



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
TELEKOMUNIKACIJŲ INŽINERIJOS KATEDRA

Giedrius Urbonas

VOIP PASLAUGOS KOKYBĖS TYRIMAS
VOIP QUALITY OF SERVICE RESEARCH

Baigiamasis magistro darbas

Telekomunikacijų inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 612101T211

Telekomunikacijų technologijų specializacija

Elektronikos inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2008

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

Elektronikos fakultetas

Telekomunikacijų inžinerijos katedra

ISBN ISSN

Egz. sk. 2

Data 2008-06-11

Kalba

☒ X

Lietuvių

☐

Anglų

Telekomunikacijų inžinerijos studijų programos baigiamasis magistro darbas

Pavadinimas **VoIP paslaugos kokybės tyrimas**

Autorius **Giedrius Urbonas**

Vadovas **mgr. Darius Guršnys**

Anotacija

Baigiamojo darbo tikslas – išnagrinėti balso perdavimo IP tinklu specifiką, protokolus ir VoIP paslaugą aprašančius kokybinius parametrus. Sukurti eksperimentinę telefono sistemą, SIP technologijos pagrindu, globaliame interneto tinkle (Vilniaus mieste). Atlikti VoIP paslaugos kokybės tyrimus realizuotoje sistemoje.

Išnagrinėta SIP protokolo architektūra ir komponentai, nustatyti pagrindiniai reikalavimai interneto protokolo telefono sistemai, ir pagrindiniai veiksniai lemiantys balso kokybę. Suprojektuota eksperimentinė dešimties abonentų telefono sistema, SIP protokolo pagrindu. Atlikti balso kokybės vertinimo eksperimentai: subjektyvaus vertinimo eksperimentas ACR metodu, objektyvaus vertinimo eksperimentas, taikant PESQ algoritmą. Taip pat atliktas balso kokybės MOS įverčio prognozavimas, taikant telekomunikacinio tinklo „E-modelį“. Atliktas telefono sistemos kokybės stebėjimo eksperimentas, naudojant „Image Engine VQ Manager“ programinį paketą. Gautas balso kokybės priklausomybės nuo tinklo parametrų: paketų vėlinimo ir paketų praradimo įtakos. Atliktas kokybės vertinimo rezultatų ir vertinimo būdų palyginimas. Nustatyta, suprojektuotos VoIP telefonos sistemos, perduodamo balso kokybė.

Darbą sudaro 4 dalys: VoIP – balso perdavimas IP tinklu, VoIP paslaugos kokybė, VoIP telefono sistema, telefono sistemos tyrimas.

Darbo apimtis – 64 p. teksto be priedų, 40 iliustr., 28 lent., 21 bibliografiniai šaltiniai.

Atskirai pridedami preidai.

Prasminiai žodžiai: VoIP, IP telefonija, SIP, telefono sistema, sistemos tyrimas, perduodamo balso kokybė, MOS, ACR, PESQ.

Vilnius Gediminas Technical University
Faculty of **Electronics**
Department of **Telecommunications Engineering**

ISBN ISSN
No. of Copies 2
Date 2008 06 11

Language
☒ Lithuanian
☐ English

Master's Thesis of **Telecommunications engineering** study program

Title: VoIP Quality of Service Research

Author **Giedrius Urbonas**

Executive **Mgr. Darius Guršnys**

Anotacija

The purpose of the final work is to scrutinize the voice transfer through IP network particularity, protocols and quality parameters, that describes the VoIP service. To create experimental telephone system under SIP technology foundation, in global Internet network (Vilnius city). To perform VoIP service quality research in realized system.

Scrutinized SIP protocol architecture and components. Established main requirements to internet protocol system and main factors, that effects voice quality. Projected experimental, ten subscribers, telephone system under SIP protocol ground. The experiments of voice quality of projected telephone system are included into work: subjective evaluation experiment by ACR method, objective evaluation experiment using PESQ algorithm. Also voice quality MOS evaluation prognosis, using telecommunication network „E-model“. Accomplished telephone system quality track experiment, using „Engine VQ Manager“ programmable package. Received voice quality subordination from network parameters: packages lag and loss risk. Performed the comparison of quality evaluation result and evaluation methods. Determined the quality of voice transfer in projected system.

Structure 4 chapters: VoIP – Voice over IP network, VoIP Quality of Service, VoIP Telephone System, Telephone System Research.

Thesis consists of: 64 p. texts without extras, 40 pictures, 28 tables, 21 bibliographical entries.

Appendixes included.

Keywords: VoIP, IP telephony, SIP, telephone system, system research, quality of voice transfer, MOS, ACR, PESQ.

TURINYS

SANTRUMPOS	6
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS	7
LENTELIŲ SĄRAŠAS	8
IVADAS	10
1. VOIP – BALSO PERDAVIMAS IP TINKLU	11
1.1 IP protokolas	13
1.2 TCP/UDP protokolai	14
1.3 RTP/RTCP protokolai	16
1.4 VoIP protokolai	18
1.5 SIP protokolas	22
1.5.1 Tinklo architektūra	22
1.5.2 SIP komponentai	23
2. VOIP PASLAUGOS KOKYBĖ	25
2.1 Paslaugos kokybę lemiantys veiksniai	26
2.2 Paslaugos kokybės užtikrinimas	27
2.3. Objektyvaus ir subjektyvaus vertinimo modeliai	25
2.4 MOS	31
2.4.1 ACR metodas	32
2.4.2 DCR metodas	33
2.5 PESQ algoritmas	34
2.6 R koeficientas	36
2.7 VQ vertinimas	40
3. VOIP TELEFONO SISTEMA	42
3.1 Sistemos projektavimas – struktūrinė schema	43
3.2 Pralaidumo juostos skaičiavimas, balso perdavimui IP tinkle	44
3.3 IP tinklo būseną Vilniaus mieste	47
3.4 VoIP sistemos įranga	48
3.5 Sistemos veikimo principas	49
4. TELEFONO SISTEMOS TYRIMAS	51
4.1 Eksperimento aprašymas	51
4.2 Naudojamos pralaidumo juostos matavimas	53
4.2 Subjektyvaus vertinimo MOS eksperimentas	55

4.3 Objektyvaus vertinimo eksperimentas	58
4.4 R koeficiento skaičiavimas	61
4.5 VQ įvertis	68
4.6 Gautų rezultatų palyginimas	70
IŠVADOS	73
LITERATŪROS SĄRAŠAS	75
PRIEDAI	76

SANTRUMPOS

IP (angl. *Internet Protocol*) – interneto protokolas.

VOIP (angl. *Voice over Internet Protocol*) – balso perdavimas interneto protokolu.

TCP (angl. *Transmission Control Protocol*) – perdavimo kontrolės protokolas.

UDP (angl. *User Datagram Protocol*) – vartotojo duomenų protokolas.

RTP (angl. *Real-time Transfer Protocol*) – realaus laiko perdavimo protokolas.

RTCP (angl. *Real-time Transfer Control Protocol*) – realaus laiko perdavimo kontrolės protokolas.

SIP (angl. *Session Initiation Protocol*) – sesijos inicijavimo protokolas.

SDH (angl. *Synchronic Digital Hierarchy*) – sinchroninės skaitmeninės hierarchijos protokolas.

ATM (angl. *Asynchronous Transfer Mode*) – asinchroninio perdavimo protokolas.

PCM (angl. *Pulse Code Modulation*) – impulsinė kodinė moduliacija.

TOS (angl. *Type of Service*) – paslaugos tipas.

TTL (angl. *Time To Live*) – paketo buvimo IP duomenų perdavimo tinkle laikas.

RTT (angl. *Round Trip Time*) – paketo keliavimo pirmyn ir atgal laikas.

AF (angl. *Assured Forwarding*) – garantuoto perdavimo parametras.

EF (angl. *Expedited Forwarding*) – operatyvaus perdavimo parametras.

MOS (angl. *Mean Opinion Score*) – subjektyvių įvertinimų vidurkis.

PESQ (angl. *Perceptual Evaluation of Speech Quality*) – kalbos kokybės vertinimo algoritmas.

ITU (angl. *International Telecommunication Unijon*) – tarptautinė telekomunikacijų sąjunga.

ETSI (angl. *European Telecommunication Standart Institute*) – Europos telekomunikacijų standartų institutas.

IETF (angl. *Internet Engineering Task Force*) – telekomunikacinių tinklų projektuotojų, operatorių, teikėjų ir tyrinėtojų organizacija.

ACR (angl. *Absolute Category Rating*) – absoliučios nuomonės kategorijos algoritmas.

DCR (angl. *Degradation Category Rating*) – pablogėjimo kategorijos algoritmas.

MTU (angl. *Maximum Transmission Unit*) – maksimalus perdavimo vienetas.

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

- 1 pav. Duomenų perdavimas grandinių ir paketų komutavimo principu
- 1.1 pav. IP paketo struktūra
- 1.2 pav. TCP segmento struktūra
- 1.3 pav. UDP segmento struktūra
- 1.4 pav. RTP antraštės formatas
- 1.5 pav. VoIP protokolų blokas
- 1.6 pav. H.323 architektūra
- 1.7 pav. MGCP architektūra
- 1.8 pav. SIP tinklo architektūra
- 1.9 pav. UAC ir UAS komponentai
- 2.1 pav. Paketų vėlinimas IP tinkle
- 2.2 pav. TOS skiltis IP antraštėje
- 2.3 pav. Objektyvaus vertinimo schema
- 2.4 pav. PESQ vertinimo schema
- 2.5 pav. PESQ balso kokybės vertinimo modelis
- 2.6 pav. MOS priklausomybė nuo R
- 2.7 pav. „VQ Manager“ sistemos struktūra
- 2.8 pav. VoIP sistemos darbo stebėjimas
- 3.1 pav. VoIP telefono sistemos struktūrinė schema
- 3.2 pav. Balso paketo sandara
- 3.3 pav. SIP tinklo serveris
- 3.4 pav. Programinis telefonas
- 3.5 pav. Tipiškas skambutis internetu panaudojant SIP protokolą
- 4.1 pav. VoIP paslaugos kokybė QoS
- 4.2 pav. VoIP paslaugos kokybės eksperimento schema
- 4.3 pav. Srautas, sukuriamas naudojant skirtingus balso suspaudimo algoritmus
- 4.4 pav. Subjektyvaus vertinimo MOS įverčio priklausomybė nuo paketų vėlinimo
- 4.5 pav. Subjektyvaus vertinimo MOS įverčio priklausomybė nuo paketų praradimo
- 4.6 pav. PESQ programa
- 4.7 pav. MOS įverčio priklausomybė nuo paketų vėlinimo pagal PESQ algoritmą
- 4.8 pav. MOS įverčio priklausomybė nuo paketų praradimo pagal PESQ algoritmą
- 4.9 pav. MOS ACR ir MOS PESQ palyginimas

- 4.10 pav. Koeficiento I_d priklausomybė nuo vėlinimo
- 4.11 pav. Prognozuojamo MOS įverčio priklausomybė nuo paketų vėlinimo pagal E-modelį
- 4.12 pav. Prognozuojamo MOS įverčio priklausomybė nuo paketų praradimo pagal E-modelį
- 4.13 pav. MOS E-model ir MOS ACR palyginimas
- 4.14 pav. VQ MOS įverčio priklausomybė nuo paketų vėlinimo
- 4.15 pav. VQ MOS įverčio priklausomybė nuo paketų praradimo
- 4.16 pav. MOS įverčio priklausomybių nuo paketų vėlinimo palyginimas
- 4.17 pav. MOS įverčio priklausomybių nuo paketų praradimo palyginimas

