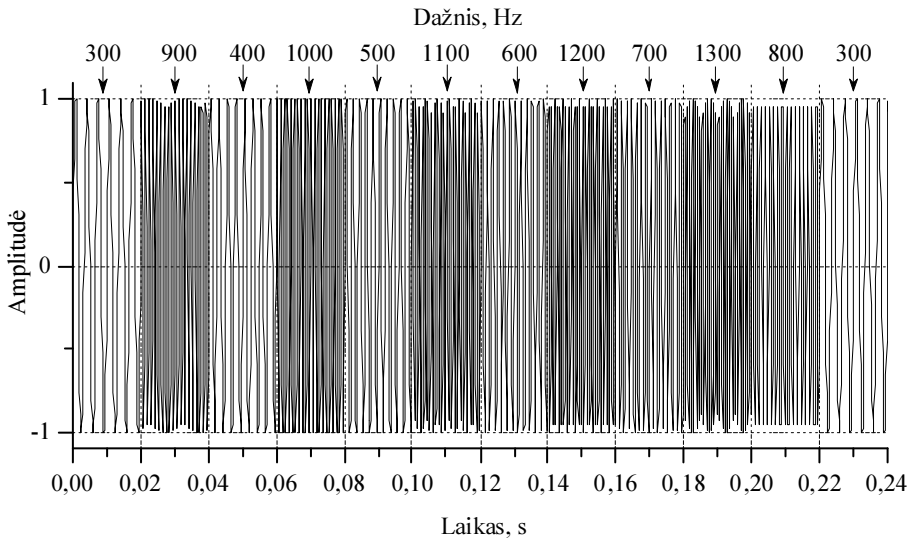
Matavimo signalo sinusoidžių dažniai turi būti kartotini:

$$|\Omega_i - \Omega_{i-1}| = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot k, \quad (3.5)$$

čia $f_0 = 1/T = 50$ Hz, k – sveikas skaičius. Tai užtikrins pilną sinusoidės periodų skaičių perduodamame balso pakete ir minimalią koreliaciją tarp gretimų paketų. Atsižvelgiant į šiuos reikalavimus Ω_i skaičiuojami

$$\Omega_i = 2 \cdot \pi \cdot (300 + 100 \cdot (i - 1)), \text{ kai } i = 1, 2, \dots, 11. \quad (3.6)$$

3.5 paveiksle parodytas matavimo signalo fragmentas. Signalą sudaro 11 20 ms trukmės sinusoidžių atkarpų. Kiekvienos jų dažniai išsidėstę taip, kad gretimi segmentai skiriasi 500 arba 600 Hz. Signalas pasibaigia 800 Hz sinusoide, o naujas periodas prasideda 300 Hz, todėl tarp periodų taip pat išlaikomas 500 Hz skirtumas.

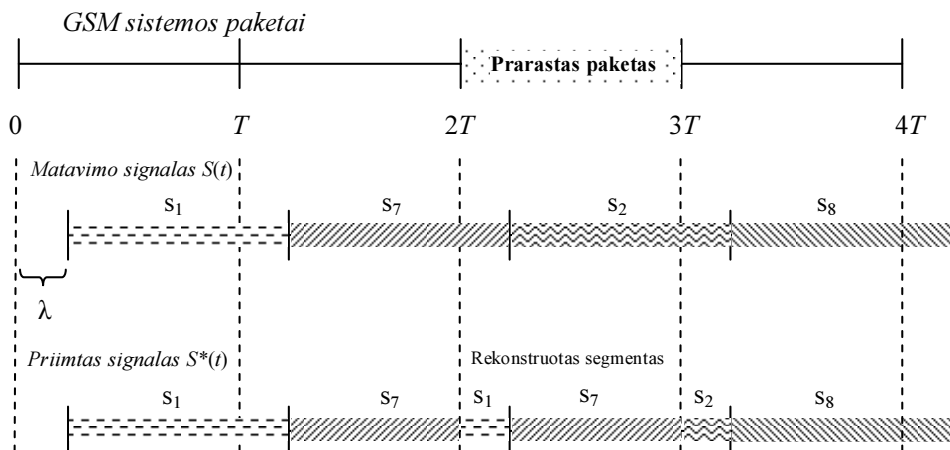


3.5 pav. Matavimo signalo fragmentas. Periodo trukmė 220 ms. Signalas diskretizuotas 8 kHz

Realiuose eksperimentuose matavimo signalas $S(t)$ nėra sinchronizuotas su GSM tinklo balso paketų formavimu. Signalas ir tinklo paketas pasislinkę vienas kito atžvilgiu laiko tarpu λ . Tokiu atveju, į vieną tinklo paketą papuola dviejų sinusoidžių fragmentai (3.6 pav.). Priimate signale $S^*(t)$, prarasto paketo

vietoje, gausime šių fragmentų kopijas. Dėl šios priežasties darosi sudėtinga taikyti dažninį priimto signalo analizės metodą.

Kaip žemiau bus parodyta, koreliacinis prarastų paketų pozicijų skaičiavimo būdas išvengia sinchronizacijos problemų.



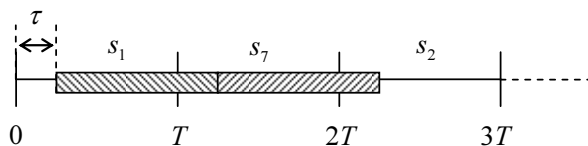
3.6 pav. Priimto matavimo signalo fragmentacija esant nesinchronizuotiems GSM sistemos paketams ir matavimo signalui

Pagal (3.3 – 3.6) suformuotas matavimo signalas pasižymi šiomis savybėmis:

- Yra pastovios energijos.
- Gretimi 20 ms trukmės signalo segmentai silpnai koreliuoti.
- Gretimų sinusoidžių dažniai skiriasi 500 arba 600 Hz.
- KAD šio signalo nepriskiria triukšmui.

3.1.4. Prarastų paketų pozicijų nustatymo algoritmas

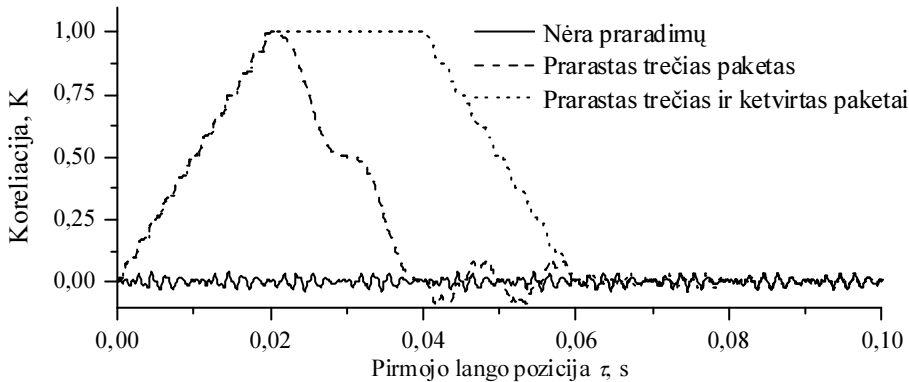
Pirmasis kriterijus, leidžiantis nustatyti ar buvo prarastas balso paketas – padidėjusi koreliacija. Tam tikslui per MS2 priimtą matavimo signalą $S^*(t)$ slenkami du, vienas paskui kitą, 20 ms trukmės langai (3.7 pav.).



3.7 pav. Koreliacijos skaičiavimo langai

Realiuose bandymuose priimtas signalas $S^*(t)$ yra diskretizuojamas 8 kHz, todėl 20 ms signalo atkarpą sudaro 160 atskaitų. Keičiant langų poziciją kas vieną atskaitą, apskaičiuojama languose esančių signalų savitarpio koreliacijos koeficientas K ir gaunama koreliacinė funkcija $K(\tau)$.

3.8 paveiksle pateikti pagal (3.3) suformuoto matavimo signalo $S(t)$ ir slenkančiuose languose paskaičiuotos koreliacinės funkcijos $K(\tau)$ modeliavimo rezultatai, kai perduodant testinį signalą nėra prarastų paketų, kai prarastas antrasis paketas ir kai prarasti antrasis ir trečiasis paketai.



3.8 pav. Koreliacinės funkcijos grafikai, kai praradimų nebuvo, buvo prarastas vienas ir du paketai.

Jei praradimų nėra, koreliacinė funkcija turi tik nežymius svyravimus, kurių forma priklauso nuo į langus papuolančių sinusoidžių dažnių. Vienas prarastas paketas sukelia koreliacijos koeficiento padidėjimą, kuris trunka 40 ms. Du iš eilės prarasti paketai sukelia 60 ms trunkantį koreliacijos koeficiento padidėjimą ir t. t. Iš eilės prarastų paketų skaičius randamas įvertinant gautos funkcijos formą.

$$N_p = \frac{T_c + T_{sl} - T}{T}, \quad (3.7)$$

čia T_c – laiko trukmė, kai koreliacinės funkcijos $K(\tau)$ viena paskui kitą einančios vertės viršija slenkstinę vertę, T_{sl} – koeficientas įvertinantis slenkščio įtaką, $T = 20$ ms – kaip ir anksčiau, paketo trukmė.

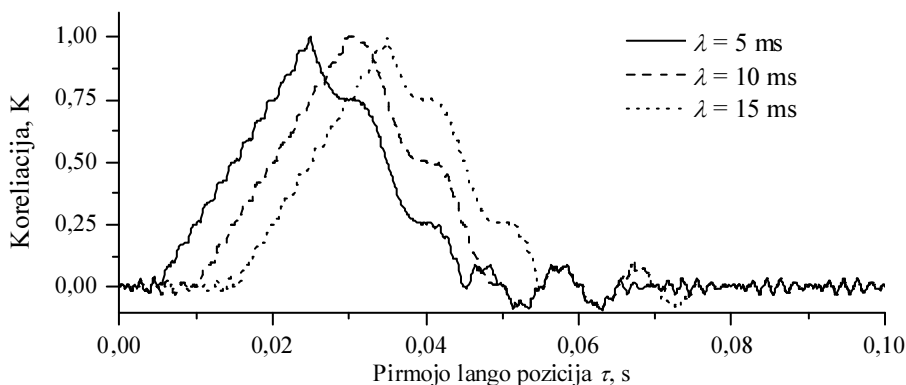
Pirmojo paketo padėtis laiko ašyje, iš prarastų paketų serijos, randama pagal

$$t_p = \frac{t_c}{T}. \quad (3.8)$$

Čia t_p – prarasto paketo padėtis (paketo eilės numeris nagrinėjamame signale), t_c – laiko momentas, kai $K(t_c)$ pirmą kartą viršija slenkstį.

Pasirinktas matavimo signalas ir koreliacinis padėčių nustatymo metodas leidžia atpažinti iki 11 iš eilės einančių praradimų seriją. 12-tame pakete prasideda naujas signalo $S(t)$ periodas ir pirmasis jo fragmentas koreliuos su prieš tai buvusiais. Kad išvengtų šios neapibrėžties, tenka tikrinti 12-tojo paketo energiją. Jei šis paketas buvo prarastas, tai po eilės pakartojimų jo energija bus žymiai mažesnė (~10 %) už teisingai priimto paketo energiją.

Kaip jau minėta anksčiau, dėl GSM tinklo paketų ir matavimo signalo nesutapdinimo, prarasto paketo vietoje atsiranda dviejų sinusoidžių segmentai. 3.9 paveiksle parodytos 3 koreliacinės funkcijos esant skirtingoms paketų nesutapimo λ vertėms.



3.9 pav. Signalu su vienu pakartotu paketu koreliacinės funkcijos esant skirtingoms λ parametro reikšmėms

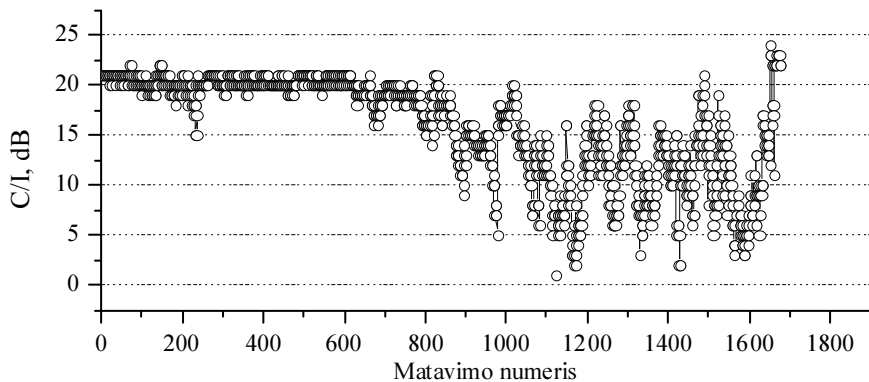
Iš šio grafiko matyti, kad kai $\lambda \neq 0$, gaunami papildomi koreliacinės funkcijos iškraipymai. Tačiau jų amplitudė yra pakankamai maža ir šis efektas netrukdo aptikti prarastų paketų padėtis.

3.2. Balso paketų srautų matematiniai modeliai

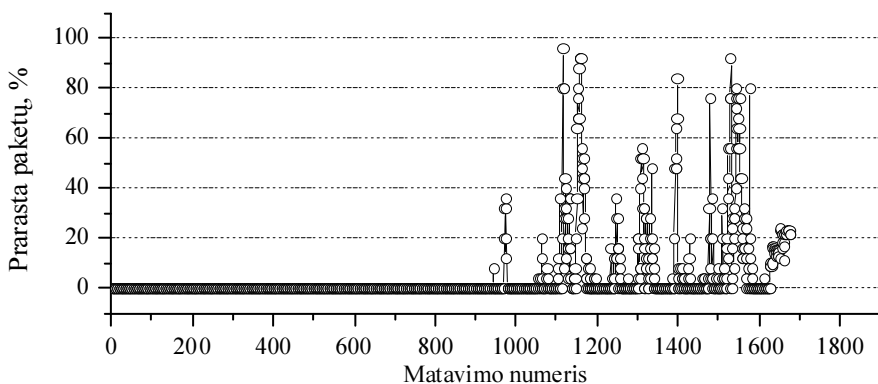
3.2.1. Balso paketų srautų matavimai

GSM ir 3G ryšio sistemose balsas yra perduodamas paketais. Šių paketų sugadinimas, t. y. jų praradimas ryšio kanale, yra esminis kriterijus nulemiantis balso kokybės pablogėjimą. Nagrinėjant individualaus vartotojo gaunamą kalbos kokybę tokio tipo telekomunikacinėse sistemose yra svarbu žinoti kokiomis savybėmis pasižymi paketų srautai (priimtų ir pamestų paketų sekos). Kokiose sąlygose atsiranda praradimai, kaip pasiskirsto iš eilės prarastų paketų serijos, kokie atstumai tarp dviejų praradimų ir panašiai.

Literatūros analizė rodo [28, 66], kad konkrečiam mobiliojo ryšio vartotojui gali pasitaikyti labai įvairios ryšio sąlygos. 3.10 paveiksle parodyta kaip gali keistis ryšio sąlygos vartotojui. Matavimų rezultatai gauti naudojant „TEMS investigation 4.1“ įrangą.



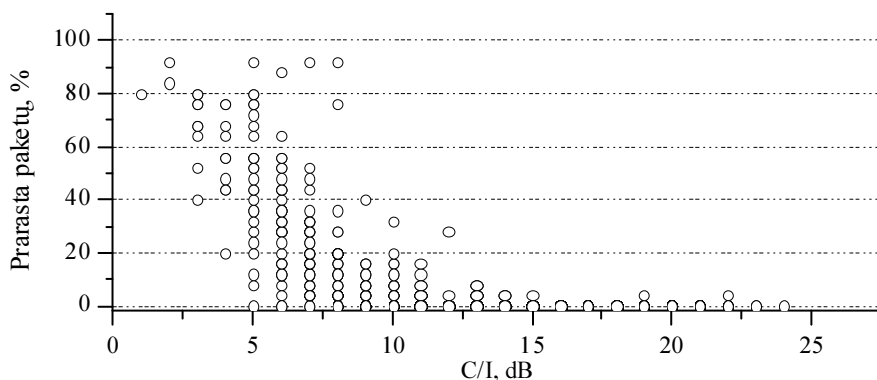
(a) interferencijos parametro C/I kitimas



(b) balso paketų praradimai

3.10 pav. Vartotojo ryšio sąlygų kitimas ir susikuriantys paketų praradimai

Matavimą sudaro 1500 taškų, kurie gauti judant 90 km/h greičiu iš gerų ryšio sąlygų (gyvenvietė) į prasto ryšio aplinką (miškas, didelis atstumas nuo BS) ir vėl į gero ryšio zoną kitoje gyvenvietėje. „TEMS investigation 4.1“ interferencijos parametro C/I vertę pateikia 480 ms trukmės intervalams [34] (GSM sistemos galios valdymo periodas), todėl du matavimo taškus skiria 480 ms. Per šį laikotarpį yra perduodami 24 balso paketai. Įranga fiksuoja kiek šių paketų buvo prarasta (3.11 pav.), bet nepateikia jokios papildomos informacijos apie praradimų išsidėstymą.



3.11 pav. Prarastų balso paketų pasiskirstymas esant konkrečiai C/I vertei

3.10 paveiksle nesunkiai pastebima, kad balso paketų praradimai priklauso nuo fizinio kanalo parametru. Gerosė ryšio sąlygose paketų praradimai yra atsitiktiniai, pavieniai ir reti. Vieną prarastą paketą dekoderio prarastų paketų pakeitimo mechanizmas efektyviai užmaskuoja, todėl bendra balso kokybė nukenčia nežymiai. Be to, tokių praradimų modelis yra elementarus, pvz. paremtas atsitiktiniais ir nepriklausomais įvykiais, kurių statistika randama iš matavimo duomenų.

Signalų C/I santykio lygiui nukritus žemiau 15 dB prasideda reguliarūs, pavienių paketų praradimai. Esant dar mažesniau signalo C/I santykiui, praradimų skaičius didėja, pradeda formuotis keletos iš eilės prarastų paketų grupės. Tokiose sąlygose susikuria esminiai kalbos kokybės pablogėjimai.

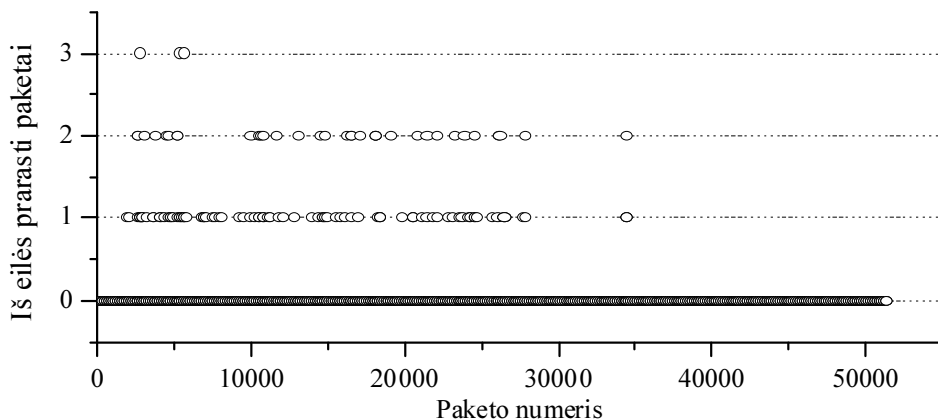
3.1 lentelė. Matavimams naudota įranga

MS2 funkcijas (3.1 pav.) atlieka:	Matavimų rezultatas	Matavimų trukmė, s	Pastaba
1. Elementarus GSM mobiliojo ryšio aparatas (Motorola C350, C380)	Balso paketų srautai.	3600	Nėra informacijos apie kanalą
2. MDTT (Motorola Drive Test Tool) inžinerinis GSM mobiliojo ryšio aparatas	Balso paketų srautai. Fizinio kanalo parametrai, atnaujinti kas 2,4 s	1800	Neišvedamas C/I parametras, nėra informacijos apie FER
3. TEMS Investigation 4.1 įranga	Balso paketų srautai. Fizinio kanalo parametrai, atnaujinti kas 0,480 s	600	Turima pilna informacija apie kanalą

Balso paketų srautų matavimai buvo atlikti pasinaudojant 3.1 skyriuje aprašyta metodika ir įranga. Dauguma jų užmiestyje, prasto ryšio sąlygomis, pvz.: celės aprėptiems pakraščiuose. Tokie selektyvūs (ryšio sąlygų atžvilgiu) matavimai leidžia per trumpą laiką sukaupti reikšmingą kiekį informacijos apie praradimų tendencijas. Tyrimams sukaupti balso paketų srautai yra gauti naudojant trijų tipų galinę vartotojo įrangą (3.1 lentelė).

Visi matavimai atlikti natūraliomis sąlygomis, nenaudojant dirbtinio signalo slopinimo. Tai leidžia tikėtis, kad gauti rezultatai parodo realius paketų praradimus, kurie gali pasitaikyti individualiam vartotojui. Gauti duomenys niekaip neatspindi vidutinės pasitaikančių paketų praradimų statistikos, vertinant ją tinklo mastu. Jie atspindi prarastų paketų statistiką tik prasto ryšio sąlygose.

3.12 paveiksle parodytas balso paketų srautas, gautas vartotojui judant tarp skirtingo ryšio kokybės zonų. Sraute atsispindi tiek blogo, tiek ir gero ryšio sąlygos.



3.12 pav. Balso paketų srautas. Matavimo trukmė ~16 min.

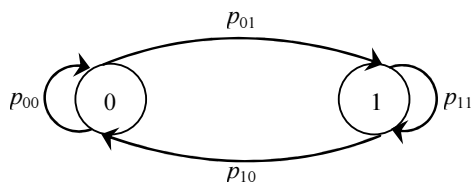
Dėl nuolatos kintančių ryšio sąlygų, išmatuotų srautų negalima laikyti stacionariais. Sudarant balso paketų srautų modelius, neišvengiamai tenka įvertinti realiai pasitaikiusias ryšio sąlygas.

3.2.2. Duomenų paketų srautų modeliai

Mokslinėje literatūroje nemažai dėmesio skiriama prarastų paketų srautų tyrimams ir tų srautų modeliams. Pradinių etapų darbuose paprastai pasirenkami paprasčiausi modeliai: Bernulio (angl. *Bernoulli*) modelis, kai kiekvieno paketo praradimas yra skaitomas nepriklausomu įvykiu [67]. Tokiam modeliui sudaryti pakanka nustatyti paketo praradimo tikimybę p . Literatūros analizė rodo, kad bevieliuose duomenų perdavimo tinkluose prarastų paketų modeliams yra

naudojamas Gilberto/Elijoto (angl. *Gilbert/Elliott*) modelis (2 būvių Markovo grandinė) [11, 68–73]. Atskirą vietą paketų sekoms generuoti užima N būvių modelis [70, 74, 75]. Taip pat bandoma taikyti paslėptuosius Markovo modelius [10, 76, 77].

Kaip jau minėta, paketų praradimams modeliuoti plačiausiai taikoma dviejų būvių Markovo grandinė (3.13 pav.).



3.13 pav. 2 būvių Markovo grandinė

Čia būsena „0“ reiškia teisingai priimtą kalbos paketą, o „1“ prarastą paketą. Tokia grandinė generuoja „0“ ir „1“ seką. Grandinę charakterizuoja perėjimų tikimybės

$$P = \begin{pmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{pmatrix}. \quad (3.9)$$

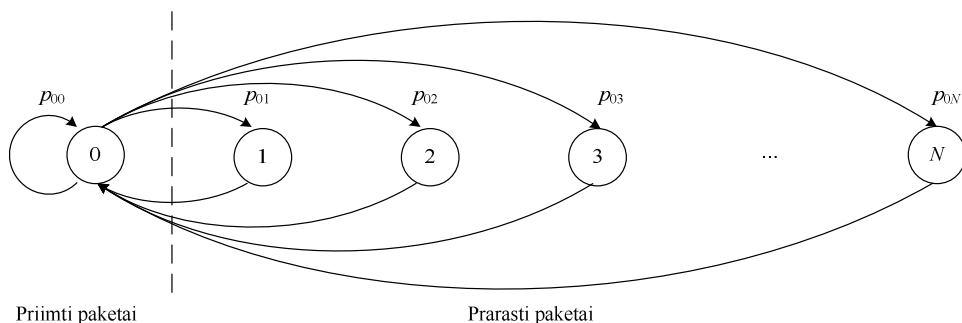
Šiuo atveju p_{00} ir p_{11} yra tarpusavyje nepriklausomos tikimybės likti esamuose būviuose, o perėjimo tikimybės p_{01} ir p_{10} randamos pagal

$$p_{01} = 1 - p_{00}, \quad p_{10} = 1 - p_{11}. \quad (3.10)$$

Jei paketas yra priimtas, tai tikimybė, kad kitas paketas bus prarastas yra p_{01} . Tikimybė, kad bus prarastas ir antras paketas yra p_{11} . Tikimybė prarasti du iš eilės paketus (jei prieš tai buvo priimtas teisingai) $p = p_{01} \cdot p_{11}$, tris iš eilės $p = p_{01} \cdot p_{11} \cdot p_{11}$ ir t. t. Iš to seka, kad modelio generuojami prarastų paketų sekų ilgiai, bus pasiskirstę pagal geometrinį skirstinį. Tą patį galima pasakyti ir apie teisingai priimtus paketus. Sugeneruotame sraute teisingai priimtų paketų grupių ilgiai taip pat bus pasiskirstę pagal geometrinį dėsnį. Pagrindinė šio modelio problema, kad jis gali sugeneruoti tokias prarastų paketų serijas, kokių realiose situacijose nepasitaiko. Pavyzdžiui, dvidešimt ar daugiau iš eilės prarastų paketų, nors realiai sukaupuose ir modelio parametrų skaičiavimuose naudotuose srautuose tokių kombinacijų nepasitaikė.

Sudėtingesniam nei geometrinis skirstinys srautui generuoti gali būti taikoma N būvių grandinė. Vertinant balso paketų srautus iš kalbos kokybės pozicijų, svarbiausias faktorius yra prarasti paketai ir jų sekos. Klasikinė N būvių grandinė modeliuoja iš eilės teisingai priimtų paketų sekas tarp dviejų praradimų.

Uždaviniai yra panašūs, tereikia pakeisti būvių žymėjimus (3.14 pav.). Čia būseną „0“ reiškia teisingai priimtą paketą, o likusios būsenos atitinka iš eilės prarastų paketų skaičių. Šiuo atveju, teisingai priimtų paketų serijų ilgiai, kaip ir anksčiau, lieka pasiskirstę pagal geometrinę dėsnį, tačiau prarastų paketų serijų ilgiai gali būti generuojami su skirtingomis tikimybėmis. Būsenų skaičius N parenkamas atsižvelgiant į technines arba stebėjimų sąlygas. GSM atveju, modeliuojant 480 ms trukmės srautus, $N = 24$ (ir papildoma nulinė būseną teisingai priimtiems paketams).



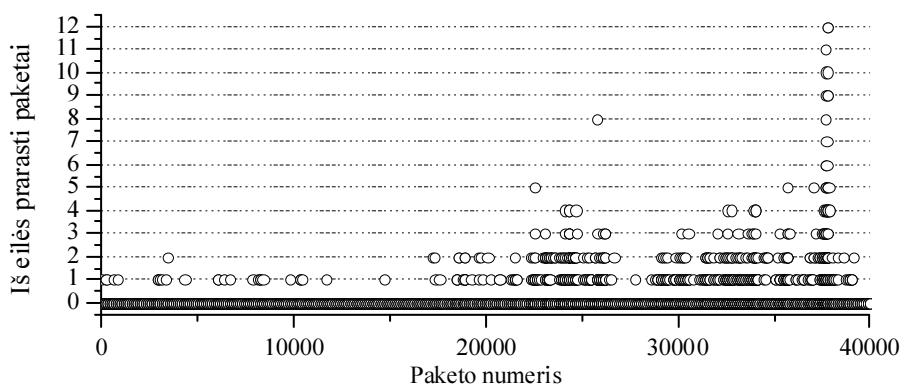
3.14 pav. N būvių modelis

Abu modeliai generuoja srautus pagal paketų praradimų statistiką panašius į apmokantį srautą, tačiau nesusietus su fizinio kanalo charakteristikomis. Bendru atveju rezultatas atspindi tik apibendrintas, vidutines ryšio sąlygas, kurios pasitaikė atliekant matavimus. Tokius modelius yra sudėtinga taikyti konkrečioms ryšio sąlygoms. Žemiau bus parodyta, kaip adaptuoti Markovo grandinėmis paremtus modelius balso paketų srautų modeliavimui įvertinant ryšio sąlygas.

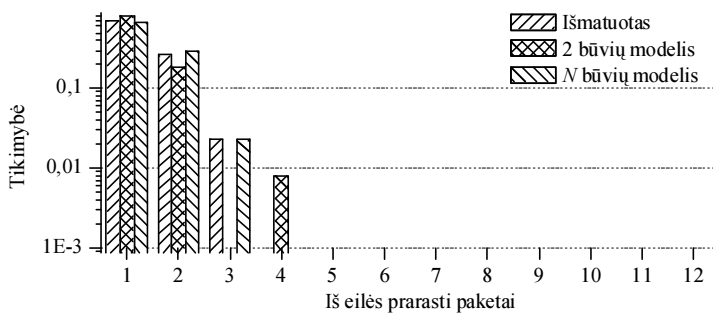
3.2.3. Modelių pritaikymas balso paketų srautams

Pabandykime pritaikyti 2 būvių ir N būvių modelius 3.12 ir 3.14 paveiksluose parodytiems paketų srautams.

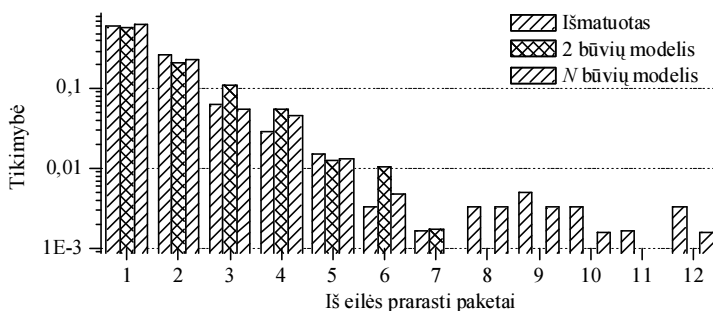
Modelių perėjimo tikimybės tarp būvių apskaičiuojamos iš realiai išmatuotų srautų. Turint tikimybių rinkinius, sugeneruojami tokio paties ilgio paketų srautai. 3.15 paveiksle parodyti šių srautų iš eilės prarastų paketų skirstiniai. 3.15 paveiksle matyti, kad esant pavieniams praradimams, abu modeliai neblogai atkartoja srauto parametrus, tačiau esant sudėtingesniems praradimams (antras srautas), N būvių grandinė generuoja panašesnę srautą nei 2 būvių. 3.16 paveiksle parodyti sugeneruoti ir išmatuoti srautai.



3.14 pav. Balso paketų srautas. Judėjimo greitis 60 km/h, miškinga teritorija



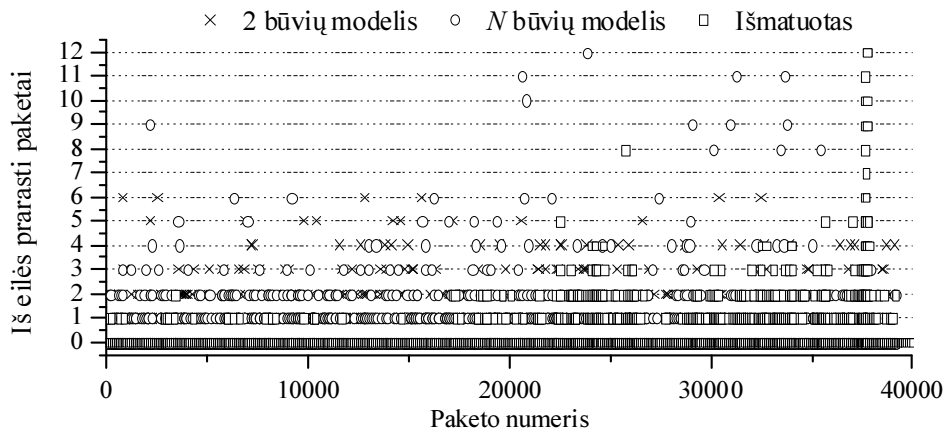
(a) srautas iki 3 iš eilės prarastų paketų



(b) srautas iki 12 iš eilės prarastų paketų

3.15 pav. 2 būvių ir N būvių modeliais sugeneruotų srautų prarastų paketų skirstiniai

Ryšio sąlygos nuolat kinta, todėl paketų praradimas yra nestacionarus procesas, tuo tarpu nagrinėjami modeliai generuoja stacionarų procesą. Nesunkiai galima pastebėti, kad prarastų paketų sekos yra pasiskirsčiusios tolygiai per visą srautą. Taip sugeneruota seka neatspindi ryšio sąlygų pokyčio.



3.16 pav. Išmatuoto ir modelių sugeneruotų srautų palyginimas

Iš analizės ir modeliavimo rezultatų galima suformuluoti tokią N būvių modelio savybę:

- Toks modelis negali sugeneruoti sekos, kurios nebuvo apmokant grandinę. Pavyzdžiui, jei surinktame sraute (kuris yra baigtinio ilgio) nepasitaikė 5 iš eilės prarastų paketų kombinacijos, nors buvo 6, 7 ar ilgesnės, tai modelis ir generuos srautą be serijų iš 5 paketų. Akivaizdu, kad 5 iš eilės prarasti paketai yra tikėtini, tačiau modelis to neįvertins. Perėjimo tikimybių skaičiavimas reikalauja, kad naudojamame sraute būtų visos įmanomos klaidingai priimtų paketų serijos. Tai iškelia papildomus reikalavimus srautų matavimui.

Jei ryšio sąlygos būtų klasifikuotos, o modelių perėjimų tikimybės apskaičiuotos kiekvienai klasei, generuojamus srautus būtų galima taikyti plačiau. Užsiduodant konkrečiam vartotojui pasitaikiusias ryšio sąlygas, generuoti atitinkamą srautą ir prognozuoti galimą perduoto balso kokybę.

Ryšio sąlygų įvertinimas pasitelkiant išmatuotą srautą

Išmatuotus paketų srautus tenka skaidyti į trumpesnes atkarpas, kurios gali būti laikomos stacionariomis. Darbe [10] aprašytuose eksperimentuose buvo naudojamos kelių tūkstančių paketų trukmės atkarpos. Tai atitinka keletą minučių, tačiau, kaip buvo parodyta anksčiau, realios ryšio sąlygos kinta daug

sparčiau. Be to, kuo srauto atkarpa trumpesnė, tuo labiau ryškėja stacionarumo savybė.

Kaip jau minėta, GSM galių valdymas vykdomas kas 480 ms, o tai atitinka 24 paketus. Tuo laikotarpiu mobilios ir bazinės stočių galia nekinta, todėl galima daryti prielaidą, kad kanalo parametrai taip pat nekinta arba pakinta nedaug. Remdamiesi šia prielaida, paketų srautus skaidome į 24 paketų atkarpas. Lentelėje 3.2 pateiktos ryšio kokybės zonų priskyrimas. Zonos suformuotos atsižvelgiant į 3.11 paveiksle parodytus, vidutinio prarastų paketų skaičiaus pasiskirstymo esant skirtingoms C/I vertėms, matavimo rezultatus.

3.2 lentelė. Ryšio zonų parametrai

Ryšio sąlygos	Prarastų paketų skaičius zonoje	FER, %	C/I, dB
„Geros“	1	≤ 4	> 15
„Vidutinės“	nuo 2 iki 4	$4 < FER \leq 17$	11 ... 15
„Blogos“	nuo 5 iki 13	$17 < FER \leq 58$	5 ... 10
„Nepriimtinos“	daugiau kaip 13	> 58	< 5

Turint prarastų paketų srautus, bet neturint papildomos informacijos apie kanalo parametrus (matavimai atlikti su galinio vartotojo įranga), ryšio kokybės zonos galėtų būti formuojamos atsižvelgiant tik į prarastų paketų vidurkį (pagal 3.2 lentelę).

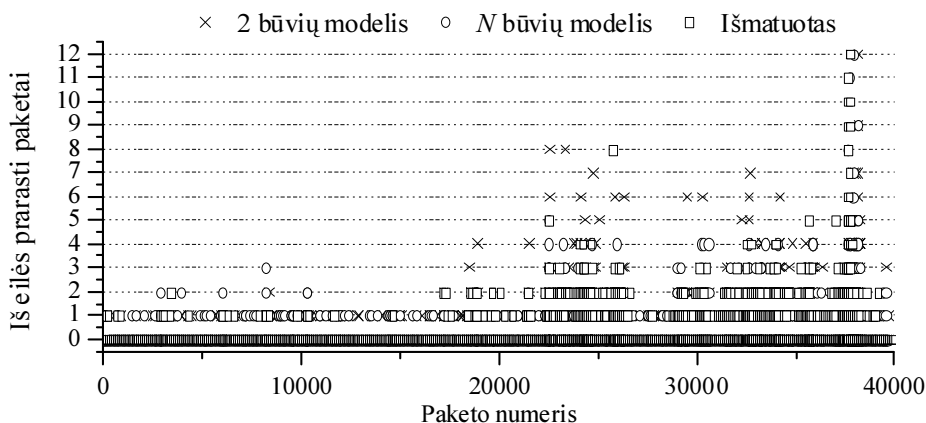
Išmatuotą paketų srautą suskaidžius į ryšio kokybės zonas, kiekvienai jų skaičiuojamas nuosavas modelio perėjimo tikimybių rinkinys. Generuojant naują srautą, pagal pasirinktas ryšio sąlygas, keičiami perėjimo tikimybių rinkiniai.