LENTELIŲ SĄRAŠAS

- 1 lentelė. SIP žinutės formatas
- 2 lentelė. SIP atsakymo žinutės būsenos
- 3 lentelė. Rekomenduojami tinklo parametrai
- 4 lentelė. Vėlinimo įtaka balso kokybei
- 5 lentelė. Paslaugų klasių parametrai
- 6 lentelė. Srautų klasės
- 7 lentelė. Vertinimo būdai
- 8 lentelė. MOS įvertinimų reikšmės
- 9 lentelė. Suprantamumo vertinimo reikšmės
- 10 lentelė. Kalbos garsumo vertinimo reikšmės
- 11 lentelė. Degrdacijos vertinimo reikšmės
- 12 lentelė. CCR metodo vertinimo reikšmės
- 13 lentelė. Aplinkybių koeficiento A reikšmės
- 14 lentelė. Balso perdavimo kokybės ir koeficiento R ryšys
- 15 lentelė. Balso glaudinimo algoritmai
- 16 lentelė. Pralaidumo juosta, reikalinga balso perdavimui
- 17 lentelė. Pralaidumo juostos matavimai
- 18 lentelė. Naudojamos pralaidumo juostos matavimai
- 19 lentelė. Galimos ir naudojamos pralaidumo juostos matavimai
- 20 lentelė. Eksperimento MOS įvertinimų reikšmės
- 21 lentelė. Subjektyvaus vertinimo eksperimento MOS rezultatai
- 22 lentelė. Eksperimento MOS rezultatai
- 23 lentelė. MOS PESQ rezultatai

24 lentelė. I_d – koeficiento reikšmės

25 lentelė. I_e – koeficiento reikšmės

26 lentelė. MOS prognozavimas

27 lentelė. VQ MOS reikšmės

28 lentelė. VoIP paslaugos kokybė

IVADAS

Tradicinė telefono linija jau dabar gali būti laikoma praėjusio amžiaus ryšiu. Telefono aparato ateitis siejama su duomenų perdavimo tinklais. Balso perdavimo technologija, taikoma interneto protokolo tinkluose, turi nusistovėjusį pavadinimą VoIP (angl. *Voice over IP*), dar vadinama internetine telefonija (IP telefonija). Šios technologijos atsiradimas stipriai pastūmėjo duomenų ir balso perdavimo tinklų integraciją. IP telefonija padeda susumažinti išlaidas telefoniniams pokalbiams, nes diegiama esamuose duomenų perdavimo tinkluose (nereikia kurti naujo telekomunikacinio tinklo). 1999 metais IETF organizacija sukūrė SIP protokolą. Tai vienas iš populiariausių telefoninės signalizacijos protokolų, naudojamų balso perdavimui IP tinklu.

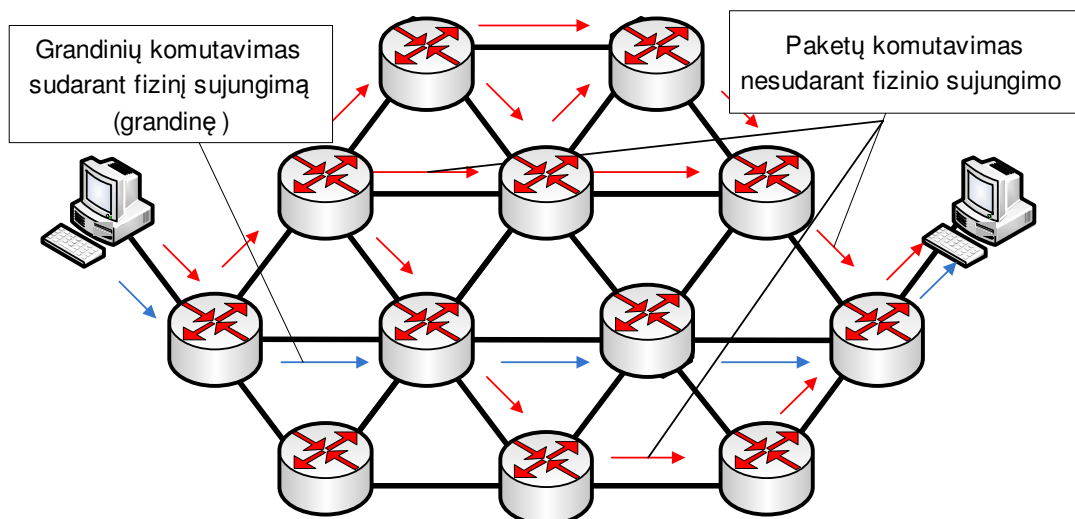
Panaudojant VoIP technologiją, telekomunikacijų rinkai galima paliūlyti pigesnes, nei tradicinės telefonijos, balso perdavimo paslaugas. Tačiau pagrindinė problema yra paslaugos kokybė, nes balso perdavimo kokybė IP tinkluose negarantuota. IP tinklais perduodamo balso kokybė žymia dalimi priklauso nuo IP tinklo našumo ir į jį patenkančio informacijos srauto intensyvumo. Duomenų perdavimo tinkluose atlikti testavimo darbai rodo, kad apie 85% tinklų netenkina balso perdavimui keliamų reikalavimų [18].

Šiame darbe nagrinėjama balso perdavimo IP tinklu specifika, taip pat apžvelgiamos priemonės balso perdavimo kokybei užtikrinti. Aptariami VoIP paslaugos kokybės vertinimo būdai, parametrai ir priežastys, lemiančios paslaugų kokybę. Sukurta eksperimentinė telefono sistema, SIP protokolo pagrindu, viešojo interneto tinkle (Vilniaus mieste). Atliktas, sukurtos VoIP sistemos, paslaugos kokybės vertinimo tyrimas. Darbo tikslas – nustatyti VoIP paslaugų, per viešojo interneto tinklą, kokybę ir priklausomybę nuo IP tinklo parametrų.

1. VOIP – BALSO PERDAVIMAS IP TINKLU

IP tinklas – tai labiausiai pasaulyje paplitęs duomenų perdavimo tinklas, pagrįstas paketų komutavimu. Pagrindinis skirtumas tarp IP tinklo ir tradicinių telefonijos tinklų (PSTN, ISDN) yra skirtingi komutavimo būdai. Tradiciniuose telefono tinkluose naudojamas grandinių komutavimo principas, kuomet sudaromas fizinis „taškas – taškas“ sujungimas, tarp dviejų galinių įrenginių. Tarsi sudaroma fizinė grandinė tarp ryši palaikančių galinių įrenginių. Ši grandinė komutuojama atskirose komutavimo stotyse ir tiesiogiai skiriama galiniams įrenginiams. PSTN (angl. *Public Switched Telephone Network*) tinkle balso perdavimui naudojama 64 Kbit/s pralaidumo juosta. Analoginėmis vytos poros telefono linijomis balsas perduodamas 300 Hz – 3,4 KHz dažnių juostos elektriniais signalais. ISDN (angl. *Integrated Services Digital Network*) – skaitmeniniame visuminių paslaugų tinkle naudojamos skaitmeninės linijos, kur pagrindinę greičio sąsają sudaro: du 64 Kbit/s vartotojo kanalai ir vienas 16 Kbit/s signalizacijos kanalas.

Paketingo komutavimo atveju konkrečiam vartotojui nėra reikalo išskirti atskirą ir nuolatinį ryšio kanalą. Vartotojo siunčiamai informacijai perduoti gali prireikti siauros, plačios arba kintamo pločio dažnių juostos, todėl sudaromas loginis galinių taškų sujungimas. Tinkle nesudarant fizinio sujungimo, perduodami duomenų paketai visada pasirenka tinkamiausią maršrutą. Kiekvienas paketas turi visą informaciją apie galinį adresą, todėl tinklo mazgai nukreipia paketus adresatui pagal iš anksto numatytą maršrutizavimo protokolą.



1 pav. Duomenų perdavimas grandinių ir paketų komutavimo principu

Paketinis komutavimas geriau išnaudoja žemesnės kokybės ryšio kanalą. Perdavimo metu ryšio kanale atsiradusios klaidos yra koreguojamos persiuntimo stotyse, retransliuojant paketus. Paketų pakartotinis perdavimas sąlygoja papildomą informacijos vėlinimą. Paketinės komutacijos atveju, jei adresatą aptarnaujantys kanalai užimti, informacijos paketai kaupiami buferyje ir praėjus tam tikram laikui gali būti sunaikinami.

Dėl informacijos perdavimo vėlinimo, packetinis komutavimas ribotai gali būti naudojamas garso ar vaizdo informacijai perduoti, kuri labai jautri signalų užlaikymui, tačiau šis komutacijos būdas puikiai tinka įvairių tipų duomenims perduoti. Informacijos vėlinimo problema sėkmingai sprendžiama suteikiant vartotojui būtiną perdavimo spartą.

Balso perdavimas internetu vyksta keliais etapais. Pirmas etapas – tai balso konvertavimas į skaitmeninį pavidalą. Po to konvertuoti duomenys analizuojami ir apdorojami, norint sumažinti fizinį kiekį, perduodamų gavėjui, duomenų. Šiame etape šalinamos nereikalingos pauzės ir foniniai triukšmai, taip pat atliekama kompresija. Kitame etape duomenys skaidomi į paketus, prie kurių pridedama protokolinė informacija – gavėjo adresas, paketo eilės numeris tam atvejui, jei paketai būtų persiųsti nepaeiliui, ir papildomi duomenys klaidų korekcijai. Maršruto parinkimo įrenginiai paketų protokolinę informaciją naudoja tam, kad paketas būtų nusiųstas reikiamam gavėjui. Maršruto parinktuvai turi lenteles, kurios nurodo, kaip paskirstyti paketus. Pasikeitus tinklo įrenginiams, maršruto parinkimo įrenginiai atnaujina savo lentelių informaciją.

Duomenų kompresija leidžia vienu metu interneto kanalu perduoti keletą pokalbių (skirtingai nuo tradicinės telefonijos, kur vieno pokalbio perdavimui išnaudojamas visas kanalas), dėl to sumažėja tarp miestinių ir tarptautinių pokalbių kainos lyginant su tradicine telefonija.

Perduotos balsinės informacijos išgavimas iš gautų paketų taip pat vyksta keliais etapais. Kai balsiniai paketai priimami gavėjo pusėje, pirmiausiai tikrinamas jų eiliškumas. Kadangi IP tinklai negarantuoja persiuntimo laiko, paketai su didesniu eiliškumo numeriu gali atkeliauti anksčiau, be to priėmimo laiko intervalas taip pat gali svyruoti. Eiliškumui atstatyti ir sinchronizacijai vyksta laikinas paketų kaupimas. Kai kurie paketai gali būti prarasti persiuntimo metu, nes jų persiuntimo užlaikymas viršija nustatytą trukmę. Tokiais atvejais gavėjo terminalas užklausia pakartotino klaidingų ar prarastų duomenų persiuntimo. Perduodant balsą yra naudojami aproksimacijos algoritmai, gautų paketų pagrindu apytiksliai atstatantys prarastus paketus, arba tiesiog juos ignoruoja. Dėl to perdavimo metu atsiranda nežymūs balso iškraipymai. Be to paketai keliauja per maršruto parinktuvus, ir visa tai lemia, kad pokalbio metu atsiranda nedideli užlaikymai [2].

1.1 IP PROTOKOLAS

IP protokolas, kurį aprašo RFC791 rekomendacija [6], skirtas duomenų perdavimui paketinio komutavimo tinkluose, tai TCP/IP protokolų rinkinio maršruto nustatymo sluoksnis. IP protokolas yra tinklinio lygmens pagal OSI tinklo modelį. Pagrindinė protokolo paskirtis apjungti įvairius tinklus, kurie sudaro globalųjį internetą. IP protokolo funkcijos yra tokios:

- Pagrindinis perdavimo vienetas.
- Adresavimas.
- Maršruto parinkimas.
- Aukštesnių lygmenų protokolų duomenų fragmentavimas.

Maksimalus IP paketo dydis (angl. *MTU – maximum transfer unit*) gali siekti 1500 baitų, iš kurių 20 baitų skiriama paketo antraštei. IP paketo struktūra pavaizduota 1.1 paveiklėse.

Versija 4	Antraštės ilgis (4)	Prioritetas ir paslaugos tipas (8)	Paketo apimtis (16)	
Identifikavimas (16)			Vėlevėlė (3)	Fragmentų kiekis (13)
Gyvavimo laikas, tranzitų kiekis (8)		Protokolas (8)	Kontrolinė suma (16)	
Šaltinio IP adresas (32)				
Paskirties vietos IP adresas (32)				
Opcijos (nuo 0 iki 32)				
Duomenys (kintamo ilgio)				

1.1 pav. IP paketo struktūra

IP paketo antraštės laukų paskirtys yra tokios:

Versija – versijos numeris (4 bitai).

Antraštės ilgis – antraštės ilgis 32 bitų žodžiais (4 bitai).

Prioritetas ir paslaugos tipas (angl. *TOS – Type of Service*) – nurodo kaip paketas turi būti apdorotas.

Paketo apimtis – paketo antraštės ir duomenų ilgis (16 bitų).

Identifikavimas – unikali IP paketo reikšmė (paketų numeracija, 16 bitų).

Vėlevėlė – fragmentavimo požymis (3 bitai).

Fragmentų kiekis – atliekamas duomenų fragmentavimas naudojant skirtingus maksimalius perduodamų duomenų blokų ilgį (MTU) internete (13 bitų).

Gyvavimo laikas (angl. *TTL – time to live*) – galimas tranzitų kiekis (8 bitai).

Protokolas – aukštesniojo lygmens (4 lygmens – transporto) protokolo tipas (8 bitai).

Kontrolinė suma – paketo antraštės kontrolė (16 bitų).

Šaltinio adresas – 32 bitų šaltinio IP adresas (32 bitai)

Paskirties vietos adresas – 32 bitų gavėjo IP adresas (32 bitai).

IP opcijos – tinklo testavimo, derinimo, apsaugos, protokolų, maršrutizatorių ir kt. papildomi tarnybiniai duomenys arba užpildymas (nuo 0 iki 32 bitų).

Duomenys – aukštesniojo lygmens duomenys (kintamo ilgio).

TOS skiltis nusako paslaugos kokybę, balso paketams gali būti suteikiama pirmenybė prieš duomenų paketus sumažėjus telekomunikacinio tinklo mazgo pralaidumui. TTL skiltyje nurodoma trukmė, kurią paketas gali būti tinkle. Jei šioje skiltyje pasirodo 0, tai paketas privalo būti sunaikintas. Protokolo skiltyje nurodomas kitas protokolas, esantis IP pakete (pvz., UDP protokolas). Tikrinimo žymė (kontrolinė suma) garantuoja paketo sudarymo nepertraukiamumą, nes kaikurios IP antraštės dalys gali keistis (pvz., TTL vertė).

1.2 TCP/UDP PROTOKOLAI

TCP (angl. *Transmission Control Protocol*) – tai vienas iš pagrindinių protokolų, esančių internetinių protokolų rinkinyje (angl. *Internet protocol suite*). TCP [7] yra tarpinis lygis tarp IP ir taikomųjų programų. Jis priklauso transportavimo lygmeniui, pagal OSI tinklo modelį. TCP protokolas informacinius pranešimus dalija į segmentus ir siunčia gavėjui, o gavėjo taške juos vėl atstato į vientisą pranešimą. Protokolas atsakingas už patikimą duomenų perdavimą tarp dviejų įrenginių. Siunčiant duomenis sudaromas virtualus sujungimas. Jei kuris nors paketas buvo prarastas, siuntimo metu, atliekamas pakartotinis jo persiuntimas. Prieš sudarant sujungimą, abu sujungime dalyvaujantys įrenginiai turi vienas kitą sinchronizuoti pradiniais eiliškumo numeriais (angl. *Initial Sequence Number*). Sinchronizacija atliekama apsiikeičiant sujungimo sudarymo segmentais, kuriuose perduodamas valdymo bitas, vadinamas SYN (sinchronizacija) ir pradiniai eiliškumo numeriai. Taip pat naudojamas pradinių eiliškumo numerių surinkimo ir apsiikeitimo patvirtinimo mechanizmas. Sinchronizacijos proceso eigoje kiekviena pusė pasiunčia savo pradinius eiliškumo numerius ir priima jų patvirtinimą pranešimu ACK. Šis apsiikeitimas vadinamas trijų taktų suderinimu. Toks suderinimas yra būtinas, kadangi eiliškumo numeriai nėra sinchronizuoti su globaliu tinklo sinchronizacijos šaltiniu. Eiliškumo ir patvirtinimo numeriai TCP segmentams nustato perdavimo seką, kuriai turi būti gauti patvirtinimai. Prieš išsiunčiant kiekvienas duomenų segmentas yra sunumeruojamas. Jeigu eiliškumo numeris yra klaidingas, tuomet tas segmentas yra persiunčiamas. Segmentai kurie nebuvo patvirtinti per užduotą laiko periodą taip pat persiunčiami. TCP segmento struktūra pavaizduotas 1.2 paveikle.

Šaltinio prievadas (16)			Paskirties vietos prievadas (16)
Eilės numeris (32)			
Patvirtinimo numeris (32)			
Antraštės dydis (4)	Rezervas (6)	Kodiniai bitai (16)	Langas (16)
Kontrolinė suma (16)			Svarbos indikacija (16)
Opcijos (0 arba 32)			
Duomenys (kintami)			

1.2 pav. TCP segmento struktūra

Iš viso TCP segmento antraštės dydis užima 20 baitų lauką. TCP antraštės laukų reikšmės:

Šaltinio prievadas – kviečiančiojo prievado numeris (16 bitų).

Paskirties vietos prievadas – kviečiamojo prievado numeris (16 bitų).

Eilės numeris – naudojams norint patikrinti ar priimta teisinga duomenų seka (32 bitų).

Patvirtinimo numeris – nustatyti sekančio laukiamo TCP objekto (32 bitų).

Antraštės dydis – 32 bitų antraštės žodžių kiekis (4 bitų).

Rezervas – eilė nulių (6 bitų).

Kodiniai bitai – kontroliuoja sesijos sudarymo ir nutraukimo funkcijas (16 bitų).

Kontrolinė suma – suskaičiuota antraštės ir duomenų lauko kontrolinė suma (16 bitų).

Svarbos indikacija – nurodo svarbių duomenų pabaigą (16 bitų).

Opcijos – gali talpinti informaciją apie maksimalų TCP segmento dydį (0 arba 32 bitų).

Duomenys – aukštesnio lygmens protokolo duomenys

TCP protokolas yra orientuoto sujungimo protokolas, užtikrinantis patikimą duomenų perdavimą tarp dviejų tinklo taškų. Signalizacijos ir kontrolės signalų siuntimui reikalingas patikimas ryšys, nes jie privalo būti nusiųsti būtent ten, kur reikia ir tokia tvarka, kokia reikia, ir negali būti prarasti, todėl internetinės telefonijos signalizacija perduodama TCP segmentais.

UDP protokolas [8] yra neorientuotų sujungimų protokolas, nenaudojantis jokių patvirtinimo procedūrų ir atsakingas tik už pranešimų siuntimą. Šis protokolas negarantuoja perduodamų paketų eiliškumo, klaidų taisymo, perduodamų paketų srauto kontrolės, tačiau taip sumažinamas duomenų paketų buvimo laikas tinkle. Balso duomenų srautai turi būti kuo mažiau suvėlinti, todėl jų perdavimui naudojamas UDP protokolas. UDP segmento struktūra pavaizduota 1.3 paveikle.

Šaltinio prievadas (16)	Paskirties taško prievadas (16)
Paketo ilgis (16)	Kontrolinė suma (16)
Duomenys (kintamas)	

1.3 pav. UDP segmento struktūra

UDP antraštės ilgis visada yra 8 baitų. Antraštės laukų paskirtys tokios:

Šaltinio prievadas – kviečiančiojo prievado numeris (16 bitų).

Paskirties taško prievadas – kviečiamojo prievado numeris (16 bitų).

Paketo ilgis – UDP antraštės ir duomenų ilgis (16 bitų).

Kontrolinė suma – suskaičiuota kontrolinė antraštės ir duomenų lauko suma (16 bitų).

Duomenys – aukštesniojo lygmens protokolų duomenys (kintamas dydis).

Kiekviena UDP antraštė turi ir siuntėjo, ir gavėjo prievado identifikatorius. Jie skirti aukštesnio lygmens protokolams, kad galėtų nukreipti paslaugas skirtingiems servisams. Siuntėjo prievadas - tai opcija. Tuo atveju, jei naudojama, parodo siuntimo proceso prievadą ir gali būti tuo prievadu, kuriam atsakymas turėtų būti adresuotas, kai trūksta reikiamos informacijos. Tuo atveju, jei nenaudojama, į laukelį įrašomas 0. Gavėjo prievadas reikalingas tik tada, kai yra tam tikras interneto gavėjo adresas.

UDP protokolas nenaudoja nei langų nei priimtų duomenų patvirtinimo mechanizmų ir negarantuoja patikimo duomenų perdavimo. Tik taikomųjų lygmenų protokolai gali užtikrinti patikimumą, UDP sukurtas tokioms taikomosioms programoms, kurios turi savo klaidų pašalinimo mechanizmus. UDP protokolo atveju, patikimumas aukojamas duomenų perdavimo spartos labui.

1.3 RTP/RTCP PROTOKOLAI

Norit užtikrinti tinkamą realaus laiko duomenų perdavimą UDP protokolu, naudojami į šio protokolo sudėtį įeinatys RTP/RTCP protokolai. RTP tai realaus laiko transporto protokolas, kuris atsakingas už duomenų su realaus laiko charakteristikomis perdavimą, tarp dviejų galinių įrenginių. Protokolas atlieka paslaugos tipo identifikavimo, paketų eiliškumo nustatymo ir sinchronizacijos intervalų nustatymo funkcijas. Tačiau jis pats neturi jokio mechanizmo, užtikrinančio duomenų perdavimą be klaidų, ar vykdančio kokias nors kitas kokybės kontrolės funkcijas. RTP protokolą aprašo RFC 1889 rekomendacija [9].