3.17 paveiksle pateiktas pavyzdys, kai naudojama informacija apie matavimo zonų kitimus.

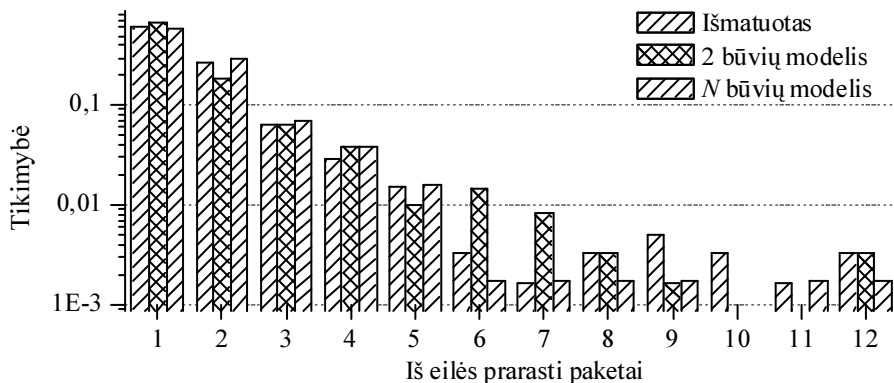
Ryšio kokybės zonų įvedimas daug geriau atkartoje realius matavimus. 2 būvių grandinėle su 4 tikimybių rinkiniais taip pat geriau išlaiko iš eilės prarastų paketų statistiką.

Modelių su ryšio kokybės zonų įvertinimu neigiamos savybės:

- Kiekvienoje kokybės zonoje generuojamas srautas pagal prarastų paketų statistiką bus panašus į apmokantį srautą. Ypač tai aktualu N būvių grandinei.
- Prarastų paketų vidurkis gali būti vienodas esant skirtingai C/I parametro vertei, tačiau iš eilės prarastų paketų sekos gali skirtis. Grandinių perėjimo tikimybės apskaičiuotos įvertinant pagal FER suformuotas ryšio kokybės zonas, gali nesutapti su kitais kriterijais paremtomis ryšio kokybės zonomis.



(a) Išmatuotas ir sugeneruoti paketų srautai



(b) iš eilės prarastų paketų pasiskirstymas

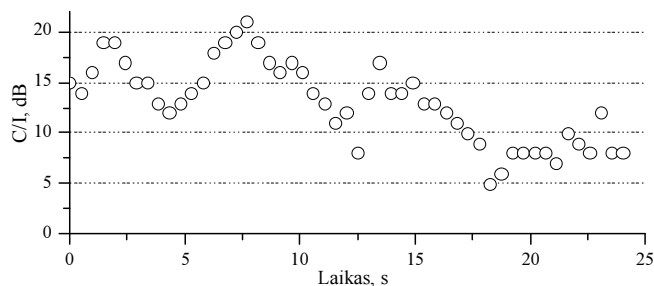
3.17 pav. Išmatuoto ir sugeneruotų 2 būvių ir N būvių modeliais su zonų įvertinimu srautų palyginimas

Ryšio sąlygų įvertinimas pasitelkiant interferencijos parametą C/I

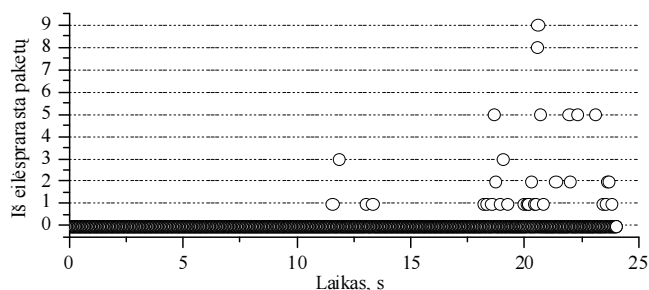
Integruojant prarastų paketų aptikimo metodą su „TEMS investigation 4.1“ matavimo įranga, kiekvienai 480 ms atkarpai galima rasti matavimo metu pasitaikiusias fizinio kanalo C/I vertes. Kiekvienai 24 paketų sekai priskiriama viena C/I vertė. 3.18 paveiksle parodytas C/I kitimo pavyzdys ir tuo pačiu matavimu gautas balso paketų srautas.

Kaip ir anksčiau, matuojant paketų srautus, pasitaikiusias C/I vertes suskirstėme į 4 grupes. Iš 24 paketų ilgio srautų atkarpų buvo suskaičiuoti

perėjimų tikimybių p_{00} , p_{01} , p_{10} , p_{11} rinkiniai kiekvienai C/I grupei (3.3 lentelė).



(a) parametro C/I kitimas



(b) balso paketų srautas

3.18 pav. Interferencijos parametro C/I kitimo grafikas judant 90 km/h greičiu ir paketų srautas esant atitinkamoms C/I vertėms

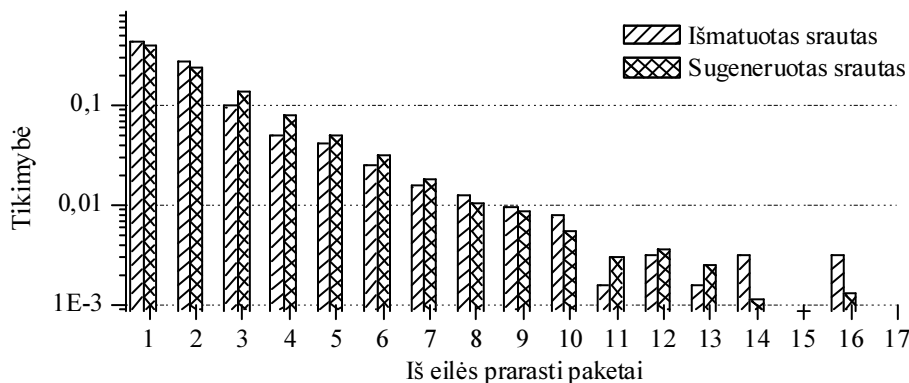
Generuojant paketų srautą, 2 būvių grandinės perėjimo tikimybės išrenkamos pagal modeliavimo sąlygose numatytas C/I vertes.

3.19 paveiksle parodytas iš eilės prarastų paketų pasiskirstymas išmatuoto ir sumodeliuoto srautų.

3.3 lentelė. Perėjimo tikimybės skirtingoms C/I vertėms

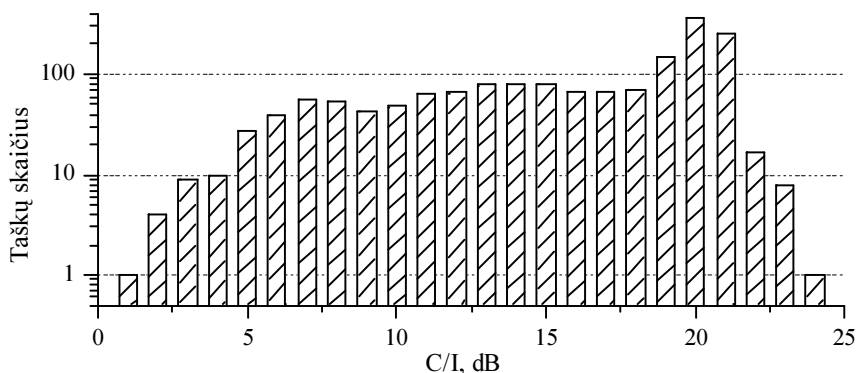
C/I, dB	<5	5...10	11...15	>15
p_{00}	0,72	0,91	0,99	0,99992
p_{11}	0,74	0,55	0,43	0

N būvių grandinės perėjimo tikimybių skaičiavimams reikia žymiai daugiau išmatuotų balso paketų srautų, nei 2 būvių modeliui. Dėl šios priežasties perėjimo tikimybių rinkiniai buvo skaičiuojami tik 2 būvių modeliui.



3.19 pav. Iš eilės prarastų paketų charakteristikos palyginimas sumodeliuotam ir išmatuotam srautams

3.20 paveiksle parodyta C/I parametro, modelio apmokymui skirtame sraute, įverčių pasiskirstymas.



3.20 pav. C/I parametro įverčių pasiskirstymas matavimo sraute

3.3. Trečiojo skyriaus išvados

1. Prarastų balso paketų srautai skiriasi nuo duomenų paketų srautų. Mokslinėje literatūroje balso paketų srautai nėra nagrinėti.
2. Panaudojant GSM 06.10 kodeko specifines savybes, sukūrus specialų testinį signalą, sukurtas prarastų balso paketų srautų rinkimo metodas ir įranga. Įranga gali būti naudojama kartu su paprastomis mobiliojo ryšio stotimis ir su specializuotomis matavimo priemonėmis.

3. Surinktiems prarastų balso paketų srautams aprašyti buvo pritaikyti duomenų praradimams kanale imituoti taikomi modeliai. Parodytas šių modelių ribotumas ir nepakankamas tikslumas.
4. Prarastų balso paketų srautams imituoti kintant ryšio sąlygoms reikalingi matematiniai modeliai susieti su fizinio kanalo parametrais.

Lokalizuotų defektų įtakos vertinimo PESQ algoritmu analizė

Šiame skyriuje apžvelgiamas ir analizuojamas ITU P.862 rekomendacijoje pateiktas balso kokybės vertinimo algoritmas PESQ. Nagrinėjamos PESQ algoritmo balso kokybės įverčio neapibrėžties priežastys, vertinant trumpos trukmės balso signalus su sutelktais defektais. Pateikiamas metodas, leidžiantis minimizuoti rezultatų neapibrėžtį.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai [1A, 4A].

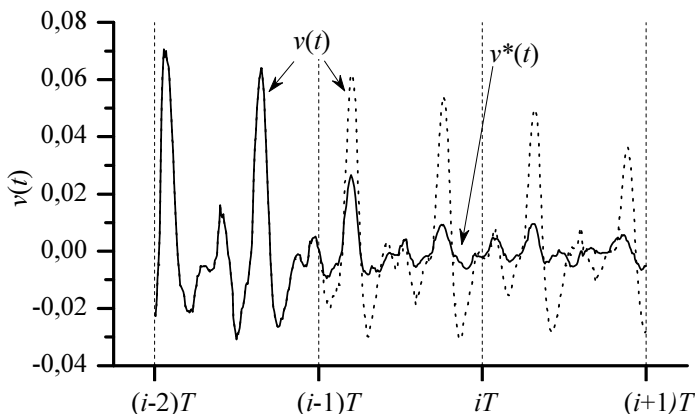
4.1. Prarastų balso paketų įtaka kokybei

Šios disertacijos 3 skyriuje parodyta, kad mobiliojo ryšio sistemose esminiai balso signalo iškraipymai susidaro tada, kai ryšio kanale nepataisomai iškraipomi koduoto balso paketai ir juos tenka ištrinti, t. y. laikyti paketus prarastais. Dėl to dekoduo tame signale yra prarandami balso signalo segmentai. Šiuolaikiniuose dekoderiuose prarasti signalo segmentai užpildomi dirbtinai susintezuotu signalu, taip sumažinat girdimą iškraipymo efektą (4.1 pav.).

Galima pastebėti, kad dėl dirbtinai atkurtų balso segmentų – užmaskuotų ištrynimų, balso signalas tampa netrūkia funkcija. Tačiau atstatytas signalas mažai skiriasi nuo iškraipymų, kuriuos sukuria pašaliniai trukdžiai.

Kad ir kokie tobuli būtų rekonstrukcijos metodai, rekonstruotos signalo dalys

nėra tikros balso signalo atkarpos. Visas dekoduoatas balso signalas su užpildytais praradimais mažiau erzina klausytoją nei be užpildytų praradimų, tačiau dažniausiai perduoti žodžiai tampa nesuprantamais.



4.1 pav. Originalus $v(t)$ ir AMR-7 (12,2 kb/s) dekoderio atkurtas $v^*(t)$ signalai.
Pirmas paketas prarastas laiko momentu $(i-1)T$

Prarastų paketų įtakos balso kokybei tyrimai vykdyti daugelyje darbų. Bene plačiausia žinomi ir cituojami yra [26, 39]. Šiuose ir kituose darbuose vertinant prarastų paketų įtaką, nustatinėjamas sąryšis tarp balso kokybės ir prarastų paketų tankio. Eksperimentai vykdomi atsitiktinai ištrinant balso paketus.

Kitas svarbus momentas yra tai, kad ir subjektyvūs, ir objektyvūs balso kokybės vertinimai vykdomi panaudojant didelės trukmės balso signalų atkarpas (nuo keleto sekundžių iki keleto dešimčių sekundžių). Signalų trukmės bendriems kokybės vertinimams parenkamos atsižvelgiant į naudojamą kokybės vertinimo metodą, pavyzdžiui PESQ vertinimuose rekomenduojamos 8–20 s.

Šios dvi metodinės prielaidos vykdant matavimus sukuria tokias sąlygas, kuriose vertinama ne atskirų pavienių paketų įtaka, bet keleto atsitiktinai prarastų paketų bendra įtaka. Gaunamas kokybės įvertis yra tam tikras vidurkis.

Atlikta išsami skelbtų darbų analizė ir eksperimentai leidžia daryti tam tikrus apibendrinimus:

- Prarandant bet kurią balso signalo atkarpą, prarandama ne tik informacija, bet ir sukuriamas trukdis.
- Įvairių balso segmentų informacinė vertė yra skirtinga.
- Dabartiniuose, mobiliojo ryšio sistemose naudojamuose, dekoderiuose prarastų balso signalo segmentų maskavimo būdai tikrojo signalo neatkuria, jie tik sušvelnina akustinį, praradimo sukeltą poveikį.

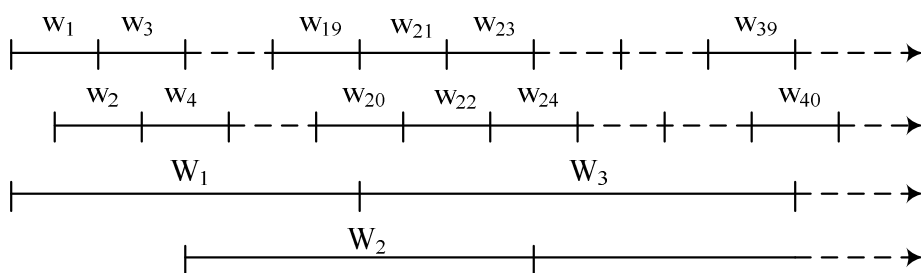
- Keleto iš eilės prarastų paketų sukeltas bendras kalbos kokybės pabloginimo efektas negali būti nagrinėjamas kaip pavienių ištrynimų sukurtų poveikių aritmetinis vidurkis.

Šie apibendrinimai yra tam tikros aksiomos formuluojant reikalavimus realiai patirtos balso kokybės vertinimo metodui.

4.2. PESQ – perduoto balso kokybės vertinimo priemonė

Kaip jau minėta anksčiau, PESQ algoritmu apskaičiuoti kokybės įverčiai turi didžiausią koreliaciją su MOS įverčiais. Be to, kaip balso kokybės vertinimo priemonė, jis vis dažniau naudojamas moksliniuose tyrimuose ir rinkoje siūlomose matavimo sistemose. Nepaisant to, yra pastebėta, kad vertinant pavienių paketų įtaką balso kokybei trumpuose sakiniuose (2–3 s ar trumpesniuose), gaunamas didelis rezultatų verčių išsibarstymas.

Pirmas veiksmas, kurį vykdo PESQ algoritmas [8] yra nagrinėjamų signalų (originalaus ir sugadinto) skaidymas į segmentus (4.2 pav.).



4.2 pav. PESQ algoritmo suformuoti segmentai

Signalai suskaidomi į $T_{\text{fon}} = 32$ ms trukmės langus (w_i). Dažnai literatūroje šie langai vadinami „fonemų“ langais, nors PESQ standarte naudojamas terminas „frame“. Gretimi langai persidengia 50 %. Visi pagrindiniai iškraipymų skaičiavimai atliekami fonemų languose. Iš 20 fonemų langų suformuojamas „žodžio“ (*angl. syllable*) langas. Jo trukmė $T_s = 320$ ms. Žodžio langai taip pat persidengia 50 %.

Po segmentavimo ir kitų būtinų procedūrų (signalų išlygiavimo laike, filtravimo ir kt.) apskaičiuojami spektriniai signalo iškraipymai fonemų languose. Gaunamos simetrinės D_n ir asimetrinės DA_n signalo degradavimo vertės kiekvienam fonemos langui. Pagal (4.1) apskaičiuojamos signalo iškraipymo vertės žodžio langui,

$$L_D = \left(\frac{1}{Z} \sum_{n=1}^Z D_n^6 \right)^{1/6}, \quad L_{DA} = \left(\frac{1}{Z} \sum_{n=1}^Z DA_n^6 \right)^{1/6}. \quad (4.1)$$

Čia Z – nurodo fonemų langų skaičių iš kurio skaičiuojama žodžio lango vertė. Visiems, išskyrus paskutiniuosius du, žodžio langams $Z = 20$. Dėl segmentavimo specifikos, matavimo langas niekada nebūna padalinamas į sveiką žodžio segmentų skaičių. Todėl paskutiniai žodžio langai apskaičiuojami iš realiai likusių fonemų langų.

Galiausiai naudojant vidurkinimą antruoju laipsniu, apskaičiuojamos d_{sym} ir d_{asym} iškraipymų vertės visam PESQ matavimo langui

$$d_{\text{sym}} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_D^2(i) \right)^{1/2}, \quad d_{\text{asym}} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_{DA}^2(i) \right)^{1/2}. \quad (4.2)$$

Čia N – žodžio langų skaičius PESQ matavimo lange T_{PESQ} . Absoliutinis kalbos kokybės įvertis – Q_{PESQ} PESQ skalėje randamas pagal

$$Q_{\text{PESQ}} = 4,5 - 0,1 \cdot d_{\text{sym}} - 0,0309 \cdot d_{\text{asym}} \quad (4.3)$$

Kartais tenka apibūdinti rezultatą ne absoliučia kokybės verte, o kokybės pablogėjimo įverčiu – dQ_{PESQ} . Kokybės pablogėjimas gali būti apskaičiuotas pagal

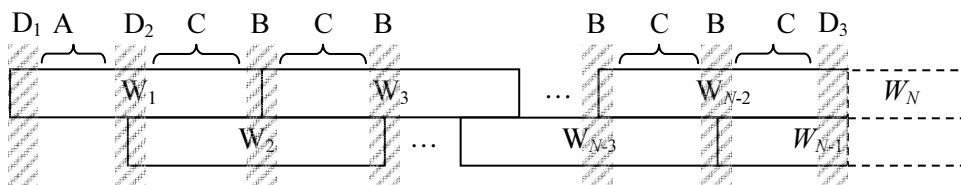
$$dQ_{\text{PESQ}} = 4,5 - Q_{\text{PESQ}} = 0,1 \cdot d_{\text{sym}} + 0,0309 d_{\text{asym}}. \quad (4.4)$$

Q_{PESQ} įvertis gali kisti nuo 4,5 balo (signale nėra iškraipymų – kokybė puiki) iki - 0,5 (pati prasčiausia balso kokybė).

Modeliavimuose vertinami balso signalai buvo diskretizuoti 8 kHz ir kvantuoti 16 bitų.

4.3. Segmentavimo įtaka

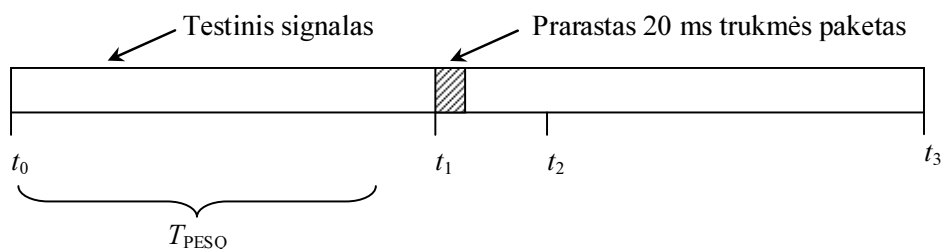
GSM ir 3G korinio ryšio sistemose balsas yra perduodamas 20 ms paketais. Vienas tokios trukmės prarastas paketas gali paveikti signalo kokybę dviejuose arba trijuose fonemos languose. Tai priklauso nuo to, kurioje pozicijoje PESQ matavimo lange atsiduria prarastas paketas. Fonemų langai su sumažėjusia kokybe gali įtakoti vieną, du arba tris formuojamus žodžio langus. Paveiktų žodžio langų skaičius taip pat priklauso nuo to, kokioje PESQ matavimo lango pozicijoje atsiduria prarastas balso paketas. Bendru atveju galima išskirti tris zonas PESQ matavimo lange, kuriose pagal PESQ algoritmą nustatomi skirtingi to paties prarasto paketo poveikiai (4.3 pav.).



4.3 pav. PESQ matavimo lango zonų išsidėstymas

Jei defektas – prarastas paketas yra į A zonoje, tuomet skaičiuojant balso kokybę realiai svarbus tik vienas langas – W_1 , nes kituose signalo degradavimo nebus pastebėta. Kai prarastas paketas yra C laiko zonoje, tas pats defektas įtakoja du langus – W_1 ir W_2 . Dėl žodžio langų persidengimo (4.2 pav.), abiejuose languose W_1 ir W_2 paskaičiuoti koeficientai L_D ir L_{DA} turės tas pačias vertės ($L_D(1) = L_D(2)$ ir $L_{DA}(1) = L_{DA}(2)$). Kai prarastas paketas yra B zonoje, paveikiami trys langai. Pavyzdžiui, tarkime, kad defekto pradžia sutampa su fonemos lango w_{21} pradžia (4.2 pav.), o jo trukmė – 20 ms. Dėl fonemų langų persidengimo bus paveikti gretimi fonemų langai w_{20} , ir w_{22} . Kadangi signale nėra kitų defektų, tuomet tik šių langų (w_{20} , w_{21} , w_{22}) koeficientai D_n ir DA_n turės ne nulines vertes. Įvertinus (4.1), galima pasakyti, kad koeficientai L_D ir L_{DA} žodžio langui W_1 bus paskaičiuoti tik iš fonemos lango w_{20} , langui W_2 iš w_{20} , w_{21} , w_{22} , langui W_3 iš w_{21} , w_{22} . Dėl šios priežasties, defektui esant B zonoje, paveiktų žodžio langų koeficientai L_D ir L_{DA} , priešingai nei C zonoje, turės skirtingas vertes.

Dėl susidarančių skirtingo poveikio zonų, kokybės įverčiai Q_{PESQ} tampa priklausomi nuo defekto padėties PESQ matavimo lange. Iliustracinės kokybės įverčių kitimo ribos gali būti parodytos atliekant kokybės matavimus pagal 4.4 paveiksle pateiktą schemą.



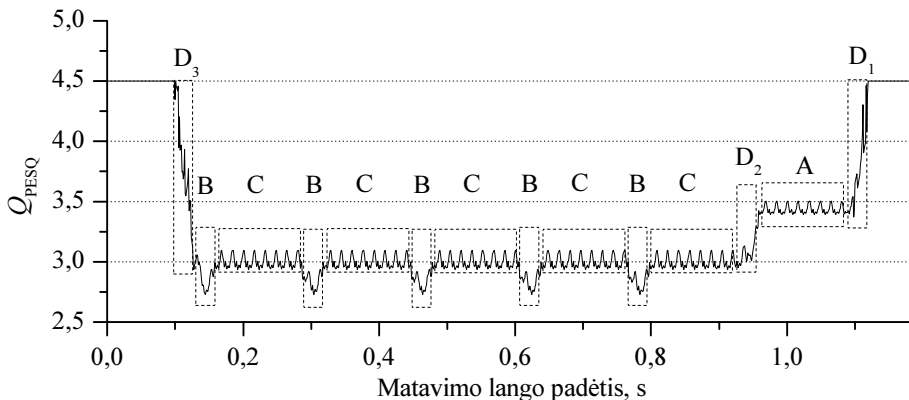
4.4 pav. Zonų įtakos kokybės įverčiui tyrimų schema

Siekiant eliminuoti kalbos signalo savybių įtaką, PESQ testus galima atlikti bandymams parinkus testinį, 400 Hz sinusinį virpesį, kurio trukmė $t_3 - t_0 = 2,2$ s. Parenkame PESQ matavimo lango trukmę $T_{PESQ} = 1$ s. Tegul prarasto paketo pozicija yra $t_1 = 1,1$ s. 4.3 paveiksle pažymėtų A, B, C zonų įtaka matavimo

rezultatui Q_{PESQ} nustatoma slenkant matavimo lango pradžią iš pozicijos t_0 iki pozicijos t_2 , 1 ms žingsniais. Matavimo lango slinkimo ribos pasirinktos laikotarpiu nuo t_0 iki t_2 tam, kad laiko momentu t_1 prarastas paketas, patektų į visas pažymėtas matavimo lango zonas. Eksperimentas stabdomas, kai matavimo lango pradžia pasiekia tašką $t_2 = 1,2$ s. Matavimo lango trukmė ir defekto pozicija parinkti taip, kad iliustruotų nagrinėjamą efektą.

Q_{PESQ} įverčio priklausomybė nuo matavimo lango padėties parodyta 4.5 paveiksle. Reikia pastebėti, kad 4.4 paveiksle parodytoje schemoje, matavimo langas slenka iš kairės į dešinę, todėl defektas slenka nuo lango pabaigos į jo priekį. Eksperimento pradžioje, kol pažymėtas signalo defektas nepatenka į matavimo langą, PESQ algoritmas nustato didžiausią kokybę – 4,5 balo. Slenkant matavimo langą, kai taške $t_1 = 1,1$ s įvestas defektas patenka į langą, signalo kokybės įvertis pradeda mažėti (zona D₁). Šis perėjimas trunka tiek, kiek ir defektas – 20 ms.

Dėl 4.3 paveiksle parodyto žodžio langų formavimo ir pasirinkto 1 s trukmės matavimo lango, B zona atsiduria šio lango pabaigoje. Todėl toliau slenkant langą, defektas pirmiau papuola į B zoną, kuri kartojasi kas 160 ms (žodžio langų persidengimo trukmė). Tęsiant lango slinkimą, defektas pereina į C zoną. Šios zonos pasikartojimų periodas taip pat yra 160 ms. Kaip jau minėta, C zonoje defektas įtakoja du žodžio langus, o B zonoje tas pats defektas daro įtaką trimis žodžio langams. Įvertinus (4.2), dėl didesnio B zonoje paveiktų žodžio langų skaičiaus, kokybės degradavimo koeficientai d_{sym} ir d_{asym} turės didesnę skaitinę vertę, nei defektui būnant C zonoje. Dėl šios priežasties, B zonoje apskaičiuotas kokybės įvertis Q_{PESQ} gaunamas mažesnis nei C zonoje.



4.5 pav. Matavimo lango padėties įtaka kokybės įverčiui

Matavimo langą slenkant toliau, į dešinę, defektas atiduria šio lango pradžioje. Defektui paliekant žodžio langą W_2 (4.3 pav.), papuolama į zoną D₂. Čia gaunamas kokybės įverčio didėjimas, nes tik dalis defekto tepapuola į W_2 langą.

Defektui esant A zonoje, vienintelio žodžio lango W_1 koeficientai L_D ir L_{DA} turės ne nulines vertes. Dėl šios priežasties, tik žodžio langas – W_1 turės įtakos skaičiuojant koeficientus d_{sym} ir d_{asym} . Taigi, dėl mažesnio skaičiaus paveiktų žodžio langų, defektui esant zonoje A, paskaičiuotas kokybės įvertis Q_{PESQ} gaunamas didesnis nei tam pačiam defektui esant zonose B ar C.

Iš formulių (4.2) ir (4.4) galime užrašyti kokybės pablogėjimo dQ_{PESQ} įverčių, zonoje C ir A santykį (4.5), kai nagrinėjame signalą, kuriame yra tik vienas prarastas paketas, o jo pozicija, fonemų langų atžvilgiu, zonose sutampa. Tuomet, kaip jau buvo parodyta, defektui esant C zonoje, šią zoną sudarančių žodžio langų W_n ir W_{n+1} koeficientai L_D ir L_{DA} yra lygūs ($L_D(n) = L_D(n+1)$ ir $L_{DA}(n) = L_{DA}(n+1)$). Taip pat šie koeficientai yra lygūs ir A zonoje esančio žodžio lango W_m koeficientams.

$$\begin{aligned} \frac{dQ_C}{dQ_A} &= \frac{0,1\sqrt{\frac{2 \cdot L_D^2}{N}} + 0,0309\sqrt{\frac{2 \cdot L_{DA}^2}{N}}}{0,1\sqrt{\frac{L_D^2}{N}} + 0,0309\sqrt{\frac{L_{DA}^2}{N}}} = \\ &= \frac{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{N}}(0,1L_D + 0,0309L_{DA})}{\frac{1}{\sqrt{N}}(0,1L_D + 0,0309L_{DA})} = \sqrt{2}. \end{aligned} \quad (4.5)$$

Nepriklausomai nuo to, kokia vertinamo signalo trukmė ar defekto poveikis signalui, A zonoje kokybės pablogėjimas gaunamas $\sqrt{2}$ karto mažesnis nei C zonoje.

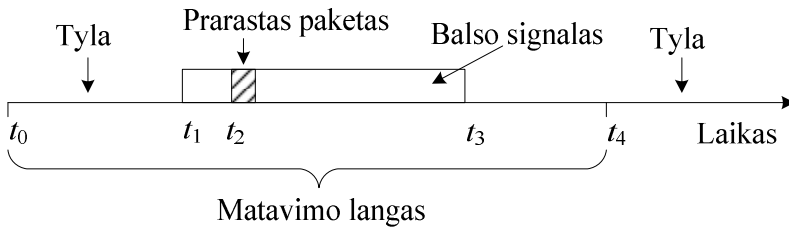
Toliau slenkant matavimo langą, į jį papuola tik dalis defekto, todėl gaunamas kokybės įverčio didėjimas (D_1 zona) ir galiausiai defektui nebepatenkant į matavimo langą, vėl pasiekama didžiausia PESQ įverčio vertė.

Taigi, nagrinėjant prarastų paketų įtaką balso kokybei, dėl PESQ algoritmo ypatumų, rezultatai priklauso nuo prarasto paketo padėties matavimo lange. Dėl to atsiranda rezultatų neapibrėžtis.

4.3.1. Kokybės įverčio neapibrėžties tyrimas

4.5 paveiksle taip pat matome nedidelį periodinį (periodas – 16 ms) rezultatų kitimą visose zonose. Ši periodo trukmė sutampa su fonemų langų persidengimo trukme [1A]. Žemiau aprašytas eksperimentas, leidžiantis įvertinti šiuos kitimus.

4.6 paveiksle pateikta eksperimento schema, kuri leidžia išmatuoti į C zoną papuolusio defekto įtaką balso kokybei, esant skirtingoms matavimo lango pozicijoms.



4.6 pav. Matavimo signalo sandara ir matavimo lango išdėstymas

Šiam eksperimentui specialiai sukonstruojamas matavimo signalas, kuris sudarytas iš 3 dalių. Nuo t_0 iki t_1 signalą sudaro tylą. Nuo t_1 iki t_3 tęsiasi balso signalas, o nuo t_3 vėl prasideda tylą:

$$v_{\text{mat}}(t) = \begin{cases} 0, & \text{kai } t_0 \leq t \leq t_1 \\ v(t), & \text{kai } t_1 < t \leq t_3 \\ 0, & \text{kai } t > t_3 \end{cases} \quad (4.6)$$

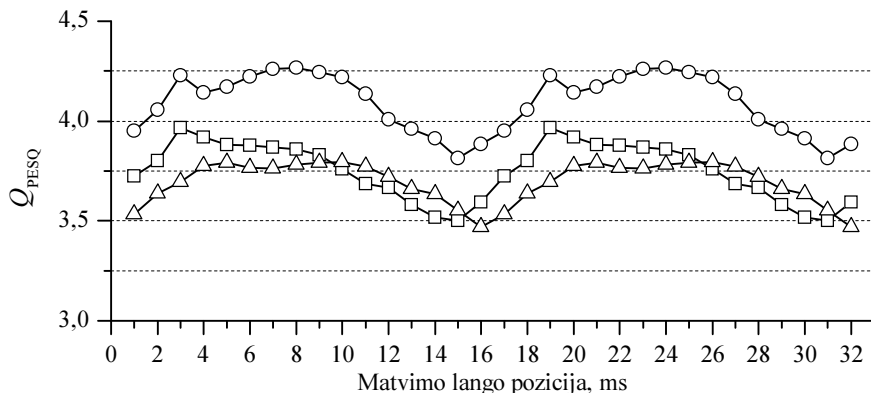
PESQ algoritme yra realizuotas ilgų tylos intervalų signalo pradžioje ir gale atmetimas [8]. Signalą pradžia ir gale atmetami, kai tylos trukmė viršija 5 fonemų langus (~96 ms). Dėl šios priežasties tylos intervalų t_0-t_1 ir t_3-t_4 trukmės parenkamos trumpesnės nei 96 ms.

Paketo praradimas sumodeliuotas laiko momentu t_2 . Matavimo lango pradžia slenkama 1 ms žingsniais nuo t_0 iki t_1 ir matuojami Q_{PESQ} įverčiai. 4.7 paveiksle parodyti Q_{PESQ} kitimai trims balso signalams, kai kalbos signalo trukmė $t_3 - t_1 = 1700$ ms, prarasto paketo pozicija kalbos signalo $t_2 - t_1 = 1000$ ms, o matavimo lango trukmė $T_{\text{PESQ}} = 2000$ ms. Q_{PESQ} įverčio kitimai gaunami periodiniai su periodu 16 ms ir sutampa su fonemų langų persidengimo laiku.

Svarbu pastebėti, kad kintant matavimo lango pozicijai persiskirsto v_{mat} signalo tylos trukmių pradžioje ir gale santykis, tačiau kalbos segmentas su prarastu paketu lieka nepakitęs. Vertinant šį eksperimentą iš MOS pozicijų (kuomet kokybės vertinimą atlieka ekspertas) yra akivaizdu, kad kelių dešimčių milisekundžių trukmės tylos pokytis neįtakoja arba labai silpnai įtakoja rezultatą. Todėl ir PESQ algoritmu apskaičiuojama kokybė turėtų kisti nežymiai, tačiau taip nėra. Kaip galima pastebėti 4.7 paveiksle, įvertis gali kisti daugiau nei 0,5 pagal penkių balų MOS skalę.

Rezultatų priklausomybė nuo matavimo lango pozicijos yra susijusi su defekto persiskirstymu fonemų languose. Nagrinėjamoje signalo atkarpoje yra vienas prarastas paketas, tuomet PESQ matavimo lange bus paveikti tik 2 arba 3 fonemų langai. Likusiuose fonemų languose signalas liks nepakitęs ir jų iškraipymo koeficientai D_n ir DA_n artės į nulį. Prarasto paketo pozicija PESQ matavimo lange yra atsitiktinė, todėl jo poveikis fonemų languose taip pat yra atsitiktinis.

Slenkant matavimo langą praradimo atžvilgiu, jo poveikis persiskirsto fonemų languose, todėl D_n ir DA_n vertės tampa priklausomomis nuo matavimo lango pozicijos.



4.7 pav. Q_{pesq} įverčio priklausomybė nuo matavimo lango pozicijos trims kalbos fragmentams

Priede 1 pateiktose lentelėse parodytos D_n ir DA_n vertės, esant skirtingoms PESQ matavimo lango pozicijoms. Prarasto paketo pozicija sutampa su 35 – ta fonema. Iš šių lentelių galima lengvai pastebėti, kaip slenkant matavimo langą persiskirsto defekto įtaka fonemų languose. Rezultatų neapibrėžtis gaunama dėl PESQ algoritme naudojamo iškraipymų įvertinimo algoritmo. Slenkant defektui, kokybės degradavimo laipsnis vienoje fonemoje kinta neproporcingai kitos atžvilgiu. Dėl šios priežasties, visų fonemų suma yra nepastovus dydis.

Kaip matyti, keičiant to paties balso segmento ir to paties prarasto paketo padėtį matavimo lango atžvilgiu, gaunami skirtingi kokybės pablogėjimo įverčiai, nors akivaizdu, kad subjektyviai klausant jokio skirtumo nėra. Todėl tokia matavimo rezultatų priklausomybė nuo matavimo lango padėties yra vertintina kaip rezultatų neapibrėžtis.

Kai nagrinėjamame signale yra keletas defektų, PESQ apskaičiuojamas kokybės rezultatas mažiau įtakojamas matavimo lango pozicijos. Persiskirstant defektams tarp fonemų langų, jų suminis poveikis lieka panašus.

4.3.2. Matavimo lango trukmės įtaka

Skaiciuojant iškraipymų vertes d_{sym} ir d_{asym} PESQ matavimo lange (4.2), didelę įtaką rezultatams daro žodžio langų skaičius – N , kuris yra proporcingas matavimo lango trukmei T_{PESQ} [1A]:

$$N = \left\lceil \frac{2 \cdot T_{\text{PESQ}}}{T_s} \right\rceil, \quad (4.7)$$

čia $\lceil \cdot \rceil$ – apvalinimas iki didesnio sveiko skaičiaus.