IP telefonijoje perduodamas balsas yra duomenys su realaus laiko charakteristikomis, taigi prieš išsiunčiant, prie tam tikros trukmės balso paketo pridedama RTP antraštė, kurioje yra paketo eilės numeris, duomenų tipas, ir kita tarnybinė informacija. Priimančiame galiniame įrenginyje atkuriamas paketų eiliškumas, pašalinamos paketų kopijos, sinchronizuojamas balsas, vaizdas, duomenys ir

galiausiai informacija pateikiama vartotojui nepaisant kintančio vėlinimo. RTP antraštės formatas pavaizduotas 1.4 paveiksle.

IP antraštė	IP adresas						
UDP antraštė	Siuntėjo prievadas					Gavėjo prievadas	
	Paketo ilgis					Kontrolinė suma	
RTP antraštė	V=2	P	X	CC	M	PT	Sekos numeris
	Sinchronizacijos intervalas						
	SSRC						
	CSRC						
	Duomenys						

1.4 pav. RTP antraštės formatas

Iš viso RTP antraštė užima 12 baitų. RTP laukų reikšmės:

V – RTP versija. Naujausia versija – 2 (2 bitų).

P – Nurodo ar RTP pakete naudojami užpildymo baitai (1 bitas).

X– Nurodo ar RTP pakete naudojama papildoma antraštė (1 bitas).

CC (angl. *contributor count*) – Nurodo papildomų CSRC antraščių kiekį RTP pakete (4 bitų).

M – Nurodo, kad galimi stiprūs srauto pakeitimai (pvz. Spartos apribojimas) (1 bitas).

PT (angl. *payload type*) – Nurodo perdušamos informacijos formatą (7 bitų).

Sekos numeris (angl. *sequence number*) – Nurodo RTP paketo numerį (16 bitų)..

Sinchronizacijos intervalas (angl., *timestamp*) – Naudojamas įrenginių sinchronizacijai ir vėlinimo kitimo (angl. *Jitter*) nustatymui (32 bitų).

SSRC – Naudojamas atskirti ir sinchronizuoti skirtingus informacijos šaltinius (32 bitų).

CSRC sąrašas – 0-15 žymeklių. Nurodo perdušamos informacijos šaltinius (32 bitų).

Norint pradėti informacijos perdavimą, naudojant RTP srautą, reikia nurodyti adresato adresą (sąsajos adresą ir du prievadus – vieną RTP, kitą RTCP srautui).

RTCP yra balso, vaizdo duomenų paketų perdavimo kontrolės protokolas. RTCP paketai yra periodiškai siunčiami kaip sudedamoji RTP paketo dalis. RTCP protokolą aprašo RFC1889 ir RFC 1890 rekomendacijos [10]. Jis atlieka informacijos pateikimą galinei įrangai ir vartotojui. Pagrindinės funkcijos yra:

– Informacijos apie perdavimo kokybę pristatymas. RTCP vartotojui praneša, kiek paketų buvo išsiųsta, prarasta, vidutinę vėlinimo reikšmę ir kitus tinklo parametrus. Tai leidžia keisti perdavimo parametrus atsižvelgiant į tinklo būklę.

– Identifikuoti RTP šaltinius. Šia funkcija galima tarpusavyje sinchronizuoti kelis RTP srautus (pvz. garso ir vaizdo).

– Riboja RTCP spartą. Norint neperkrauti tinklo tarnybine informacija, RTCP riboja savo srautą iki 5% RTP srauto.

– Perteikti mažiausią seanso informaciją. RTCP gali pernešti vartotojo duomenis, pranešti, kad vartotojas baigė konferenciją ir panašiai.

RTCP paketai nuolat siunčiami RTP seanso metų visiems jame dalyvaujantiems įrenginiams, kaip RTP paketo dalis. Grįžtamasis ryšys užtikrina nuolatinį prisitaikymą prie kintančios telekomunikacinio tinklo būklės.

1.4 VOIP PROTOKOLAI

IP tinkluose paketų perdavimui nereikalinga signalizacija, tačiau telefonijos taikymas reikalauja signalizacijos IP tinkle. Signalizacijos paskirtis yra nustatyti sąveikos kriterijus, būtinus sujungimo sudarymui ir išardymui. Prieš perduodant vartotojo naudingą informaciją (pvz., balsą arba vaizdą) turi būti nustatyti sujungimo parametrai:

- kodavimo mechanizmas balso ir vaizdo informacijai;
- transporto adresai, naudojami perduodant balso informaciją (IP adresas, transporto protokolą, prievado (angl. *port*) numeris);
- pralaidumo juostos poreikis;
- tinkamas autorizavimas sujungimo iniciatoriui ir priėmėjui;
- sujungimo perleidimas, skambučio nukreipimas;
- kviečiamo abonentų vietos nustatymas ir t.t.

Diegiant balso perdavimo technologiją esamame duomenų perdavimo tinkle, galima naudoti vieną arba kelis signalizacijos (sujungimo sudarymo ir valdymo) protokolus:

H.323 – ITU-T organizacijos sukurtas protokolą.

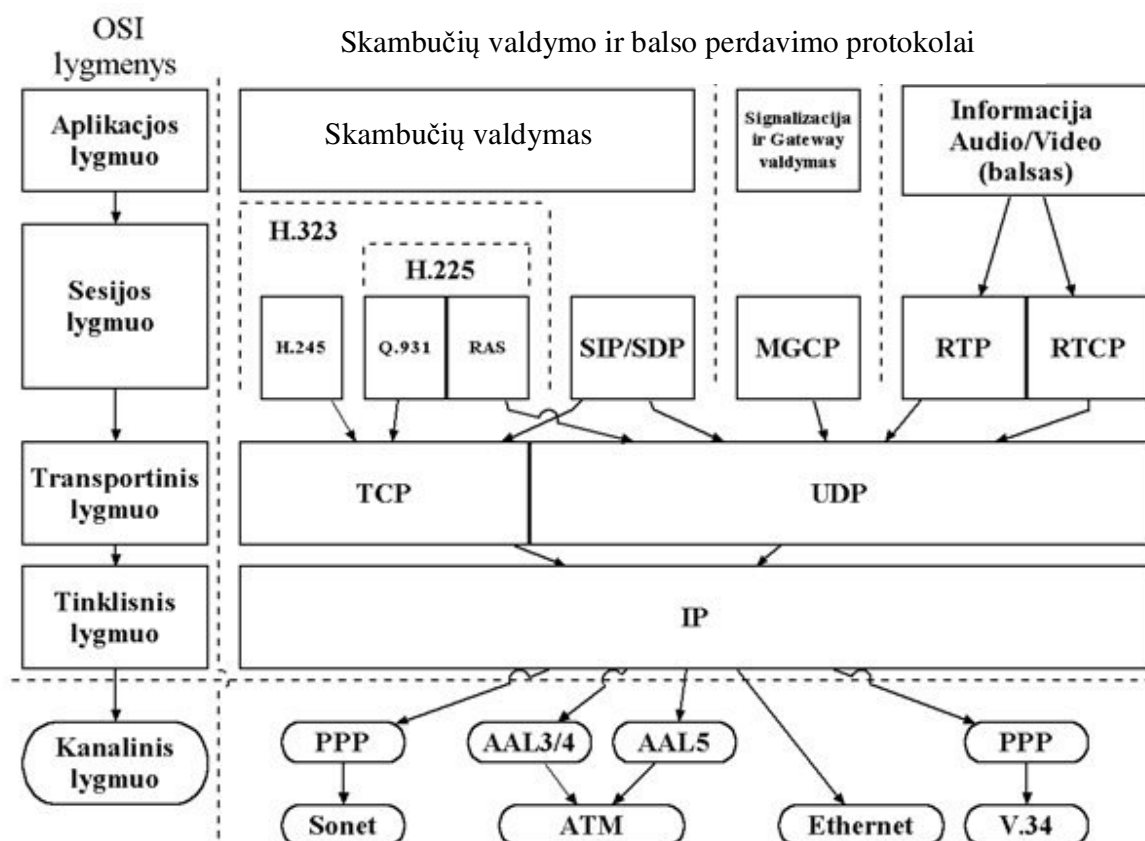
SIP (angl. Session Initiation Protocol) – IETF organizacijos sukurtas protokolą.

MGCP (angl. Media Gateway Control Protocol) – IETF ir ITU-T sukurtas protokolą.

SCCP (angl. Skinny Client Control Protocol) – uždaras kompanijos „Cisco“ protokolą.

MiNET – uždaras kompanijos „Mitel“ protokolą.

IAX (angl. Inter-Asterisk eXchange) – atviro kodo telefonijos projekto protokolą.



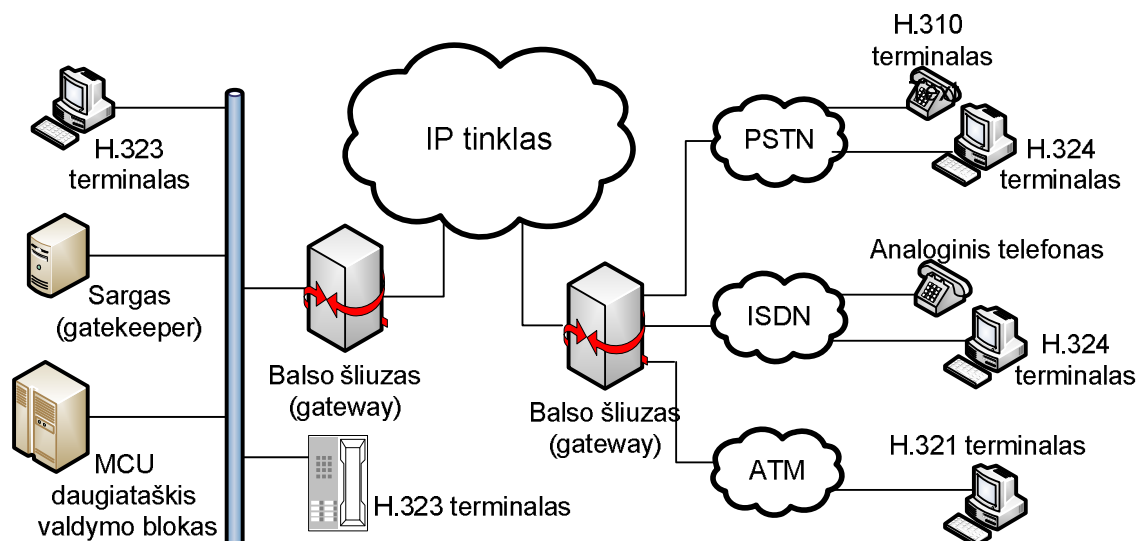
1.5 pav. VoIP protokolų blokas

Pagal OSI tinklo modelį, VoIP signalizacijos protokolai yra sesijos lygmens. Signalizacija perduodama TCP segmentais, nes jai reikalingas patikimas duomenų perdavimas, o balso paketai perduodami UDP ir RTP/RTCP srautais, stengiantis sumažinti paketų buvimo laiką tinkle.

H.323, MGCP, SIP – labiausiai pasaulyje paplitę, plačiausiai naudojami, VoIP protokolai, todėl juos apžvelgsime sekančiuose skyreliuose.