Jei tartume, kad mūsų nagrinėjame kalbos fragmente yra sugadintas tik vienas paketas, tai daugiausiai jis gali įtakoti tris žodžio langus, likę L_D ir L_{DA} koeficientai turės nulinę vertę. Tuomet (4.2) galime perrašyti taip:

$$d_{\text{sym}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 L_D^2(i)}{N}}, \quad d_{\text{asym}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 L_{DA}^2(i)}{N}}. \quad (4.8)$$

Didėjant matavimo lango trukmei T_{PESQ} , didėja ir žodžio langų skaičius N , tuo tarpu žodžio langų, kurie yra įtakoti prarasto paketo, skaičius lieka toks pat. Tai lemia d_{sym} ir d_{asym} koeficientų mažėjimą, o tuo pačiu, galutinio Q_{PESQ} (4.3) įverčio didėjimą. Taigi, didėjant matavimo lango trukmei, didėja kokybės įvertis Q_{PESQ} .

P.862 rekomendacijoje nepateikiama griežtai reglamentuota T_{PESQ} vertė, tik nurodomos rekomenduojamos lango trukmės (8–20 s).

Nagrinėjant triukšmų ar kodekų įtaką balso signalo kokybei, matavimo lango trukmė neįtakoja matavimo rezultato, nes signalo kokybę bloginantis poveikis veikia visą signalą. Visi žodžio langai yra paveikiami, todėl ilginant matavimo langą didėja ne tik N , bet ir daugėja nenulinę vertę turinčių žodžio langų. Nagrinėjant lokalizuotus kokybę bloginančius veiksnius, tokius kaip paketų praradimai, tenka užsiduoti prarastų paketų santykį. Tuomet signalo trukmė nebeteri įtakos rezultatams. Tačiau situacija tampa sudėtingesnė, kai reikia įvertinti vieno paketo įtaką. Tokiu atveju prarastų paketų santykio parametras galėtų būti valdomas tik keičiant signalo trukmę, o tai įtakoje rezultatus.

Žemiau pateikiamas tiriamojo signalo paruošimo metodas, leidžiantis vertinti pavienių paketų įtaką balso kokybei ir sumažinantis anksčiau aptartas rezultatų neapibrėžtis.

4.4. Matavimo signalo sintezė

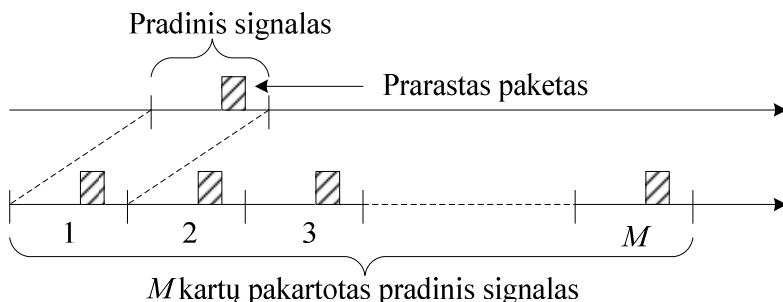
P.862 rekomendacija nurodo, kad balso kokybei vertinti parenkamas signalas gali būti sudarytas iš keleto signalų atkarpų, išlaikant natūralios kalbos struktūrą. Įvertinus matavimų neapibrėžties priežastis pasiūlyta speciali matavimams skirta signalo sudarymo schema [1A].

Iš tiriamų neiškraipyto $v(t)$ signalo ir ryšio sistemoje iškraipyto signalo $v^*(t)$ išsirenkama reikiamos T_{prad} trukmės vertinami signalai $v_{\text{prad}}(t)$ ir $v_{\text{prad}}^*(t)$. Iš šių signalų sudaromi nauji matavimo signalai, M kartų periodiškai pakartojant $v_{\text{prad}}(t)$ ir $v_{\text{prad}}^*(t)$. Taip suformuojami nauji padidintos trukmės signalai $v_{\Sigma}(t)$ ir $v_{\Sigma}^*(t)$:

$$v_{\Sigma}(t) = \sum_{i=0}^{M-1} v_{\text{prad}}(t - iT_{\text{prad}}), \quad (4.9)$$

$$v_{\Sigma}^*(t) = \sum_{i=0}^{M-1} v_{\text{prad}}^*(t - iT_{\text{prad}}). \quad (4.10)$$

Čia M – signalo pakartojimų skaičius. Gautas signalas $v_{\Sigma}(t)$ yra sudarytas iš M signalo $v_{\text{prad}}(t)$ kopijų (4.8 pav.).



4.8 pav. Pailginto signalo sudarymas

Parentant T_{prad} siekiama, kad kartojant signalo atkarpas prarasti paketai papultų vis į skirtingas fonemų langų pozicijas. Ši sąlyga tenkinama, jei pradinio signalo trukmė parenkama pagal

$$T_{\text{prad}} = \left(k + \frac{1}{M}\right) \cdot 0,016. \quad (4.11)$$

Čia M – kaip ir anksčiau, pakartojimų skaičius, k – sveikas skaičius. Keičiant k parenkama reikiama pradinio signalo trukmė. Laikas 0,016 s yra gretimų fonemų langų persidengimo trukmė.

Signalų „pailginimo“ procedūra turi būti atlikta tiek atraminiam (signalui be iškraipymų), tiek ir tiriamajam. Pakartojimų skaičius M taip pat pasirenkamas dydis. Galima tikėtis, kad didesnis M garantuoja mažesnę rezultatų priklausomybę nuo matavimo lango padėties.

Siekiant išsiaiškinti metodo efektyvumą ir koeficiento M įtaką rezultatų neapibrėžčiai, buvo ištirti 100 skirtingų balso fragmentų kokybės pokyčiai, kai prarandamas vienas paketas.

Pradinis, vertinamas signalas suformuojamas pagal 4.8 paveiksle parodytą taisyklę. Pradinio signalo trukmė atsižvelgiant į (4.11) formulę parinkta 2 s ($k = 125$), o galutinis T_{prad} gaunamas atsižvelgiant į pasirinktą M . Visų tiriamų balso fragmentų prarandamas paketas sumodeliuojamas laiko momentu $t_2 = 1$ s. Slenkant matavimo langą prarastas paketas nekeičiamas, išlieka tas pat ir toje

pačioje signalo vietoje.

Tyrimai atlikti pasirenkant balso koderį G.711. Matavimo rezultatų neapibrėžtis E_i – tam testuojamam sakiniui, apskaičiuojama radus didžiausią ir mažiausią išmatuotos kokybės vertes:

$$E_i = \max(Q_{\text{PESQ}}(t)) - \min(Q_{\text{PESQ}}(t)), \quad (4.12)$$

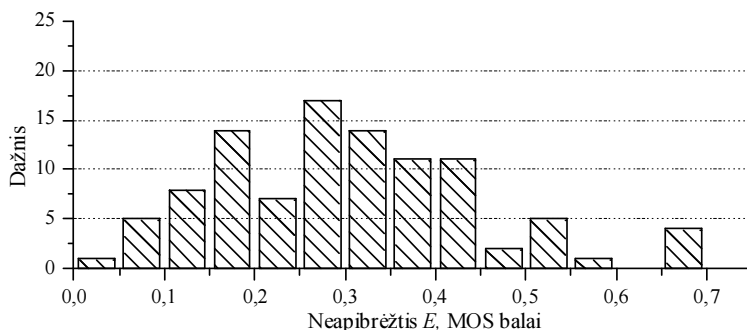
čia $Q_{\text{PESQ}}(t)$ – kokybės įvertis skirtingose matavimo lango pozicijose.

Lentelėje 4.1 pateikti eksperimento rezultatai.

4.1 lentelė. Didžiausia neapibrėžtis pasitaikiusi vertinant 100 balso fragmentų

	M							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Max (E_i)	0,697	0,264	0,182	0,134	0,106	0,054	0,039	0,033

Šie duomenys aiškiai parodo, kad matavimų neapibrėžtis mažėja didinant pakartojimų skaičių M .



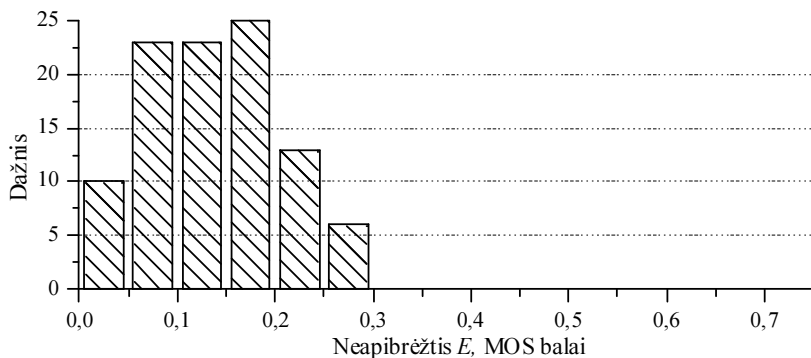
4.9 pav. Rezultatų neapibrėžties histograma. Vertinant balso kokybę netaikomas signalo trukmės pailginimas.

Palyginimui 4.9 paveiksle pateikta neapibrėžties verčių pasiskirstymo histograma, kai $M=1$, tai yra, kai netaikoma signalo trukmės pailginimo procedūra. Čia daugiausiai verčių pasiskirsto 0,1–0,4 MOS balų intervale.

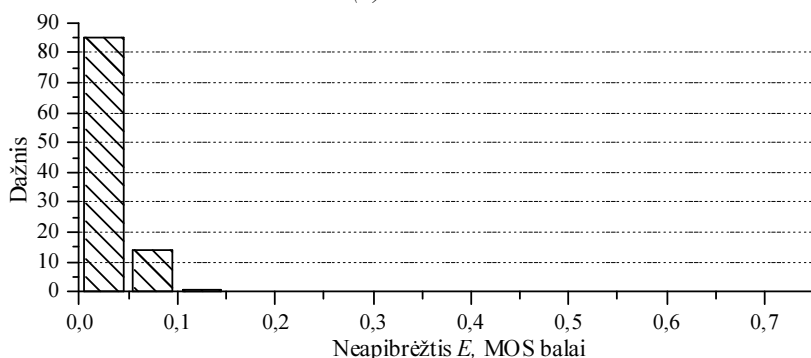
Analogiški duomenys pateikti 4.10 paveiksle naudojant mažus signalo pakartojimo koeficientus M ($M=2$ ir $M=5$).

Pateikti duomenys aiškiai parodo, kad taikant matavimo signalų trukmės pailginimo metodą, mažėja rezultatų priklausomybė nuo defekto pozicijos matavimo lange. Didžiausias skirtumas tarp didžiausio ir mažiausio Q_{PESQ} įvertio, vertintų signalų rinkiniui, esant $M=8$, tesudaro 0,033 MOS balo. Manome, kad tokia balso kokybės matavimo neapibrėžtis yra toleruotina.

Tolesniems taikymams pasirenkamas signalo prailginimo koeficientas $M=8$. Žinoma, pailginus signalo trukmę, pailgėja ir balso kokybės įverčio skaičiavimo laikas.



(a) $M=2$

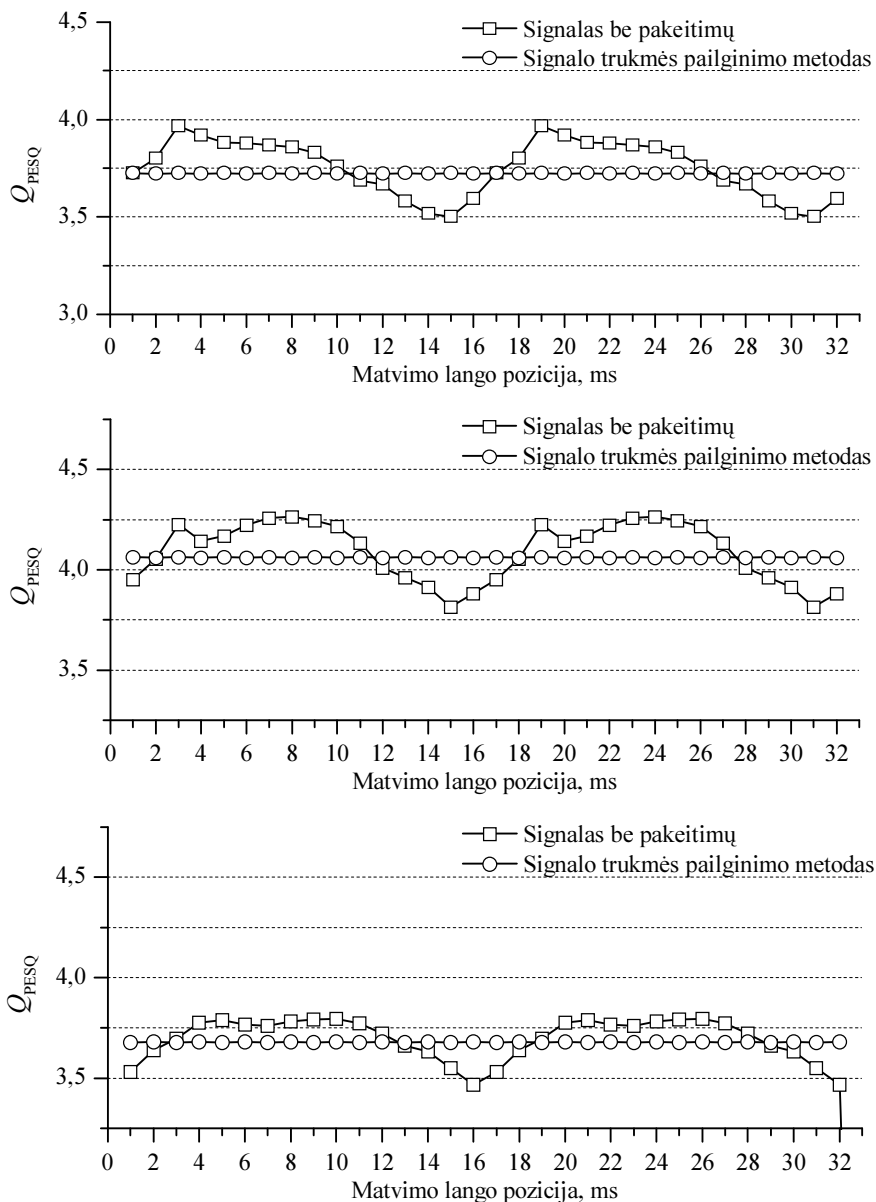


(b) $M=5$

4.10 pav. Rezultatų neapibrėžties histogramos. Taikomas signalo trukmės pailginimas.

Siekiant vaizdžiau parodyti signalo trukmės pailginimo metodo efektyvumą, 4.11 paveiksle parodytos Q_{PESQ} įverčio priklausomybės nuo matavimo lango pozicijos, taikant signalo trukmės pailginimo metodą ($M=8$) ir be jo.

Matavimai atlikti su tais pačiais balso signalo pavyzdžiais, kaip ir 4.7 paveiksle. Kaip matyti, slenkant matavimo langą, pailgintos trukmės signalo kokybės įverčių priklausomybė nuo matavimo lango padėties praktiškai nepastebima.



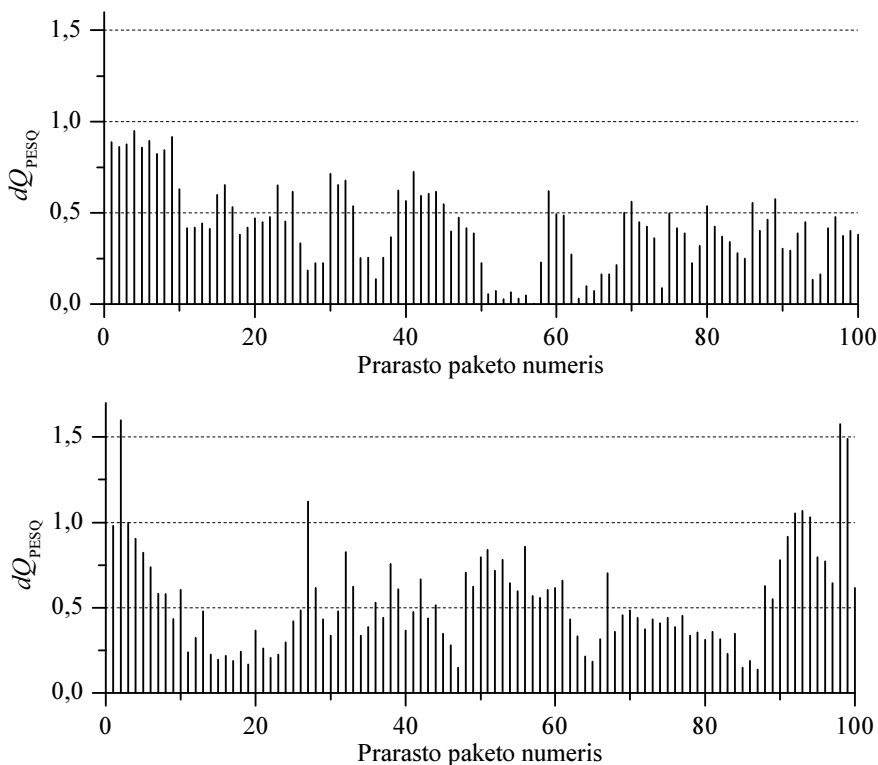
4.11 pav. Q_{PESQ} įvertio priklausomybė nuo matavimo lango pozicijos, taikant signalo trukmės pailginimo metodą ir be jo, trims kalbos signalo fragmentams

Balso paketų įtakos tyrimas

Mokslinėje literatūroje yra nagrinėta prarastų paketų padėties įtaka balso

kokybei [4A, 25, 26]. Tyrimais įrodyta, kad skirtingi prarasti paketai skirtingai ją pablogina. Tačiau nurodytuose šaltiniuose kokybės matavimai atlikti standartiniais atitinkamai PESQ ir PSQM matuokliais neįvertinat šiame darbe išryškintos šių balso kokybės vertinimo algoritmų specifikos, dėl kurios matavimo rezultatai pastebimai priklauso nuo matavimo lango padėties.

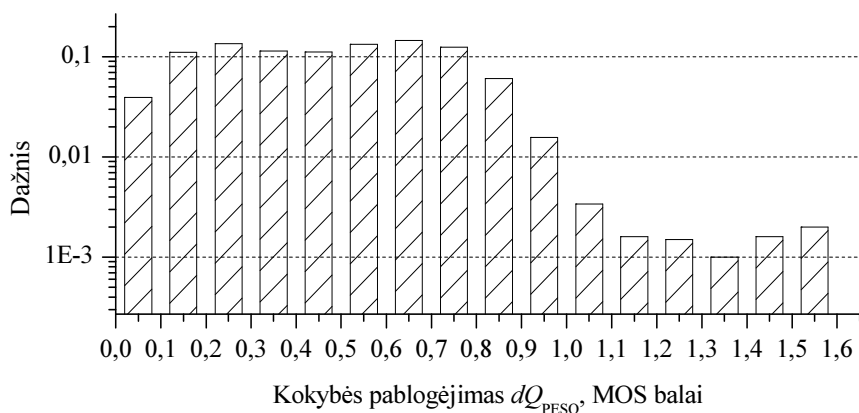
Siekiant objektyviai nustatyti pavienių prarastų paketų įtaką balso kokybei buvo atlikti matavimų eksperimentai su balso kodėku G.711 taikant prailginto matavimo signalo metodą (pagrindinio signalo trukmė – 2 s, $M=8$). Buvo iš eilės ištrinama po vieną paketą ir kiekvieną kartą atliekami kokybės matavimai. Nustatyti balso kokybės pablogėjimo dQ_{PESQ} pavyzdžiai dviem skirtingiems balso signalams pateikti 4.12 paveiksle.