H.323 protokolas

Tai ITU-T organizacijos standartas apimantis komponentus, protokolus ir procedūras, skirtus teikti realaus laiko vaizdo, garso ir duomenų perdavimo paslaugas paketinio komutavimo tinklais. H.32x šeimos rekomendacija [3] aprašo multimedijos perdavimą įvairiais tinklais, H.324 per PSTN, H.321 ir H.310 per plačiajuostį visuminių paslaugų skaitmeninį tinklą ISDN, H.323 per LAN su garantuota paslaugos kokybe. Pagrindinis H.323 protokolo tikslas sąveika tarp skirtingų multimedijos pernašos tinklų. Ši sąveika galima naudojant tarptinklinius suderintuvus – balso šliuzus (angl. *gateway*). Suderintuvas atlieka perėjimą nuo vieno tinklo prie kito. H.323 protokolas gali teikti tiek taškas – taškas sujungimus, tiek taškas – daug taškų.



1.6 pav. H.323 architektūra

H.323 protokolo architektūroje naudojami keturių tipų komponentai. Visiems keturiems komponentams tinkle tenka skirtingi vaidmenys, nors kai kurių jų, pavyzdžiui, sargų galima ir atsisakyti, visi gali būti įrengti vienoje sistemoje arba išsklaidyti keliuose sistemose, esančiose skirtingose fizinėse, geografinėse vietose.

Terminalu arba klientu yra vadinamas komponentas, padedantis užmegzti pokalbį. Tai arčiausiai vartotojo esantis galinis įrenginys, kuris kartu su kitais VoIP terminalais atsako už dvipusį balso, vaizdo arba duomenų ryšį realiu laiku. Su įvairiomis VoIP sąsajomis jis susijungia per savo vidinį sargą.

Sargas (angl. *gatekeepers*) tai atskiras įrenginys arba programinė įranga, tačiau jis gali būti integruotas į balso šliuzą ar MCU (daugiataškis valdymo blokas). Atlieka kvietimų kontrolę visiems jame priregistruotiems galiniams įrenginiams.

Balso šliuzas (angl. *gateways*) tai sąsaja tarp IP ir kitų telekomunikacinių tinklų. Jame atliekamas signalizacijos ir informacijos perdavimo formato keitimas.

Daugiataškis valdymo blokas (angl. *MCU - multipoint Control Units*) tai įrenginys valdantis konferencinį ryšį tarp trijų ir daugiau galinių įrenginių. MCU atliekamas skirtingų H.323 įrenginių suderinimas, pagal H.245 signalizacijos protokolą.

Valdymo posistemė (H.245, H.225 (Q.931), RAS) užtikrina H.323 įrenginio signalizacijos funkcijas. H.245 signalizacija atlieka H.323 įrenginių sujungimo valdymo funkcijas: loginių kanalų sudarymas ir išardymas, balso kodavimo algoritmo parinkimas. H.225 – skambučio signalizacijos protokolas atlieka skambučio inicijavimo, pokalbio užbaigimo funkcijas. RAS protokolu nustatomos

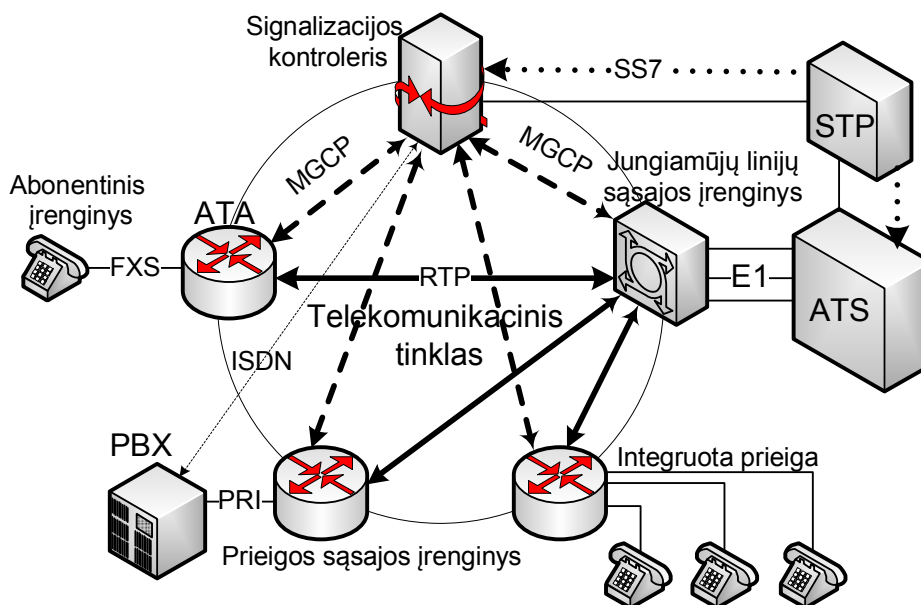
informacijos mainų tarp H.323 įrenginio ir telefonijos komutatoriaus procedūros (prisijungimo registravimas, kanalo pralaidumo keitimo, sujungimo būsenos nustatymo procedūros).

MGCP protokolas

Protokolo sukūrimo istorija prasidėjo nuo SGCP, sukurto „Belcore“, „Cisco“ kompanijų, ir IPDC, „Level 3“ kompanijos, kurie vėliau buvo apjungti į vieną protokolą MGCP. Tolimesnė MGCP protokolo evoliucija privedė prie MEGACO (IETF) ir H.248 (ITU-T) protokolų sukūrimo. Tai grupė tarpusavyje panašių protokolų: SGCP (angl. *Simple Gateway Control Protocol*), IPDC (angl. *IP Device Control*), MGCP (angl. *Media Gateway control protocol*), MEGACO, H.248.

Tai vidinis protokolas, naudojamas paskirstytose sistemose. Protokolo architektūros pagrindiniai komponentai yra: skambučio agentai (angl. *Call Agents*), terpių sąsajos (angl. *Media Gateway*), signalizacijos sąsajos (angl. *Signalling Gateway*). Skambučio agentas tai galinis sistemos įrenginys. Terpių sąsaja atsakinga už duomenų konvertavimą tarp grandinių ir paketų komutavimo tinklų. Signalizacijos sąsaja atsakinga už SS7 signalizaciją, kai sistema prijungta prie PSTN tinklo.

MGCP protokolo tinklo architektūroje tarp tinklo komponentų signalizacija perduodama žinutėmis. Yra dviejų tipų žinutės užklausos ir atsakymai, po kiekvienos užklausos žinutės seka atsakymo žinutė. Kiekviena žinutė turi savo tranzito identifikatorių. Užklausų žinutės prasideda keturių raidžių žodžiu, o atsakymų žinutės – trijų skaitmenų atsakymo kodu. Signalizacijos žinutės perdavinėjamos UDP paketais. Sudarius sujungimą naudingų duomenų srautas perduodamas RTP duomenų srautu.



1.7 pav. MGCP architektūra

Protokolas skirtas kontroliuoti ir valdyti terpių sąsajas, kontrolierius, telefonines sąsajas. Tai įvairios sąsajos ir įrenginiai tinklo elementai jungiantys grandinių komutavimo ir paketų komutavimo tinklus. MGCP protokolas kontroliuoja ir valdo skambučius ir jų perdavimą tarp tinklo komponentų, kai skambutis išeina už pagrindinių vartų ribų. MGCP protokolas atlieka sujungimo sudarymo, išardymo ir valdymo su kitu tinklo komponentu funkciją (signalizacija). MGCP protokolas įdomus tuo, kad jo komponentai elgiasi kaip programiniai perjungėjai VoIP tinkle. Jie atlieka garso duomenų kodavimo, dekodavimo ir perdavimo funkcijas [1].

1.5 SIP PROTOKOLAS

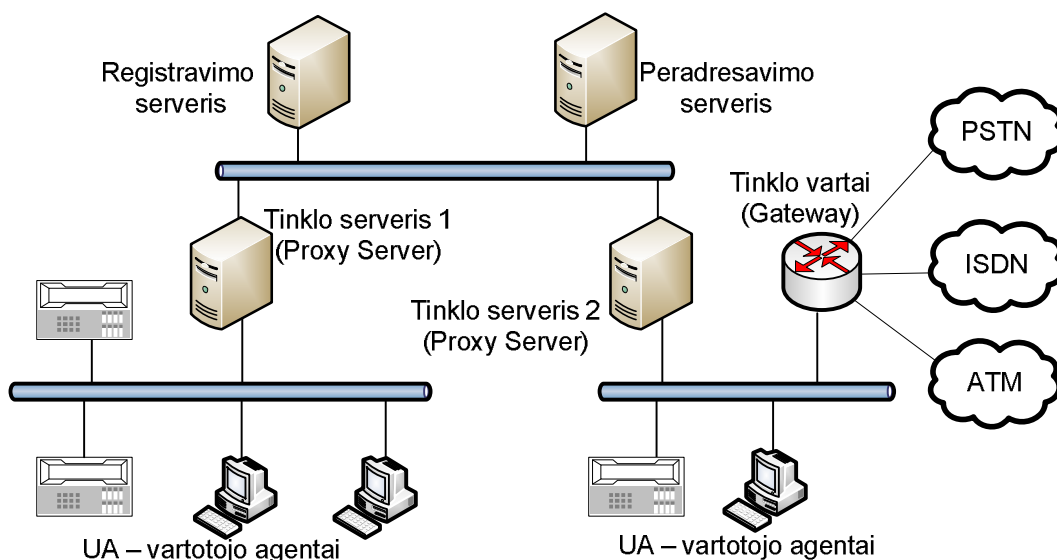
SIP (angl. *Session initiation protocol*) – tai IETF standartas balso ir multimedijos perdavimui internetu. Signalizacijos protokolas, skirtas pradėti, valdyti ir užbaigti sesijas IP tinkluose, nustato reikiamo galinio taško vietą, leidžia galiniams įrenginiams susitarti dėl srauto parametrų, sudaryti ryšio seansą tarp skambutį inicijuojančio ir priimančio galinio taško [3].

SIP protokolo architektūra panaši į HTTP protokolo architektūrą, nes jis buvo kuriamas pagal žinomas HTTP ir SMTP specifikacijas. Tai klientas – serveris protokolas, kurio darbas pagrįstas užklausomis ir atsakymais. SIP leidžia naudoti loginį adresavimą, naudojant TCP ir UDP protokolus.

1.5.1 TINKLO ARCHITEKTŪRA

Vartotojo agentai (angl. *User Agents*) ir tinklo serveriai (angl. *Proxy Servers*) yra pagrindiniai SIP protokolo architektūros komponentai. Vartotojo agentas yra tinklo pabaigos elementas, veikiantis vartotojo vardu, kuris sukuria ir priima SIP skambučius, atsakingas už balsinės informacijos apsikeitimą tarp galinių įrenginių. Dažniausiai vartotojo agentas yra programinis telefonas, įdiegiamas į vartotojo kompiuterį, bet gali būti ir skaitmeninis ar mobilusis telefonas palaikantis SIP protokolą. SIP tinklo serveriai tai elementai, kurie atsakingi už VoIP tinklo tarnybinės informacijos valdymą, vartotojų registravimą, autorizavimą ir vietos nustatymą. Kai kuriais atvejais tinklo serverių galima atsisakyti, jei VoIP sistema diegiama lokalaus tinklo ribose. Jei diegiama tinkluose, kuriuose naudojama NAT technologija, tinklo serveriai – būtini VoIP sistemos elementai. Pagal funkcijas SIP serveriai skirstomi į tris grupes.