4.12 pav. Prarasto paketo įtakos balso kokybei, pavyzdžiai

Sunorminta kokybės pablogėjimo įverčių dažnių histograma parodyta 4.13 paveiksle.

4.13 paveiksle galima pastebėti kad, pavienių paketų įtaketų kokybės pablogėjimų diapazonas yra nuo 0 iki 1,6. Deja, jokių kitų dėsningumų, kurie paketai yra daugiau reikšmingi, nustatyti nėra galimybės.



4.13 pav. Balso kokybės pablogėjimo histograma G.711 kodekui, kai prarandamas vienas paketas

Vertinant vartotojo realiai patirtą balso kokybę tenka spręsti atvirkštinį uždavinį. Nustatoma, kad kai kurie paketai perduodant buvo prarasti. Tačiau tokios žinios nesudaro galimybės vienareikšmiai nustatyti, kokia realaus balso kokybės pablogėjimo vertė. Kaip matyti iš pateiktų pavyzdžių, galima nustatyti tik pablogėjimo diapazoną ir pasirinktos pablogėjimo vertės pasitaikymo dažnį.

4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Pastebėta ir įrodyta, kad ITU rekomendacijoje P.862 įteisintas balso kokybės matavimo algoritmas PESQ, tiriant trumpų balso atkarpų kokybę esant lokaliems defektams, gali sukurti dideles matavimo paklaidas.
2. Įrodyta, kad matavimo paklaidų priežastis yra PESQ algoritmo skirtinga reakcija į signalo defekto padėtį matavimo lange.
3. Dėl algoritmo specifikos, kai defektas papuola į pirmąsias matavimo lango 160 ms (A zona), Q_{PESQ} įvertis bus gautas didesnis lyginant su kitomis matavimo lango sritimis.
4. Matuojamo Q_{PESQ} įverčio neapibrėžtis sumažinama specialiai sintezuojant tiriamąjį signalą, kuris sukuriamas M kartų pakartojant pirminio signalo atkarpą.
5. Skirtingi prarasti balso segmentai skirtingai pablogina balso kokybę. Kai nustatoma, kad paketas prarastas, nėra galimybės vienareikšmiai nustatyti

kokybės pablogėjimo dydį, tačiau galima nustatyti sąsajas tarp prarastų pavienių balso paketų ar jų grupių ir tikimybės, kad balso kokybė bus sumažinta dydžiu dQ_{PESQ} .

Balso kokybės vertinimas mobiliojo ryšio sistemose

Šio skyriaus tikslas – aptarti galimybes sukurti realiai patirtos balso kokybės vertinimo priemones mobiliojo ryšio sistemoms.

Skyriuje pagrindinis dėmesys skiriamas balso kokybės vertinimo metodui. Pateikiami realiose ryšio sąlygose susikuriantys kalbos kokybės įverčiai.

Skyriaus tematika paskelbti du autoriaus straipsniai [2A, 4A] ir pateikti du poskyriai COST290 tyrimų programos bendrai ataskaitai.

5.1. Vartotojo ir paslaugų tiekėjo santykių reglamentavimas

Šiuo metu paplitusi praktika, kuomet mobiliojo ryšio paslaugų kokybė kaip ir fiksuotojo (laidinio) ryšio vertinama statistiškai, taikant tuos pačius parametrus. Pvz.: paslaugos pasiekiamumas (išreikštas sėkmingų sujungimų santykiu su visų bandymų skaičiumi), nutrauktų skambučių skaičius ir kitais.

Fiksuotojo laidinio ryšio tinkluose, kai visų vartotojų ryšio sąlygos yra maždaug vienodos, toks vertinimo būdas, nustatant visam tinklui bendrus kokybės rodiklius gali būti pateisinamas. Mobiliojo ryšio sąlygose, kur kiekvieno vartotojo ryšio sąlygos yra skirtingos, bendri statistiniais metodais nustatyti

rodikliai realiai apibūdina viso tinklo išvystymo bei tinklo kokybės lygį, bet nieko nesako apie konkretaus vartotojo realiai gautos paslaugos kokybę.

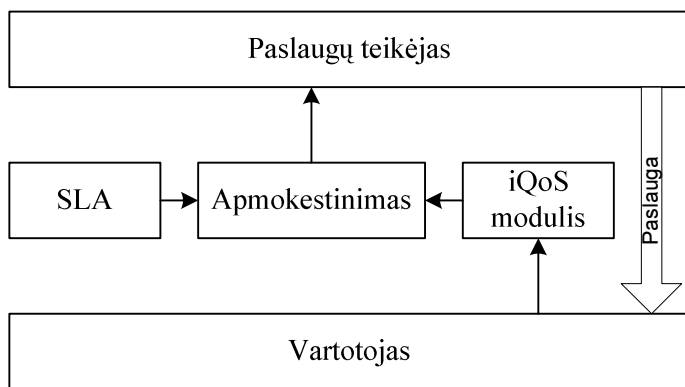
Šiuolaikiniai teisės aktai dar neįpareigoja mobiliojo ryšio operatorių ir kitų šiuolaikinių plačiajuosčių duomenų perdavimo paslaugų teikėjų (PT) vertinti vartotojams realiai suteiktų paslaugų kokybę. Tačiau diferencijuoto kokybės vertinimo paruošiamieji darbai tikrai vykdomi. Šiam tikslui yra parengta ITU rekomendacija E.860 [78], kurioje aprašomi bendri sudarymo principai ir reikalavimai paslaugų lygio sutartims (SLA) (angl. *Service Level agreement*). SLA – santykių tarp PT ir vartotojo reglamentavimo forma. SLA sukuria realias sąlygas išsamiau vertinti ir teikti kokybės garantijas, kuriose gali būti numatyti netgi finansinės kompensacijos už vartotojui suteiktas netinkamo lygio paslaugas.

Šiuo metu SLA mechanizmas realiai veikia grupinių paslaugų, kurias teikia vieni operatoriai kitiems, lygmenyse. Jis yra įrašomas į sutartis tarp realaus tiekėjo ir stambių vartotojų. Kokybės reglamentavimą SLA sutartimis numatoma plačiau įgyvendinti naujų kartų technologijų tinkluose.

Viena iš priežasčių, dėl ko ne pilnai veikia SLA mechanizmas tarp paslaugų tiekėjo ir galinių vartotojų, yra grynai techninė–technologinė, nes nėra jo įgyvendinimui būtinų techninių programinių instrumentų, skirtų vartotojo gautos paslaugos kokybei vertinti.

Šioje disertacijoje pristatomo darbo viena iš tikslo dedamųjų ir yra parengti būtinas priemonės įgyvendinti SLA nuostatas grandyse tarp paslaugų teikėjų ir galutinių tų paslaugų vartotojų.

Bendra SLA įgyvendinimui reikalingų priemonių struktūrinė schema parodyta 5.1 paveiksle.



5.1 pav. Paslaugų lygio užtikrinimo mechanizmas

Esminė ir būtina šios sistemos dalis yra individualaus vartotojo realiai gautų paslaugų kokybės vertinimo įrenginys – iQoS modulis [2A], kurio paskirtis

vertinti suteiktos paslaugos kokybę ir ją apskaityti, tai yra nustatyti kiekybinį įvertį. Šis modulis kartu yra dalis bendros kokybės stebėjimo sistemos, kuria siekiama sukurti grįžtamąjį ryšį tarp vartotojų ir paslaugų teikėjų.

Sudarant SLA, numatomas paslaugos kokybės lygis Q_{reik} . Įdiegus iQoS modulį valdymo sistema iš šio modulio gaunamus duomenis palygina su SLA numatytais sąlygomis ir kokybės rodikliais Q_{reik} . Visi kokybės nukrypimai nuo numatytų normatyvinių kokybės rodiklių registruojami, analizuojami ir apskaitomi. Pagal paslaugų kokybės ataskaitas formuojamas paslaugos apmokestinimas.

iQoS moduliai turėtų būti diegiami į kiekvieno vartotojo galinę įrangą ir turėtų matuoti realiai patirtą kokybę – iQoS. Situacija yra gana sudėtinga, nes šiuo metu nėra žinomų būdų bei priemonių tinkamą vertinti realaus pokalbio metu patirtą kokybę. Geriausia ką galima pasiūlyti, tai sudaryti tam tikrų kokybės indikatorių sistemą, pagal kurią patirta kokybė būtų nustatoma šalutiniu būdu, išreiškiant kokybės pablogėjimus per kitus stebimus fizinio kanalo parametrus

5.2. Statistinių balso kokybės įverčių nustatymo būdas

5.2.1. Išėities sąlygos

Siekiant sukurti iQoS modulį, visų pirma reikia išspręsti balso kokybės matavimo ir kokybės apskaitos problemą. Šis uždavinys yra sudėtingas tuo, kad balso kokybė nuolat kinta ir stipriai priklauso nuo signalo savybių ir prarastų paketų vietos signale. Kadangi iQoS modulis yra siejamas su SLA sąlygomis, toks modulis turi vertinti tik tuos balso iškraipymus bei trukdžius, kurie susidaro dėl mobiliojo ryšio tinklo kaltės ir už kuriuos atsakingas yra paslaugos teikėjas. iQoS modulis neturi vertinti įtakos tų veiksmų, kurie nepriklauso nuo tinklo savybių ir operatoriaus veiksmų. Prie tokių iQoS modulyje nevertintinų veiksmų, pavyzdžiui, turi būti priskirtini pokalbio aplinkos akustiniai triukšmai. Aplinkos triukšmų vartotojas gali išvengti pasirinkdamas pokalbio vietą.

Kaip šioje disertacijoje minėta, invazinio tipo algoritmai (PESQ ir kiti) gali užtikrinti gana aukštą balso kokybės matavimo tikslumą. Deja, realaus pokalbio metu šie metodai negali būti pritaikyti, nes paprasčiausiai nėra antros palyginimui reikalingos signalo kopijos. Invazinių metodų taikymų sritis: laboratoriniai bandymai bei matavimai. Taikant invazinius metodus, kaip parodyta 4 skyriuje, gaunama vertinga faktinė informacija, kuri reikalinga formuojant specialius patirtos kokybės indikatorius.

Standartizuoti neinvaziniai kokybės matavimo būdai (pvz., ITU rekomendacijoje P.563 aprašytas 3SQM [79]) taip pat yra menkai tinkami ir neinformatyvūs, kadangi jie vertina tik bendrąsias balso signalo savybes ir

nustato kaip tiriamas signalas atitinka balso formavimo trakto modelį. Šie matavimo būdai neturi priemonių aplinkos akustiniams triukšmams atskirti ir eliminuoti iš vertinimo rezultatų. Kadangi mobiliojo ryšio telefono pokalbiai neretai vyksta tokiose vietose, kur yra aukšto lygio aplinkos triukšmai, tai 3SQM tipo algoritmas individualiai patirtos balso kokybės objektyviai įvertinti negali.

Aukščiau išsakyti motyvai sudaro pagrindą teigti, kad vartotojo realiai patirtai balso kokybei vertinti mobiliojo ryšio sąlygose gali būti pritaikyti tik netiesioginio kokybės vertinimo algoritmai – kokybės indikatoriai, kurie balso kokybės pablogėjimus nustato pagal ryšio kanalo parametrų pokyčius. Tokių indikatorių pavyzdžiu yra kompanijos „Ericsson“ matuokliuose naudojamas indikatorius, nustatantis balso kokybės indeksą – SQI [34]. SQI teikiamų rezultatų koreliacija su MOS įverčiais yra mažesnė nei PESQ, tačiau šie algoritmai įvertina tinklo įtaką perduoto balso kokybei ir atsiriboja nuo vartotojo sukeltų, kokybę įtakojančių veiksnių.

Pirmoji SQI nustatymo versija sukurta 1999 m. [80]. SQI skaičiuojamas 2,5 sekundes (125 balso paketai) trukmės signalams. Balso kokybės indeksas SQI išreikštas formule:

$$SQI = 20,67 - 57,2 \cdot BER - 29,3 \cdot TFER - 0,11 \cdot LFER, \quad (5.1)$$

kurios kintamieji – keletas perdavimo kanalą charakterizuojančių parametrų: *BER*, *TFER* ir *LFER*. Čia *BER* – vidutinis bitų klaidų tankis, išreikštas 2,5 s laikotarpiui, *LFER* – didžiausias per 2,5 s iš eilės prarastų paketų skaičius; *TFER* – yra kvadratinė šaknis iš *FER*, *FER* – prarastų paketų dalis per 2,5 s.

Formulėje (5.1) naudojami kintamieji *TFER* ir *LFER* nėra apibrėžti GSM standartais. Mobiliojo ryšio vartotojų įrangoje jie nėra skaičiuojami.

Naujesnė SQI versija išreiškiama bendriau:

$$SQI = A \cdot BER + B \cdot FER + C \cdot LFE + \text{Const}. \quad (5.2)$$

Čia *LFE* – iš eilės prarastų paketų skaičius, koeficientai *A*, *B*, *C* – nustatomi kiekvienam kodekui atskirai. AMR kodekui (5.2) išraiška yra kitokia [81]:

$$SQI = A \cdot NBE + B \cdot FER + C \cdot LFE + \text{Const}, \quad (5.3)$$

čia $NBE = a + b \cdot BER$. Koeficientai *a* ir *b* yra parenkami kiekvienam kodeko spartos režimui.

Visi SQI indekso parametrai *BER*, *FER*, *LFE* – visa pirminių duomenų grupė apie balso kokybę gaunami apdorojant signalą specialiais algoritmais. Realios tų algoritmų išraiškos yra kompanijos „Ericsson“ nuosavybė, jos nėra skelbtos.

Kaip minėta SQI skirtas balso kokybei matuoti mobiliojo ryšio sąlygomis ir taikomas vykdant bendruosius tinklo parametrų matavimus.

5.2.2. Balso kokybės vertinimo principai realaus pokalbio metu

Išnagrinėjus faktinę medžiagą, potencialius prototipus ir siekiant sukurti būdą, pritaikytą vertinti balso kokybę realaus pokalbio metu, siūlomi šie bendri principai:

1. Reikia atsižvelgti į tai, kad mobiliojo ryšio sąlygomis balso kokybė yra tam tikra sutartinė sąvoka ir nėra pastovi. Ji priklauso nuo vartotojo terminale aktyvuoto balso kodeko tipo. Pavyzdžiui, skirtingų AMR kodekų pradinė kokybė yra skirtinga. Todėl vienas iš informacijos šaltinių apie balso kokybę yra aktyvuoto balso kodeko tipas.
2. Realios pablogėjusios ryšio sąlygos, dėl kurių prarandami balso duomenų paketai, pablogina bet kurio aktyvuoto balso kodeko kokybę, tačiau skirtingu dydžiu.
3. Aiškiai pastebimus balso kokybės defektus sukuria prarasti balso paketai ir prarastų paketų pliūpsniai, todėl tokių defektų įtaka turi būti įvertinta. Nežymūs pabloginimai, kurie galbūt susidaro dėl klaidingai priimtų pavienių bitų, pradiniam šios problemos sprendimo etape galėtų likti ir neįvertinti.
4. Kai nustatoma, kad paketas prarastas, kaip parodyta 4 skyriuje, nėra galimybės vienareikšmiai nustatyti kokybės pablogėjimo dydžio, nes kiekvienas balso segmentas skirtingai reikšmingas. Realiai galima nustatyti tik sąsajas tarp prarastų pavienių paketų ar jų grupių ir tikimybės, kad balso kokybė bus sumažinta dydžiu dQ .
5. Taikant aukščiau paminėtas vertinimo priemones, balso kokybė nustatoma atlikus baigtinės trukmės signalų atkarpų analizę. Pavyzdžiui, 3SQM ir PESQ analizuoja 8 ... 20 s atkarpas, SQI – 2,5 s atkarpas. Realios vartotojų pokalbių trukmės gali kisti plačiose ribose, nuo keleto sekundžių iki dešimčių minučių ir gal net valandų. Todėl realaus pokalbio kokybę reikia vertinti skaidant pokalbį į fiksuotos trukmės (pvz. 2 s) atkarpas ir vertinti kiekvienos iš jų patirtą faktinę kokybę. Šiam pasirinkimui pagrįsti galima paminėti ir tai, kad pagal ITU P.800 vertinant MOS kokybės rodiklį ekspertams rekomenduojama pateikti balso signalus – sakinius, kurių trukmė turėtų būti 2–3 s.
6. Viso pokalbio kokybės įvertis galėtų būti išreiškiamas vienu koeficientu, nustatomu kaip dalinių kokybės įverčių vidurkis. Tačiau mobiliojo ryšio sąlygos, kaip žinoma, gali kisti. Mūsų atlikti eksperimentai parodo, kad vartotojo patirta balso kokybė vieno

pokalbio metu taip pat gali kisti gana plačiose ribose, nuo geros iki blogos. Tokiomis sąlygomis vertinant vienu vidurkiu būtų nuslepiami tikrai blogos kokybės laikotarpiai. Čia pabrėžtinai išskiriami galimi blogos kokybės laikotarpiai, nes tokiais laikotarpiais pokalbis negali vykti, pašnekovai vienas kito nesupranta. Elementarus aritmetinis vidurkis, esant ilgesnės trukmės pokalbiui, užmaskuoja lokalius kokybės pablogėjimus.

Išnagrinėję turimą medžiagą individualiai kokybei vertinti realaus mobiliojo ryšio pokalbio metu, pasiūlėme patirtą balso kokybę išreikšti ne vienu rodikliu, bet standartinių kokybės kategorijų skirstiniu. Skirtingų kokybės kategorijų sudarymui tam tikrą pagrindą sukuria ITU rekomendaciją P.800, kurioje aprašant MOS vertinimų principus numatytos penkios balso kokybės klasės: puiki, gera, vidutiniška, pakenčiama ir bloga. Klasėms priskiriami kokybės balai atitinkamai 5, 4, 3, 2 ir 1.

Kitas, daugiau realistinis, balso kokybės dalijimo į kokybės kategorijas kelias suformuotas ITU rekomendacijoje G.107 [82], kurioje įvestas balso kokybės E–modelis ir kokybės reitingas R susietas su vartotojų pasitenkinimo lygiu. ITU rekomendacijoje G.109 įvardintos perduotos kalbos kokybės kategorijos pagal vartotojų pasitenkinimo laipsnį. Apibendrinti duomenys pateikti 5.1 lentelėje.