SIP tinklo serveris (angl. *Proxy server*) – yra tarpinė grandis, priimanti SIP užklausas iš siuntėjų ir persiunčianti jas gavėjams. SIP serveris gali suteikti tokias funkcijas kaip: autentifikavimas, autorizavimas, tinklo prieigos valdymas (angl. *network access control*), maršrutizavimas, patikimas užklaustos retransliavimas, apsauga.



1.8 pav. SIP tinklo architektūra

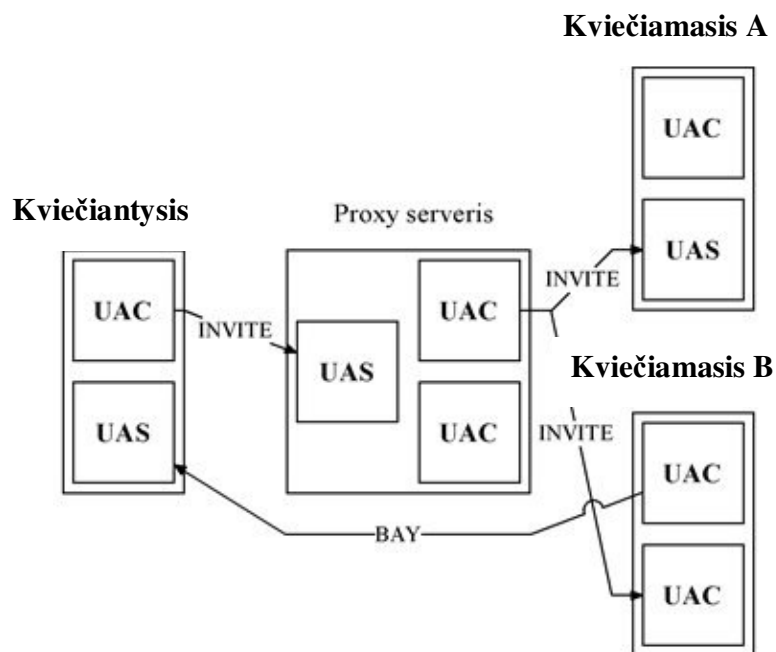
Peradresavimo serveris (angl. *Redirect server*) – suteikia informaciją tinklo serveriui apie sekantį „šuoį“ ar „šuočius“, kur pranešimas privalo būti persiųstas.

Registravimo serveris (angl. *Registrar server*) – apdoroja vartotojų užklausas, vartotojų buvimo vietai užregistruoti. Registravimo serveris dažnai būna talpinamas kartu su „proxy“ arba peradresavimo serveriu.

1.5.1 SIP KOMPONENTAI

Kėkvienas SIP tinklo komponentas sudarytas iš dviejų dalių: UAC dalis, vadinama vartoto agento klientu (angl. *User Agent Client*) ir UAS dalis, vadinama vartotojo agento serveriu (angl. *User Agent Server*). UAC – inicijuoja SIP užklausas ir siunčia jas SIP serveriui. UAS – priima ir atsako SIP užklausoms (žiūreti 1.9 paveikėlą). Tinklo serveryje gali būti dvi ir daugiau UAC dalių, kurios persiunčia priimtos užklausos kopiją tolesniam UAS.

SIP yra tekstinis (angl. *text-based*) protokolas, kuris naudoja ISO 10646 standartą ir UTF-8 kodavimą, kurį aprašo RFC2279 [19]. Tinklo serveriai ir galiniai įrenginiai tarpusavyje bendrauja SIP žinutėmis, kurios atlieka telefoninės signalizacijos funkciją – sujungimų sudarymą, valdymą ir nutraukimą. Daug žinučių sintaksės elementų ir antraščių laukų yra identiški HTTP/1.1 protokolui, bet SIP nėra HTTP išplėtimas. Skirtingai nei HTTP, SIP galima naudoti ir UDP protokolą tarnybinės informacijos perdavimui. Kai žinučių siuntimui naudojamas TCP ar UDP protokolas, daugialypės SIP transakcijos gali būti perduodamos vienu TCP sujungimu arba viena UDP duomenų grama. UDP duomenų gramos, įskaitant visas antraštes, neturėtų būti didesnės nei maksimalus perdavimo vienetas MTU.



1.9 pav. UAC ir UAS komponentai

SIP žinutės gali būti dviejų tipų: žinutės užklausa ir žinutės atsakymai. Užklausa ir atsakymo žinutės naudoja bendrąjį žinutės formatą pateiktą RFC 822 rekomendacijoje [4].

1. lentelė. SIP žinutės formatas

Pradžios eilutė	Žinutės tipas: Užklausa – metodas Atsakymas – būsenos kodas
Antraštė	SIP versija Siuntėjo adresas Gavėjo adresas Turinio tipas Turinio ilgis
Tuščia eilutė	
Žinutės kūnas	Šifruotas SDP Nešifruotas SDP Audio informacija RTP parametrai

Užklausa žinutės gali būti įvairių metodų. Galimi metodų variantai:

INVITE – nurodo, kuris vartotojas ar paslauga yra kviečiami dalyvauti sesijoje.

ACK – patvirtina, kad kviečiamas įrenginys priėmė žinutę.

OPTIONS – prašo informacijos apie galimybes, bet nesudaro sujungimo.

BYE – naudoja vartotojo agento klientas, norėdamas nurodyti ryšyje dalyvaujantiems įrenginiams apie savo pageidavimą nutraukti sujungimą.

CANCEL – anuliuoja neužbaigtą užklausa, bet nepaveikia atliktų prieš tai užklauskų.

REGISTER – pateikia informaciją apie vartotojų padėtį SIP serveriui.

Atsakymo žinutėse vietoje metodų naudojami būsenos kodai, kurių pagalba žinute pranešamas atsakančiojo įrenginio statusas.

2 lentelė. SIP atsakymo žinutės būsenos

Informaciniai	Peradresavimo
100 Trying	300 Multiple Choices
180 Ringing	301 Moved Permanently
181 Call is Being Forwarded	302 Move Temporarily
182 Queued	303 See Other
Sutikimo	304 Use Proxy
200 OK	380 Alternative Service
Kliento klaida	411 Length Required
400 Bad Request	413 Request Message Body Too Large
401 Unauthorized	414 Request URI Too Large
402 Payment Required	415 Unsupported Media Type
403 Forbidden	420 Bad Extension
404 Not Found	480 Temporarily not Available
405 Method Not Allowed	481 Transaction Does not Exist
Serverio klaida	Globaliniai sutrikimai
500 Internal Server error	600 Busy Everywhere
501 Not Implemented	603 Decline
502 Bad Gateway	604 Does Not Exist Anywhere
503 Service Unavailable	606 Not acceptable
504 Gateway Timeout	
505 SIP Version not supported	

Būsenos kodas yra triženklis dešimtainis sveikasis skaičius, kuris parodo bandymo apdoroti ir įvykdyti užklausą rezultatą. Paaiškinimo frazė yra skirta pateikti trumpą tekstinę būsenos kodo aprašymą. Atsakymo žinučių būsenos kodai skirstomi į 6 klases, kurios kartu su būsenos kodais yra nurodytos 2 lentelėje.

2. VOIP PASLAUGOS KOKYBĖ

Besivystant technologijoms, IT paslaugų tiekėjai pateikia įvairių naujų paslaugų, tokių kaip VoIP – balso perdavimas IP tinklu. Tačiau paslaugų vartotojai tampa vis labiau išrankesni ir reiklesni. Vartotojas, užsakinėdamas telefonijos paslaugas, daug dėmesio skiria paslaugos kokybei. Kiekvienas tiekėjas, norėdamas išsilaikyti konkurencingoje rinkoje, stengiasi užtikrinti kuo aukštesnę teikiamų paslaugų kokybę. Literatūros, interneto šaltiniuose ar IT reklamoje galima sutikti teiginių, jog VoIP paslaugų kokybė nei kiek nenusileidžia, o kartais ir pranoksta tradicinių telefonijos paslaugų kokybę. Vis dėlto paslaugų tiekėjai pateikia labai mažai konkrečios informacijos, arba išvis nepateikia.

Tiekiant VoIP paslaugas susiduriama su problema: kaip užtikrinti ir kaip vertinti paslaugų kokybę? Šiame skyriuje aptariama kokiais būdais galima užtikrinti VoIP paslaugų kokybę, kokie

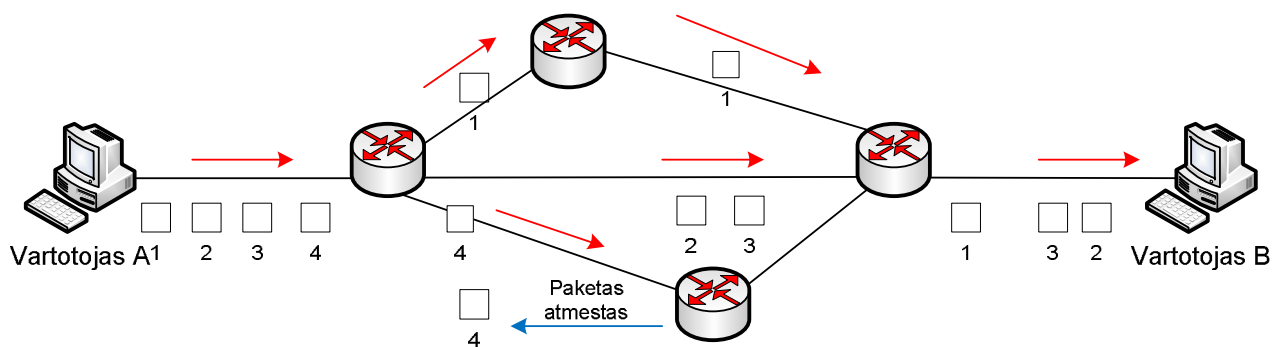
pagrindiniai parametrai lemia balso perdavimo IP tinklu kokybę, bei kokybės vertinimo metodikos ir būdai.

2.1 PASLAUGOS KOKYBĘ LEMIANTYS VEIKSNIAI

Skirtingai nei kitų technologijų tinkluose (ATM, FR, SDH), balsą perduodant IP tinklu nėra galimybės garantuoti paslaugos kokybę. Dėl IP tinklo specifikos ir tinklo parametrų pablogėjimo, galimas žymus balso perdavimo kokybės suprastėjimas. Pvz., esant apkrautam kokiam nors tinklo mazgui paketai kaupiami buferyje, dėl to jie yra suvėlinami. Pradėjus trūkti pralaidumo juostos, kai balso paketai dalinasi bendru pralaidumu su duomenų paketais, esant didelei apkrovai, gali atsirasti paketų praradimai. Dėl balso paketų praradimo, kalba iškarpoma, pasidaro nerišli, o dėl vėlinimo susidaro įspūdis, lyg pašnekovas pavėluotai reaguoja, lyg būtų kalbama palydovinio ryšio kanalu.