5.1 lentelė. Balso kokybės kategorijos

R reitingas	Kokybės kategorija (angliškai)	Kokybės kategorija (lietuviškai)	Vartotojo pasitenkinimas
$90 \leq R < 100$	Best	Geriausia	Labai patenkintas
$80 \leq R < 90$	High	Gera	Patenkintas
$70 \leq R < 80$	Medium	Vidutiniška	Kai kurie vartotojai nepatenkinti
$60 \leq R < 70$	Low	Žema	Daugelis vartotojų nepatenkinti
$50 \leq R < 60$	Poor	Bloga	Beveik visi vartotojai nepatenkinti

Pagal G.107 rekomendaciją straipsnyje [25] sudarytas grafikas, siejantis vartotojų pasitenkinimo lygį su MOS arba PESQ vertinimų skalės vienetais. MOS/PESQ skalės vienetais išreikštos ribos, skiriančios kokybės kategorijas, surašytos 5.2 lentelėje.

Įvertinus tai, kad pagal [82] kokybė žemiau 2,58 balo yra nerekomenduotina, 5.2 lentelėje kategorija "Bloga" yra išplėsta ir apatinė riba yra laikoma 1.

5.2 lentelė. Balso kokybės kategorijų ribos

Balso kokybės kategorija, q	Q_{PESQ} viršutinė riba	Q_{PESQ} apatinė riba	Kategorijos plotis
Geriausia	4,50	4,34	0,16
Gera	4,34	4,03	0,31
Vidutiniška	4,03	3,6	0,43
Žema	3,6	3,1	0,5
Bloga	3,1	1	2,1

Balso kokybės vertinimas taikant kokybės kategorijas

Kaip parodyta 4 skyriuje, prarasti paketai labai skirtingai įtakoja balso kokybę. Tiesiogiai suskaičiavus kiek paketų prarasta per tam tikrą laikotarpį dar negalima pasakyti kiek jie pablogino balso kokybę. Pavyzdžiui, tie ištrinti paketai, kurie pasitaikė balso tylos laikotarpiais, neturi jokios įtakos kokybei.

Išnagrinėję balso kokybės vertinimo mobiliojo ryšio sąlygose specifiką ir prisilaikydami kokybės kategorijų koncepcijos, pasiūlėme statistinių balso kokybės įverčių nustatymo būdą, kuris pateiktas projekto COST290 baigiamajai ataskaitai.

Šis balso kokybės statistinių įverčių nustatymo būdas realizuojamas keliais etapais:

- Remiantis P.800 rekomendacijos nuostatomis apie matavimo signalų trukmės parinkimą, siūlome pokalbio laiką skaidyti į 2 s trukmės intervalus.
- Pokalbio metu, vartotojo galinėje įrangoje, kiekviename 2 s (j – ajame) intervale nustatomi prarastų paketų skaičiai $i(j)$.
- Viso pokalbio laikotarpiu (išskaidyto į N intervalų) surinktų skaičių masyvas $\{i(j)\}$ išrūšiuojamas ir suskaičiuojama, kiek pasitaikė intervalų, kuriuose buvo 0, 1, 2, 3, 4, ... prarasti paketai.

Pažymėjus tokių intervalų skaičius simboliu n_i , galutinio patirtos balso kokybės skirstinio diskretinės dedamosios paskaičiuojamas pagal formulę:

$$P(q) = \frac{1}{N} \sum_{i=1} n_i \cdot p(q|i). \quad (5.4)$$

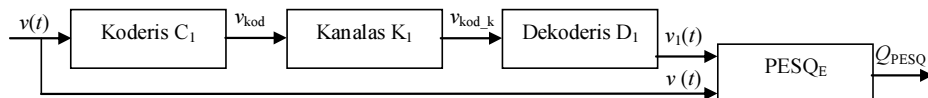
Čia N – 2 s intervalų skaičius, n_i – intervalų skaičius n , kuriuose buvo prarasta i paketų, $p(q|i)$ – tikimybė, kad bus kokybės kategorija q , kai yra prarasta i paketų.

Pokalbio kokybės įverčio rezultatas išreiškiamas 5 skaičiais, kurie parodo

kiekvienos kokybės kategorijos santykinę dalį. Taip išsaugoma informacija apie pokalbio metu galėjusius pasitaikyti trumpus, prastos kokybės intervalus, kurie nebūtų pastebėti taikant elementarų, paskaičiuotų kokybės įverčių vidurkinimą. Juo ilgesnė pokalbio trukmė, tuo mažesnę įtaką vidurkiui turėtų trumpi prastos kokybės intervalai. Kokybės įvertį apibūdinant kokybės kategorijų skirstiniu, pokalbio trukmė nebedaro įtakos rezultatams ir gautas skirstinys leidžia daug išsamiau įvertinti vartotojo patiriamą kokybę. Taip pat, reikia nepamiršti, kad kiekvienam balso kodekui reikalinga tik jam paskaičiuotas $p(q|i)$ tikimybių rinkinys.

Kokybės kategorijų tikimybių skaičiavimas

Siekiant eksperimentiškai nustatyti sąlyginius empirinius kokybės skirstinius $p(q|i)$, buvo sukurta 5.2 paveiksle parodyta, ryšio kanalu perduoto balso kokybės vertinimo schema.



5.2 pav. Balso kokybės vertinimo schema

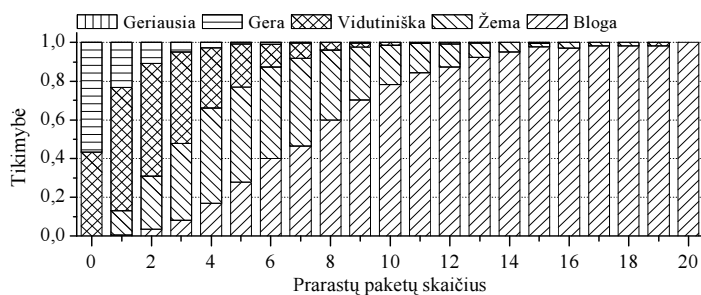
Šioje schemoje balso signalas $v(t)$ yra paduodamas į koderį C_1 (AMR). Gautas duomenų srautas v_{kod} papuola į kanalo modelį K_1 . Čia pagal pasirinktą prarastų paketų seką ar modelį, duomenų sraute v_{kod} imituojami paketų praradimai. Dekoderis D_1 dekoduoja srautą su prarastais paketais. Gaunamas balso signalas $v_1(t)$ – paveiktas AMR kodeko ir paketų praradimų.

Balso kokybės vertinimai atlikti pritaikius mūsų pasiūlytą mažos trukmės testuojamų signalų paruošimo būdą, kuris užtikrina minimalią matavimo rezultatų neapibrėžtį.

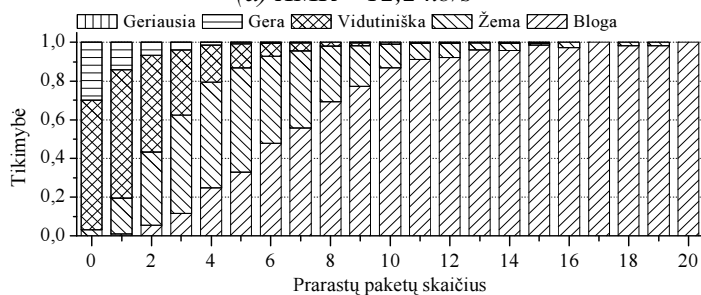
$p(q|i)$ apskaičiavimui yra sugeneruojami keturi prarastų paketų srautai (skirtingoms ryšio sąlygoms) pasitelkiant anksčiau aprašytus balso paketų modelius. Tai garantuoja, kad sekose pasitaikys mobiliojo ryšio kanalams būdingi paketų praradimai. Kiekvienos sekos ilgis – 100000 paketų. Sekos yra dalinamos į 2 s intervalus, kurie rūšiuojami pagal prarastų paketų skaičių intervaluose.

Modeliavimai atlikti įvertinus kiekviename 2 s segmente pasitaikiusių prarastų paketų poveikį trisdešimčiai testinių balso segmentų. Kiekvienu atveju paskaičiuojamas Q_{PESQ} įvertis, kuris vėliau priskiriamas kokybės kategorijai q , esant atitinkamam prarastų paketų skaičiui.

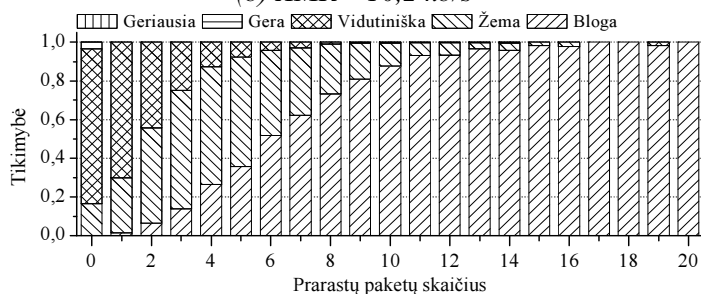
Tikimybių pasiskirstymo rezultatai pateikti 5.3 ir 5.4 paveiksluose.



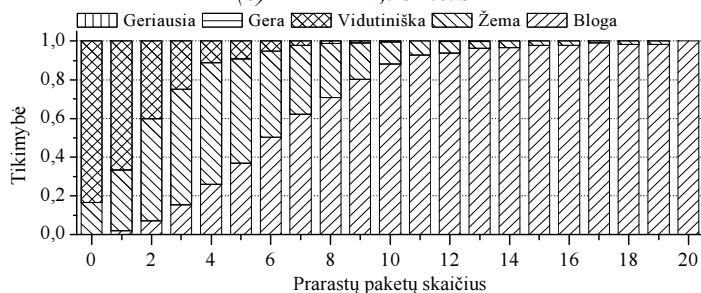
(a) AMR – 12,2 kb/s



(b) AMR – 10,2 kb/s

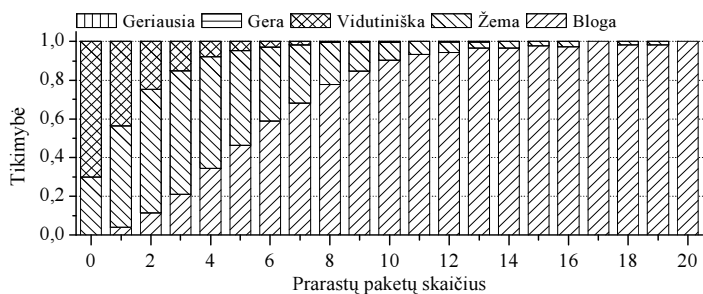


(c) AMR – 7,95 kb/s

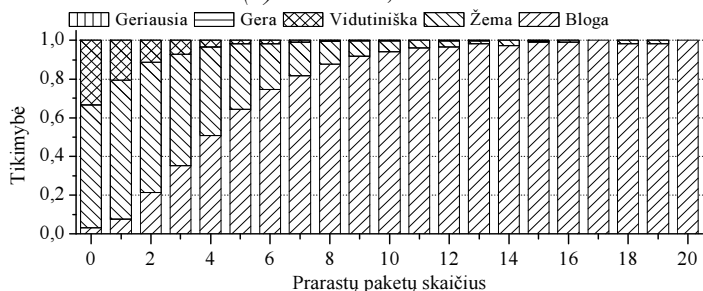


(d) AMR – 7,4 kb/s

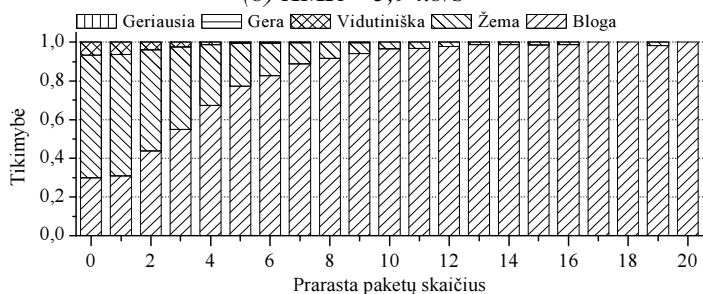
5.3 pav. Kokybės kategorijų q pasirodymo tikimybės esant skirtingam prarastų paketų skaičiui



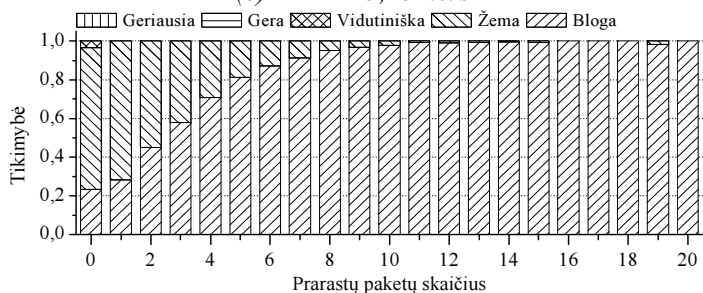
(a) AMR – 6,7 kb/s



(b) AMR – 5,9 kb/s



(c) AMR – 5,15 kb/s



(d) AMR – 4,75 kb/s

5.4 pav. Kokybės kategorijų q pasirodymo tikimybės esant skirtingam prarastų paketų skaičiui

Modeliavimai atlikti AMR kodekams, esant 4,75, 5,15, 5,9, 6,7, 7,4, 7,95, 10,2, ir 12,2 kb/s spartos režimams. Iš paveikslų matyti, kad esant konkrečiam prarastų paketų skaičiui 2 s intervale, balso kokybė gali kisti plačiose ribose: nuo geros iki nepriimtinos.

Siūlomas kokybės vertinimo metodas įvertina prarastų balso paketų įtaką kokybei.

5.3. Penktojo skyriaus išvados

1. Naujų kartų ryšio sistemose turėtų būti numatyta galimybė vartotojui pasirinkti paslaugų kokybės lygį. Kiekvieno vartotojo realiai patirta paslaugų kokybė turėtų būti vertinama individualiai, o paslaugų apmokestinimas susietas su realiai gautų ir reikalautų paslaugų lygiu.
2. Balso kokybę mobiliojo ryšio sistemose vertinant vienu įverčių, rezultatas yra suvidurkinamas ir dėl to netenkama informacijos apie trumpalaikius kokybės pablogėjimus. Dėl šios priežasties yra siūloma balso kokybę išreikšti per kokybės kategorijų skirstinius. Tai leidžia išsamiau apibūdinti vartotojo patirtą balso kokybę.
3. Atsižvelgiant į kokybės kategorijas, pasiūlytas naujas, objektyvus balso kokybės vertinimo metodas, įvertinantis prarastus paketus ir naudojamus balso kodekus.
4. Modeliuojant sudaryti kokybės kategorijų tikimybių rinkiniai AMR kodekų šeimai, įvertinant realiose ryšio sąlygose vykstančius pavienius ir grupinius paketų praradimus.

Bendrosios išvados

Apibendrinant atliktus tyrimus gauti šie rezultatai ir išvados:

1. Mobiliojo ryšio sistemose prarasti paketai blogina perduoto balso kokybę, tačiau mokslinėje literatūroje balso paketų praradimai nebuvo išsamiai ištirti. Disertacijoje pristatomas balso paketų srautų rinkimo metodas ir aprašomos priemonės, skirtos GSM balso paketų srautams tirti. Markovo grandinių matematiniai modeliai pritaikyti prarastų balso paketų srautams imituoti. Šių modelių ypatumas yra tas, kad jų parametrai susieti su ryšio kanalo parametrais.
2. Darbe įrodyta, kad balso kokybei vertinti plačiai taikomas, ITU P.862 rekomendacijoje įteisintas PESQ algoritmas, nėra tinkamas matuoti trumpų balso atkarpų kokybę, nes gaunamų matavimo rezultatų neapibrėžtis gali siekti daugiau nei 0,6 MOS balo. Problemai spręsti pasiūlyta naudoti dirbtinai suformuotą tiriamąjį signalą, sudarytą iš M kartų pakartotų pirminio signalo atkarpų. Tai leidžia iki 20 kartų sumažinti matavimo rezultatų neapibrėžtį.
3. Daugkartiniais tyrimais įrodyta, kad nėra vienareikšmio ryšio tarp prarastų balso paketų skaičiaus ir balso kokybės pablogėjimo vertės. Galima nustatyti tik sąsajas tarp prarastų paketų ir tikimybės, kad balso kokybė bus sumažinta dydžiu dQ_{PESQ} .

4. Nustatyta, kad vertinant mobiliojo ryšio balso kokybę vienu parametru paslepiaama informacija apie trumpalaikius kokybės pablogėjimus. Todėl pasiūlyta vartotojo patirtą balso kokybę išreikšti standartizuotą kokybės kategorijų skirstiniais.

Literatūros sąrašas

- [1] ITU-T Rec. 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*. 2001.
- [2] Konrad, A., *et al.* 2003. A Markov-based Channel Model Algorithm for Wireless Networks, *Wireless Networks* 9(3): 189–199.
- [3] Ji, P., *et al.* 2004. Modeling Frame-level Errors in GSM Wireless Channels, *Performance Evaluation* 55(1): 165–181.
- [4] Boggia, G., *et al.* 2004. A simple ON/OFF logarithmic model for frame-level errors in wireless channels applied to GSM, *Vehicular Technology Conference* 6: 4491–4495.
- [5] Arauz, J.; Krishnamurthy, P. 2003. Markov modeling of 802.11 channels, *Vehicular Technology Conference* 2: 771–775.
- [6] Tang, C.; McKinley, P, K. 2003. Modeling multicast packet losses in wireless LANs, *MSWiM*: 130–133.
- [7] Cutler, A.; Carter, D. M. 1987. The predominance of strong initial syllables in English vocabulary, *Computer Speech and Language* 2: 133–142.

- [8] Marslen-Wilson, W. D.; Zwitserlood, P. 1989. Accessing spoken words: The importance of word onsets, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 15: 576–585.
- [9] *ITU-T Rec. E.800. Terms and Definitions related to Quality of Service and Network Performance including Dependability.* 1996.
- [10] Jost, H. *Benchmarking VNO's GSM voice quality. Denmark. Center for Tele-Information* [interaktyvus]. 2003. Ascom [žiūrėta 2008 gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.fbr.dk/upload/application/b9c84178/denmark-vno_report.pdf>
- [11] Jost, H. *Benchmarking GSM indoor voice quality. Denmark. Center for Tele-Information* [interaktyvus]. 2003. Ascom [žiūrėta 2008 gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.fbr.dk/upload/application/e4457fc5/denmark-indoor_report.pdf>
- [12] Jost, H. *Benchmarking GSM voice quality Denmark operators. Center for Tele-Information* [interaktyvus]. 2003. Ascom [žiūrėta 2008 gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.fbr.dk/upload/application/49707e97/denmark_operators_report.pdf>
- [13] Kajackas, A.; Batkauskas, V.; Medeisis, A. 2004. Individual QoS Rating for Voice Services in Cellular Networks, *IEEE Communications Magazine*: 88–93.
- [14] *A view on Future Communications* [interaktyvus]. 2006. Euro-NGI. [žiūrėta 2008 gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <<http://eurongi.enst.fr/archive/172/AviowonFutureCommunications.doc>>
- [15] *Quality of Experience (QoE) of mobile services: Can it be measured and improved?* [interaktyvus]. 2004. Nokia White Paper [žiūrėta 2008 gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.nokia.com/NOKIA_COM_1/Operators/Downloads/Nokia_Services/whitepaper_qoe_net.pdf>
- [16] Bharrathsingh, K. 2005. Quality of experience as an integral part of network engineering in *Nortel Technical Journal* 1: 31–36 [žiūrėta 2008 gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.nortel.com/corporate/news/collateral/ntj1_quality.pdf>
- [17] *3GPP TS 26.090. Performance characterization of the Adaptive Multi-Rate (AMR) speech codec. V7.0.0.* 2007.
- [18] Liberal, F.; Ferro, A.; Fajardo, J.O. 2006. Application of a PQoS Based Quality Management Model to Identify Relative Importance of the

- Agents, *Information, Communications and Signal Processing*: 239–243.
- [19] Hestnes, B., *et al.* 2003. Quality of Experience in real-time person-person communication – User based QoS expressed in technical network QoS terms”, *Proceedings of the 19th International Symposium on Human Factors in Telecommunication*: 3–10.
- [20] Alben, L. 1996. Quality of experience: Defining the criteria for effective interaction design, *Interactions* 3(3): 11–15.
- [21] Corrie, B., *et al.* 2003. Towards Quality of Experience in Advanced Collaborative Environments. *Third Annual Workshop on Advanced Collaborative Environments*.
- [22] Jain, R. 2004. Quality of experience, *Multimedia, IEEE* 9(1): 95–96.
- [23] *ITU-T Study Group 12. Definition of Quality of Experience (QoE). TD 109rev2 (PLEN/12)*. Geneva, 2007.
- [24] Ding L.; Goubran R. 2003. Assessment of Effects of Packet Loss on Speech Quality in VoIP, *The 2nd IEEE International Workshop*: 49–54.
- [25] Kajackas, A.; Anskaitis, A. 2005. Investigation the ability of objective measures of the perceptual speech quality in mobile networks. *Electronics and Electrical Engineering* 7(63): 10–15.
- [26] Sun, L; Wade, G.; Lines, B.; Ifeachor, E. 2001. Impact of packet loss location on perceived speech quality. *In Internet Telephony Workshop 2001*.
- [27] Kajackas, A.; Batkauskas, V. 2004. Impact of Electromagnetic Interference on QoS in Cellular Networks. *Electromagnetic Compatibility*: 244–247.
- [28] Batkauskas, V. 2006. *Mobiliojo tinklo paslaugų kokybės vertinimo ir gerinimo būdų tyrimas*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika.
- [29] *3GPP TS 06.21. Substitution and muting of lost frames for half rate speech traffic channels V8.0.1*. 2000.
- [30] *3GPP TS 06.11. Substitution and muting of lost frames for full rate speech channel. V8.0.1*. 2000.
- [31] *3GPP TS 06.61. Substitution and muting of lost frames for Enhanced Full Rate (EFR) speech traffic channels V8.0.1*. 2000.

- [32] 3GPP TS 26.091. *AMR speech Codec; Error concealment of lost frames V7.0.0*. 2007.
- [33] ITU-T Rec. P.800. *Methods for subjective determination of transmission quality*. 1996.
- [34] Ericsson. 2003. Tams investigation GSM 5.1: user's manual.
- [35] Conway, A. E. 2004. Output-Based Method of Applying PESQ to Measure the Perceptual Quality of Framed Speech Signals, *IEEE Communications Society*: 2521–2526.
- [36] Rix, A. W. 2003. Comparison between subjective listening quality and P.862 PESQ score, *Proceedings of Online Workshop Measurement of Speech and Audio Quality in Networks*: 17–25.
- [37] 1999. Subjective Results on impairment effects of IP packet loss. *Tech. report "TIPHON 17" Nortel Networks (Europe)*: 1–7.
- [38] Pennock, S. 2002. Accuracy of the Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ) Algorithm. *Measurement of Speech and Audio Quality in Networks Line Workshop (MESAQIN '02)*: 1–19.
- [39] Sun, L.; Ifeachor, E. 2004. New Models for Perceived Voice Quality Prediction and their Applications in Playout Buffer Optimization for VoIP Networks, *IEEE International Conference on Communications* 3(1): 1478–1483.
- [40] Lipeikienė, J.; Lipeika, A. 1998. Language engineering in Lithuania, *Informatika* 9(4): 449–456.
- [41] Kasparaitis, P. 2001. *Lietuvių kalbos kompiuterinė sintezė*. Daktaro disertacija. Vilniaus universitetas. Vilnius.
- [42] Rudžionis, A.; Rudžionis, V. 2000. Noisy speech detection and endpointing, *Proc. workshop Voice operated telecom services: Do they have a bright future?*: 79–82.
- [43] Rudžionis, A.; Rudžionis, V.; Ratkevičius, K.; Kasparaitis, P. 2001. Lietuvių kalbos sintezės ir atpažinimo taikymai automatikoje, *Automatika ir valdymo technologijos – 2001*: 13–18.
- [44] Kasparaitis, P. 2000. Automatic stressing of the lithuanian text on the basis of a dictionary, *Informatika* 11(1): 19–40.
- [45] Kasparaitis, P. 2001. Automatic stressing of the lithuanian nouns and adjectives on the basis of rules, *Informatika* 12(2): 315–336.

- [46] *Text – Talk* [interaktyvus]. 2006. [žiūrėta 2008 gegužės 20 d.]. Prieiga per internetą: <[http:// http://www.text-talk.com/lt/index.html](http://http://www.text-talk.com/lt/index.html)>
- [47] Lipeika, A.; Lipeikienė, J.; Telksnys, L. 2002. Development of Isolated Word Speech Recognition System, *Informatica* 13(1): 37–46.
- [48] Tamulevičius, G. 2005. Žodžio pradžios ir galo nustatymas atpažįstant atskirai sakomus žodžius, *Elektronika ir elektrotechnika* 2(58): 61–64. ISSN 1392-1215.
- [49] Šilingas, D.; Telksnys, L. 2004. Specifics of hidden Markov model modifications for large vocabulary continous speech recognition, *Informatica* 15(1): 93–110.
- [50] Laurinčiukaitė, S.; Lipeika, A. 2006. Syllable based Continuous Speech Recognition, *Electronics and Electrical Engineering* 6(70): 91–94.
- [51] Lipeika, A.; Lipeikienė, J. 1999. Speaker recognition based on the use of vocal tract and residuesignal LPC parameters, *Informatica* 10(4): 377–388.
- [52] Lipeika, A. 2005. Formantiniai požymiai atpažįstant kalbą, *Information sciences* 34: 215–219.
- [53] Raškinis, G; Raškinienė, D. 2003. Building medium-vocabulary isolated-word lithuanian HMM speech recognition system, *Informatica* 14(1): 75–84.
- [54] Filipovič, M. 2005. *Atskirai tariamų lietuvių šnekos žodžių atpažinimo, grindžiamo dirbtiniais neuroniniais tinklais ir paslėptais Markovo modeliais, tyrimai*. Daktaro disertacija. Vytauto Didžiojo universitetas. Kaunas.
- [55] Navakauskas, D. 1999. *Artificial neural networks for the restoration of noise distorted songs audio records*. Doctoral dissertation. Vilnius Gediminas technical university. Vilnius: Technika.
- [56] Paulikas, Š. 1999. *Restoration of noise distorted accents audio records*. Doctoral dissertation. Vilnius Gediminas technical university. Vilnius: Technika.
- [57] Paulikas, Š.; Navakauskas, D. 2005. Restoration of voiced speech signals preserving prosodic features, *Speech Communication* 47 (4): 457–468.
- [58] Paulikas, Š.; Navakauskas, D. 2003. New implementation scheme for the restoration of voiced speech signals, *Informatica* 14 (3): 349–356.

- [59] Jankūnienė, R. 2003. *Balso perdavimo Internet protokolu paslaugos kokybės daugiaoperatorinėje aplinkoje įvertinimas*. Daktaro disertacija.
- [60] Šaltis, A. 2004. *Radio technologijos vartotojų prieigų tinkluose*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Vilnius: Technika.
- [61] Pavilanskas, L. 2007. *Adaptation of wireless access mac protocol for real time packet flows*. Doctoral dissertation. Vilnius Gediminas technical university. Vilnius: Technika.
- [62] 3GPP TS 05.03. *Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network; Channel coding V8.9.0*. 2005.
- [63] 3GPP TS 06.10. *Full Rate Speech Transcoding V8.2.0*. 2001.
- [64] 3GPP TS 06.31. *Discontinuous Transmission (DTX) for Full Rate Speech Traffic Channels V8.0.1*. 2001.
- [65] 3GPP TS 06.12. *Comfort Noise Aspects for Full Rate Speech Traffic Channels V8.1.0*. 2001.
- [66] Kajackas, A.; Medešis, A. 2000. Apie mobiliojo ryšio paslaugų kokybės rodiklius bei jų kontrolę, *Elektronika – 2000*: 135–139. ISSN 1392-9631.
- [67] Abdelmoumen, R.; Malli, M.; Barakat, C. 2004. Analysis of TCP latency over wireless links supporting FEC/ARQ-SR for error recovery, *Communications, 2004 IEEE International Conference* 7: 3994–3998.
- [68] Yu, Y.; Miller, S. L. 2007. A Four-State Markov Frame Error Model for the Wireless Physical Layer, *WCNC 2007*: 2053–2057.
- [69] Hartwell, J. A.; Fapojuwo, A. O. 2004. Modeling and characterization of frame loss process in IEEE 802.11 wireless local area networks, *Vehicular Technology Conference* 6: 4481–4485.
- [70] Dalalah, D.; Cheng, L.; Tonkay, G. 2008. Modeling End-to-End Wireless Lossy Channels: A Finite-State Markov Approach, *Wireless Communications* 7(4): 1236–1243.
- [71] McDougall, J.; Yu, Y.; Miller, S. 2004. A statistical approach to developing channel models for network simulations, *WCNC 2004* 3: 1660–1665.
- [72] McDougall, J.; Miller, S. 2003. Sensitivity of wireless network simulations to a two-state Markov model channel approximation, *GLOBECOM '03 IEEE* 2: 697–701.

- [73] Pimentel, C.; Blake, I. F. 1998. Modeling burst channels using partitioned Fritchman's Markov models, *Vehicular Technology IEEE* 47(3): 885–899.
- [74] Babich, F.; Lombardi, G. A 2000. Markov model for the mobile propagation channel, *Vehicular Technology IEEE* 49(1): 63–73.
- [75] Inaty, E. 2006. A Finite State Markov Chain-Based Umbrella Cell Channel Model for Fast Mobile Users, *WiCOM 2006*: 1–5.
- [76] Gomis, V., *et al.* 2007. Combined Markov Model for Packet Loss Characterization in UMTS Channels, *Vehicular Technology Conference, 2007*: 782–786.
- [77] Turin, W.; Nobelen, R. 1998. Hidden Markov modeling of flat fading channels, *IEEE Areas Commun.* 16(9): 1809–1817.
- [78] *ITU-T Rec. E.860. Quality of telecommunication services: concepts, models, objectives and dependability planning – Use of quality of service objectives for planning of telecommunication networks.* 2002.
- [79] *ITU-T Rec. P.563. Single-ended method for objective speech quality assessment in narrow-band telephony applications.* 2004.
- [80] Karlsson, A., *et al.* 1999. Radio Link Parameter Based Speech Quality Index – SQI. *IEEE Workshop on speech Coding.*
- [81] Wanstedt, S., *et al.* 2002. Development of an objective speech quality measurement model for the AMR codec, *On-line workshop MESAQIN.*
- [82] *ITU-T Rec. G.107. The E-model, a computational model for use in transmission planning.* 2005.

Autoriaus publikacijų sąrašas disertacijos tema

Straipsniai Mokslinės informacijos instituto pagrindinio sąrašo
(*Thomson ISI Master Journal List*) leidiniuose

- [1A] Kajackas, A.; Anskaitis, A.; Guršnys, D. 2008. Peculiarities of Testing the Impact of Packet Loss on Voice Quality, *Electronics and Electrical Engineering* 2(82): 35–40. ISSN 1392–1215 (Thomson ISI Master Journal List).

Straipsniai *INSPEC* tarptautinėje duomenų bazėje
referuojamuose leidiniuose

- [2A] Kajackas, A.; Guršnys, D. 2006. Investigation of voice frame erasures in GSM, *Electronics and Electrical Engineering* 4(68): 47–50. ISSN 1392–1215 (Inspec).
- [3A] Kajackas, A.; Anskaitis, A.; Guršnys, D. 2005. Individual Quality of Service Concept in Next Generations Telecommunications networks, *Electronics and Electrical Engineering* 4(60): 11–16. ISSN 1392–1215 (Inspec).

Straipsniai kituose leidiniuose

- [4A] Kajackas, A.; Anskaitis, A.; Guršnys, D.; Pavilanskas, L. 2005. Estimation of QoS Dynamics in the Wireless Networks, in *COST 290 4th meeting* [interaktyvus]. [Žiūrėta 2008 gegužės 03 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.cost290.org/td2005/tds/td05050.pdf>>
- [5A] Guršnys, D. 2005. Prarastų paketų srauto matavimo metodika GSM tinkle, iš *Elektronika ir elektrotechnika: 8-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Lietuva be mokslo – Lietuva be ateities“*, įvykusios Vilniuje 2005 m. kovo 18 d., pranešimų medžiaga. Vilnius: Technika, 40–45. ISBN 9986–936–4.

Priedas. D_n ir DA_n iškraipymų
koeficientai

Dn iškratymo koeficientų kitimas, keičiantis matavimo lango pozicijai

Lango poslinkis, ms	Fonemos numeris																																Suma
	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50								
0	0	0	0	0	0,04	0	0	0,03	0,02	5	13	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0	0	0,05	0	18,5						
1	0	0	0	0	0,07	0	0,01	0	0	6	14	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0,02	0,06	0	19,67							
2	0,02	0	0,04	0	0,1	0	0,08	0,05	0,09	6	15	0	0,03	0,06	0	0	0	0	0,01	0	0,02	0,09	0,06	0,07	21,9								
3	0,01	0	0,01	0	0,09	0	0,06	0,11	0,07	7	17	0,04	0,01	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0,08	0,09	24,85								
4	0	0	0	0	0,05	0	0,02	0,05	0,06	10	19	0,1	0	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0,09	0,08	29,35								
5	0,07	0,06	0,08	0	0,1	0	0,07	0,09	0,12	12	21	0,27	0	0,05	0	0	0	0,08	0,03	0	0,07	0,09	0,04	34,37									
6	0	0	0	0	0,03	0	0	0	0,82	14,6	21	1	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0	37,17									
7	0	0	0	0	0	0	0,01	1	17	20	5	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0	43,2								
8	0	0	0	0	0	0	0,01	0	2	18	19	5	0,08	0	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0	0,06	0	43,69								
9	0	0	0	0	0	0	0,04	0,02	2	15	18	0,56	0	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0	0,03	0	35,39								
10	0,01	0	0	0	0	0,03	0,09	0,07	3	11	15	0,18	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0,06	0	0,01	0	29,84								
11	0	0	0	0	0	0,05	0	4	10	8	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0	23,17								
12	0,04	0	0	0	0	0,06	0,11	5	12	5	0	0,05	0,03	0	0	0	0,02	0	0	0	0	0	0,01	0	22,11								
13	0,03	0,03	0,01	0	0	0,01	0,06	0,05	4	14	3	0	0	0,03	0	0	0,07	0,02	0	0	0	0	0	0	21,07								
14	0	0,04	0,03	0	0	0,01	0,06	0,05	4	14	1	0	0	0	0	0	0,08	0,06	0,02	0,03	0	0,04	0	19,2									
15	0	0,05	0,05	0,06	0	0,06	0,09	0,07	4	13	0,43	0	0	0	0,02	0	0,09	0,09	0,09	0,1	0	0,05	0	18,61									
16	0	0	0	0,04	0	0	0,03	0,02	5	13	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0	0	0,05	0	18,5								
17	0	0	0	0,07	0	0,01	0	0	6	14	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0,02	0,06	0	19,67								
18	0	0,04	0	0,1	0	0,08	0,05	0,09	6	15	0	0,03	0,06	0,07	0	0	0,01	0	0,02	0,09	0,06	0,07	21,89										
19	0	0,01	0	0,09	0	0,06	0,11	0,07	7	17	0,04	0,01	0,04	0,05	0	0	0	0	0	0,03	0,08	0,09	24,83										
20	0	0	0	0,05	0	0,02	0,05	0,06	10	19	0,1	0	0,03	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0,09	0,08	29,35									
21	0,06	0,08	0	0,1	0	0,07	0,09	0,12	12	21	0,27	0	0,05	0,09	0	0	0,08	0,03	0	0,07	0,09	0,04	34,3										
22	0	0	0	0,03	0	0	0	0,82	14,6	21	1	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08	0	37,17									
23	0	0	0	0	0	0	0,01	1	17	20	5	0,07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07	0	43,2									
24	0	0	0	0	0	0,01	0	2	18	19	5	0,08	0	0	0	0	0	0,01	0,01	0	0,06	0	43,69										
25	0	0	0	0	0	0,04	0,02	2	15	18	0,56	0	0	0	0	0	0	0	0,06	0	0,03	0	35,4										
26	0	0	0	0	0,03	0,09	0,07	3	11	15	0,18	0	0,01	0	0	0	0	0	0,06	0	0,01	0	29,83										
27	0	0	0	0	0	0,05	0	4	10	8	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0	23,17									
28	0	0	0	0	0	0,06	0,11	5	12	5	0	0,05	0,03	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0,01	0	22,07									
29	0,03	0,01	0	0	0,01	0,06	0,05	4	14	3	0	0	0,03	0,06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21,04									
30	0,04	0,03	0	0	0,01	0,06	0,05	4	14	1	0	0	0	0,02	0	0	0	0,02	0,03	0	0,04	0	19,2										
31	0,05	0,05	0,06	0	0,06	0,09	0,07	4	13	0,43	0	0	0	0,02	0	0	0	0,09	0,1	0	0,05	0	18,61										
32	0	0	0,04	0	0	0,03	0,02	5	13	0,27	0	0	0	0	0	0	0	0,03	0	0	0,05	0	18,5										

Darius Guršnys

VOICE QUALITY EVALUATION METHODS AND MEANS FOR MOBILE
COMMUNICATIONS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences, Electrical and Electronic Engineering (01T)

Darius Guršnys

BALSO KOKYBĖS VERTINIMO METODAI IR PRIEMONĖS MOBILIOJO
RYŠIO SISTEMOMS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, elektros ir elektronikos inžinerija (01T)

2008 09 29. 5,5 sp. l. Tiražas 20 egz.

Vilniaus Gedimino technikos universiteto leidykla „Technika“, Saulėtekio al. 11,

LT-10223 Vilnius, <http://leidykla.vgtu.lt>

Spausdino UAB „Baltijos kopija“, Kareivių g. 13B, 09109 Vilnius, <http://www.kopija.lt>