Pagrindiniai veiksniai lemiantys balso perdavimo IP tinklu kokybę yra šie:

- Pralaidumo juosta skirta balsui perduoti tarp dviejų tinklo mazgų.
- Paketų vėlinimas. Tai – laikas, per kurį, iš siuntimo taško, išsiųstas paketas pasiekia priėmimo tašką. Taip pat balso perdavimo atveju vėlinimas gali būti suprantamas ir kaip laikas, per kurį balsas iš kalbėtojo burnos pasiekia klausytojo ausį.
- Vėlinimo fliktuacijos (angl. *jitter*). Tai skirtumas tarp paketų vėlinimo. Pvz., jeigu vienas paketas buvo suvėlintas 50 ms, o kitas – 100 ms, tai vėlinimo kitimas bus 50 ms.
- Paketų praradimas. Tai – santykis tarp išsiųstų ir priimtų paketų.



2.1 pav. Paketų vėlinimas IP tinkle

Vartotojas – vartotojas vėlinimą lemia, balos kodavimas ir glaudinimas vartotojo įrangoje, bei informacijos srauto vėlinimas tinklo įrenginiuose, dėl fizinės perdavimo terpės, dėl protokolų naudojamų balsui perduoti, dėl buferių, kurie naudojami vėlinimo kitimo sumažinimui. Dėl vėlinimo gali atsirasti aidas, kai girdimas savas balsas.

Vėlinimo fliktuacijos tai skirtingas paketų vėlinimas, kai paketai tinkle keliauja skirtingais maršrutais ir tinklo mazguose užlaikomi skirtingą laiko tarpą. Neigiama vėlinimo fliktuacijų įtaka kompensuojama panaudojant buferius. Į galinio vartotojo įrangą atėję srauto paketai pirmiausia talpinami buferyje. Po to kiekvienas išimamas po vienodo laiko tarpo. Jei pasireiškia didelės vėlinimo fliktuacijos reikalingi dideli buferiai, bei ilgi laiko tarpai tarp išimamų iš buferio paketų, tai padidina vėlinimą. Jei buferis nedidelis išauga prarastų paketų skaičius.

Paketų praradimas reiškia, kad buvo prarasta tam tikra kalbos atkarpa. Augant prarastų paketų skaičiui kalba darosi „kapota“ ir trūkčiojanti. Paketų praradimas galimas tiek tinkle, nepatikimose perdavimo linijose, išgadinant paketus radio kanaluose, Ethernet tinkle įvykus kolizijoms, tiek vartotojo galinėje įrangoje dėl per mažo buferio. Kelių iš eilės einančių, paketų praradimas daro didesnę įtaką kokybei, nei prarasti paketai einantys ne iš eilės, nors prarastų paketų santykis abiem atvejais bus vienodas [2,3].

2.2 PASLAUGOS KOKYBĖS UŽTIKRINIMAS

Projektuojant telekomunikacines sistemas, būtina atsižvelgti į tinklo parametrus, lemiančius balso perdavimo paslaugos kokybę. Tačiau kyla klausimas, kokie tinklo parametrai turėtų būti, kad būtų užtikrinta paslaugos kokybė. Paslaugoms, naudojančioms naujas technologijas, visiškai ar iš dalies taikytini įprastų panašių paslaugų standartai (pvz., standartai, skirti subjektyviam vaizdo ir telefonijos paslaugų vertinimui). VoIP – balso perdavimo paslaugoms galima būtų taikyti ITU – T G.1010 rekomendaciją [11], kuri nurodo gaunamos paslaugos kokybės santykį su tinklo techniniais parametrais.

3 lentelė. Rekomenduojami tinklo parametrai

	Pralaidumo kryptis	Pralaidumo juosta, kbps	Vėlinimas	Vėlinimo fliktuacijos, ms	Informacijos praradimas, %
Balsas	Dvikryptis	4-64	<150 ms	<1	3
Balso žinutės	Vienkryptis	4-32	<1-2 s	<1	3
Aukštos kokybės audio srautas	Vienkryptis	16-128	<10 s	<1	1

Tačiau, subjektyviai vertinant balso perdavimo kokybę IP tinklais, paprastai apsiribojama dviem parametrais – paketų praradimu ir vėlinimu, nes šie parametrai yra telekomunikacinio tinklo projektavimo pasekmė. Taigi VoIP sistemos IP tinklo parametrai turėtų būti tokie:

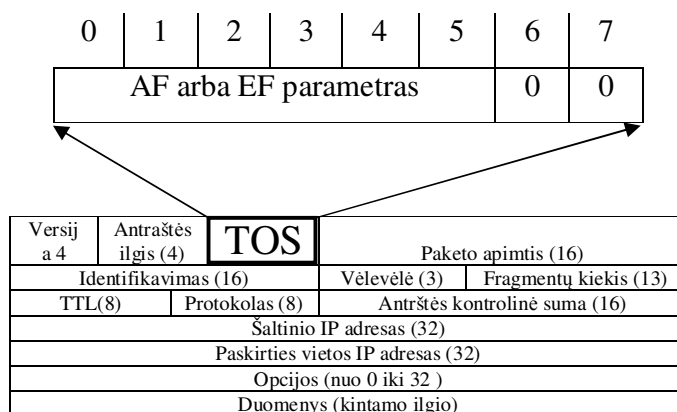
- Dvikryptis balso duomenų srautas 4 – 64 kbps (priklauso nuo balso suspaudimo algoritmo).
- Vėlinimas nedidesnis nei 150 ms.
- Informacijos praradimas nedidesnis nei 3 %.

4 lentelė. Vėlinimo įtaka balso kokybei

Vėlinimas, ms	Įtaka balso kokybei
0 – 25	Bendravimui nesukelia sunkumų.
25 – 150	Priimtinos vėlinimo ribos IP telefonijoje.
150 – 500	Vėlinimo ribos priimtinos palydovinio ryšio kanaluose.
Daugiau nei 500	Toks vėlinimas nepriimtinas, jo turi būti išvengta projektuojant tinklą.

Didėjant vėlinimui tinkle mažėja balso perdavimo kokybė. Nors IP tinkle nėra galimybės grantuoti paslaugos kokybę, tačiau IP telefonijoje yra priemonių, kuriomis galima sumažinti parametų, lemiančių balso perdavimo kokybę (vėlinimas ir informacijos praradimas), pablogėjimo tikimybę. Kaip buvo išsiaiškinta 1.1 skyrelyje, kiekvieno IP tinklo paketo antraštėje yra TOS (angl. *Type of Service*) skiltis, kurioje koduojamas paslaugos tipas – klasė. Iš viso yra keturios paslaugų klasės, o kiekvienoje iš jų – po tris grupes, kurios reiškia paketo svarbą: labai svarbūs (angl. *low drop precedence*), vidutinės svarbos (angl. *medium drop precedence*), mažos svarbos (angl. *high drop precedence*) paketai.

TOS skiltis – tai 8 bitų IP antraštės laukas, kuriame 6 bitai skirti paslaugos parametrai ir du bitai yra laisvi – rezervuoti, jų reikšmės visada 0. Kiekviename telekomunikacinio tinklo mazge, TOS skiltyje gali būti nustatomi parametrai AF (angl. *Assured Forwarding*) arba EF (angl. *Expedited Forwarding*).



2.2 pav. TOS skiltis IP antraštėje

AF parametras naudojamas klasės nustatymui. Klasės yra skirtingų prioritetų. 1 klasė (parametras AF 1x) – aukšto prioriteto (angl. *high priority*), o kitos – žemo prioriteto (angl. *low priority*). Balso srautams yra suteikiama aukšto prioriteto klasė.

5 lentelė Paslaugų klasių parametrai

Paketo svarba	1 klasė	2 klasė	3 klasė	4 klasė
Labai svarbūs	AF11 001010	AF21 010010	AF31 011010	AF41 100010
Vidutinės svarbos	AF12 001100	AF22 010100	AF32 011100	AF42 100100
Mažos svarbos	AF13 001110	AF23 010110	AF33 011110	AF43 100110

Esant per didelei apkrovai, telekomunikacinio tinklo mazge, pirmiausia bus pašalinami paketai, turintys, atitinkamai, mažiausią, vidutinį ir, galiausiai – aukštą prioritetą. Duomenų paketų perdavimo kokybė priklausytų nuo trijų dalykų:

- kiek resursų buvo priskirta AF klasei, kuriai priklauso perduodami paketai;
- kokia yra konkrečios klasės apkrova, perkrovos atveju;
- paketo svarbos.

6 lentelė. Srautų klasės

Srauto tipas	AF parametras
Balso srautas	AF 1x
Signalizacijos srautas	AF 2x
Duomenų srautas	AF 3x
Tinklo valdymas	AF 4x

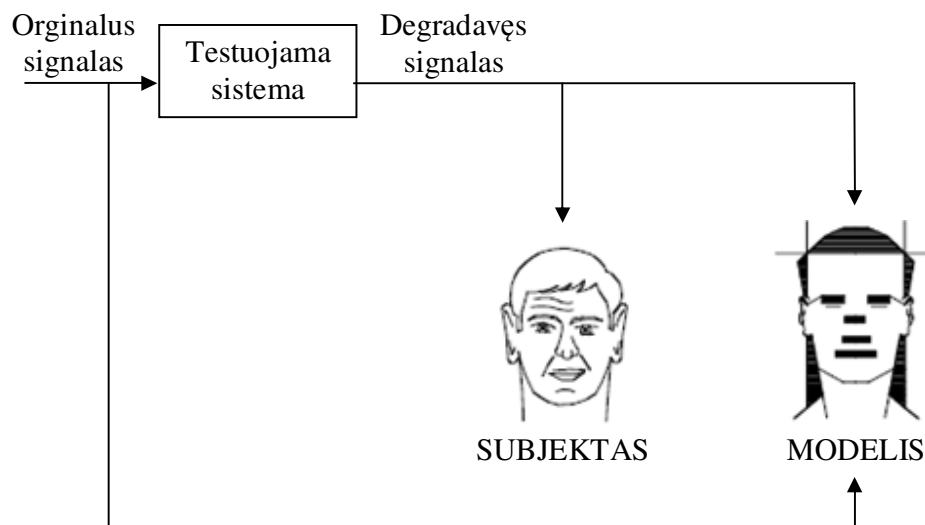
EF parametras užtikrina mažiausią paketų praradimą, vėlinimą (užlaikymą buferyje) ir vėlinimo fliuktuacijas. Rekomenduojama šio parametro vertė, pagal RFC 2474 rekomendaciją [12], - ‘101110’. Naudojant EF parametą, priešingai AF parametrui, negalėtų būti klasifikuojami skirtingų krypčių srautai, tačiau, pvz., balso srautui gali būti suteikiama pirmenybė. Duomenų paketų perdavimo kokybė priklausytų tik nuo to, kiek išteklių skirta srautams, pažymėtiems EF parametru, nes perkrovos atveju visiems srautams negalėtų būti priskiriamas vienodas prioritetas.

2.3 OBJEKTIVUS IR SUBJEKTIVUS BALSO KOKYBĖS VERTINIMAS

Balso kokybė gali būti suprantama skirtingai, ir kaip balso aiškumo, suprantamumo, suvokiamumo analizė ir vertinimas, ir kaip analoginio signalo charakteristikų analizė ir vertinimas. Tačiau balso kokybe vadinami kokybiniai ir kiekybiniai telefoninio pokalbio garso įrašo arba telefoninio pokalbio kokybės vertinimai. Balso perdavimo kokybei įvertinti naudojami įvairūs matematiniai ir imitaciniai modeliai. Vėlinimo svyravimas, absoliutus vėlinimas, pralaidumo juosta (priklausomai nuo balso suspaudimo algoritmo) – tai pagrindiniai telekomunikacinio tinklo parametrai

lemiantys balso kokybę. Dėl šių parametrų pablogėjimo, gali stipriai suprastėti perduodamo balso kokybė. Nesvarbu kokie reiškiniai turi įtakos balso kokybei, jos vertinimui yra naudojami objektyvūs ir subjektyvūs vertinimo metodai.

Objektyvus balso kokybės įvertinimas [13] ne visiškai atspindi balso perdavimo kokybę, nes įvertinimą įtakoja tik kalbos iškraipymai ir perdavimo trakto triukšmų įtaka kalbai. Tačiau garsumo sumažėjimas, vėlinimas, kalbos tono pakitimas, aidų įtaka lieka už objektyvaus vertinimo metodo ribų. 2.3 paveiksle pateikta funkcinė objektyvaus vertinimo schema.



2.3 pav. Objektyvaus vertinimo schema

Objektyvaus vertinimo esmė – originalus (neiškraipytas) balsas yra lyginamas su perdavimo trakte arba testuojamame įrenginyje iškraipytu balsu. Vertinimo eiga:

- originalus balsas testuojamame įrenginyje yra iškraipomas ir patenka į balso vertinimo modelį;
- taip pat neiškraipytas balsas tiesiogiai nukreipiamas į balso vertinimo modelį;
- apskaičiuojamas vėlinimas tarp originalaus ir iškraipyto signalo reikšmių;
- skaičiuojama koreliacija tarp originalaus ir iškraipyto signalo reikšmių;
- apskaičiuojama objektyvaus įvertinimo reikšmė, ji gali būti nuo 1 iki 4,5.

Kitaip nei objektyviais kokybės vertinimo metodais, subjektyviais [14, 15] – įvertinama daugelio faktorių įtaka: kalbos iškraipymai ir perdavimo trakto triukšmai, garsumo sumažėjimas, vėlinimas, kalbos tono pakitimas, aidų efektas. Subjektyvaus vertinimo rezultatas – subjektyvaus įvertinimo vidurkis MOS.

Subjektyvus įvertinimas gali būti atliktas keliais būdais: klausymosi testais ir pokalbių testais. Pirmuoju atveju vertinamas balso įrašas, o antruoju – pokalbio kokybė.

7 lentelė. Vertinimo būdai

Įvertinimas	Klausymosi testai	Pokalbio testai
Subjektyvus	MOS_{LQS}	MOS_{CQS}
Objektyvus	MOS_{LQO}	MOS_{CQO}
Prognozuojamas	MOS_{LQE}	MOS_{CQE}

MOS_{LQS} reikšmė gaunama atlikus klausymosi testus. Testuose dalyvauja N vertintojų, jų įvertinimai suvidurkinami ir taip gaunama MOS_{LQS} reikšmė.

MOS_{CQS} reikšmė gaunama atlikus pokalbių testus. Testuose dalyvauja N vertintojų, jų įvertinimai suvidurkinami ir taip gaunama MOS_{CQS} reikšmė.

MOS_{LQO} , MOS_{CQO} reikšmės apskaičiuojamos remiantis modeliu, aprašytu ITU-T P.862 rekomendacijoje [13].

MOS_{LQE} , MOS_{CQE} reikšmės apskaičiuojamos remiantis telekomunikacinio tinklo planavimo modeliu [16].

Vertinant garso įrašus, įvertinamas balso aiškumas, teksto suprantamumas, pašaliniai trikdžiai, aidas, garsumas.

2.4 MOS ĮVERTINIMAS

Vienas iš subjektyvių, perduodamo balso kokybės, vertinimo būdų yra – klausymosi testų atlikimas pagal MOS (angl. *mean opinion score*) skalę. Vidutinės nuomonės laipsnis – MOS išreiškiamas respondentų pasitenkinimo laipsniu. Surenkama grupė bandytojų, kurios nariai pareiškia savo nuomonę apie kokybę, esant tam tikriems sujungimo parametrų (vėlinimui, vėlinimo kitimui, paketų praradimams). Respondentai gali pareikšti savo nuomonę, MOS balais nuo 1 iki 5.

8 lentelė. MOS įvertinimų reikšmės

Balas	Įvertinimas
5	Puiki kokybė
4	Gera kokybė
3	Patenkinama kokybė
2	Bloga kokybė
1	Labai bloga kokybė

MOS vertinimo būdas buvo sukurtas, tuomet kai pasirodė balso kodavimo metodai ir algoritmai, naudojami balso perdavimui IP tinkluose. Balsas koduojamas, suspaudžiamas ir tada perduodamas tinklu, skaitmeniniu duomenų srautu. Dėl kodavimo – dekodavimo mechanizmo ir tinklo įtakos, balso signalas gali būti iškraipomas, todėl jis pats neneša jokios informacijos apie balso kokybę.

Taigi buvo sukurti klausymosi ir pokalbio testai, kuriuos aprašo ITU-T P.800 ir P.830 rekomendacijos [14,15]. Šių testų vertinimų rezultatas – taip vadinamas MOS įvertis. Rekomendacija P.800 aprašo metodus, kurie naudojami testams atlikti. MOS klausymosi (angl. *listening - only*) testams atlikti naudojamas ACR metodas (angl. *Absolute Category Rating*). Kai MOS įvertis išreiškiamas, suvidurkinus respondentų įvertinimus pagal penkiabalią sistemą (žiūrėti 8 lentelę). Dažnai naudojamas DCR metodas (angl. *Degradation Category Rating*), kur sistema su fiksuota kokybe, tiriama remiantis kokybės pablogėjimu – degradavimu. Atsitiktine tvarka išrinktas įvertinimas vadinamas DMOS įverčiu. Šis metodas labiausiai tinka, kai matuojamas kokybės kitimas yra mažas. DCR metodas puikiai tinka vertinti skaitmeninių balso kodavimo algoritmų įtaką kokybei.

2.4.1 ACR METODAS

ACR – tai absoliutus kategorijos reitingas (angl. *Absolute Category Rating*), pagal P.800 rekomendaciją, rekomenduojamas klausymosi testams atlikti. Testas atliekamas vertinat balso įrašus, kai balso signalas (pakites po perdavimo telekomunikacinėje sistemoje) įrašomas priėmėjo taške. Balso įrašo pavyzdys įrašomas tylioje 30 – 120 m³ dydžio patalpoje. Patalpos triuksmų lygis turi būti apie 30 dBA, be dominuojančių pikų signalo spektre. Siuntimo sistema gali būti pasirenkama bet kokia pagal P.48 rekomendaciją. Gavėjo taške naudojama aukštos kokybės įrašymo sistema gali būti:

- Sutartas dviejų takelių juostinis magnetofonas.
- Dviejų kanalų skaitmeninis audio procesorius su aukštos kokybės videomagnetofonu.
- Kompiuteris su graso įrašymo įranga.

Kalbos – balso signalo pavyzdys turėtų būti iš trumpų lengvai suprantamų sakinių (iš ne techninės literatūros, naujienų laikraščių). Įrašytas balso signalo pavyzdys perduodamas siuntimo sistema ir vėl įrašomas gavėjo pusėje.

Klausytojai – vertintojai pasirenkami atsitiktine tvarka, iš paprastų telefonijos vartotojų, taikant tokias salygas:

- Jie negali būti tiesiogiai susiję su darbu telefonijos ar balso kodavimo srityje.
- Jie negali būti dalyvavę jokiuose subjektyviuose testuose šešis mėnesius, ir jokiuose klausymosi testuose vienerius metus.

Respondentai balso įrašus vertina pagal penkių balų MOS vertinimo sistemą (žiūrėti 8 lentelę). Vertinant kreipiamas dėmesys į balso aiškumą, teksto suprantamumą, pašalinius trikdžius, aidą, garsumą. Klausymosi pastangų, kalbos supratimui, vertinimo skalė pateikta 9 lentelėje, o kalbos garsumo lygio su triukšmu vertinimo skalė 10 lentelėje.

9 lentelė. Suprantamumo vertinimo reikšmės

Balas	Įvertinimas
5	Visiškai atsipalaidaves, suprantama be pastangų
4	Reikia atkreipti dėmesį, reikalingos nežymios pastangos
3	Norint suprasti kalba reikia įdėti nemažai pastangų
2	Beveik nesuprantama kalba
1	Visiškai neįmanoma suprasti kas kalbama

10 lentelė. Kalbos garsumo vertinimo reikšmės

Balas	Įvertinimas
5	Žymiai garsesnis nei triukšmas
4	Garsesnis nei triukšmas
3	Beveik tokį pat kaip triukšmas
2	Tylesnis nei triukšmas
1	Žymiai tylesnis nei triukšmas

Prieš atliekant vertinimo eksperimentus, eksperimento dalyviui pateikiamos aiškios instrukcijos. Eksperimento metu jokios informacijos dalyviui suteikti negalima, kol eksperimentas nebus baigtas. Eksperimento rezultatas pateikiamas kaip MOS įvertis suvidurkinus, respondentų vertinimus.

2.4.2 DCR METODAS

ACR metodas naudojamas paslaugos kokybės matavimams, vertinant kokybę pagal MOS skalę. DCR (angl. *Degradation Category Rating*) – degradacijos kategorijos reitingas, tai modifikuotas ACR metodo variantas, naudojamas matuoti kokybės pablogėjimą – degradaciją. Šį metodą aprašo taip pat ITU-T P.800 rekomendacija, metodo esmė atlikti testus, vertinant paslaugos kokybės pablogėjimą penkių balų sistemoje, remiantis fiksuota paslaugos kokybe. Šis metodas puikiai tinka sistemų optimizavimo tyrimams atlikti, gali būti taikomas tiek klausymosi, tiek pokalbių testams atlikti.

Klausymosi testas aliekamas panašiai kaip ir ACR metodu, imami kalbos pavyzdžių įrašai ir lyginami su įrašais, įrašytais gavėjo pusėje, po perdavimo sistemoje. Kalbos pavyzdžių įrašai turėtų būti sudaromi iš mažiausiai keturių kalbėtojų kalbos, naudojant dviejų sakinių (S1,S2) kombinaciją. Naudojami trumpi lengvai suprantami sakiniai, atskiriami laiko tarpu (apie 0,5 sekundės). Kalbos įrašymas vykdomas tokia tvarka (įrašymo salygos tokios pat kaip ACR metodo):

- Kalbėtojas 1 skaito sakinius S1,S2;
- Kalbėtojas 2 skaito sakinius S1,S2;
- Kalbėtojas 3 skaito sakinius S1,S2;
- Kalbėtojas 4 skaito sakinius S1,S2;
- ... t.t.(Kalbetojų skaičius priklauso nuo eksperimento vykdytojo.)

Kalysoms testų dalyviams kalbos pavyzdžių įrašai pateikiami tokia tvarka A – B arba A – B – A – B, kur A – kalbos signalas įrašytas siuntėjo pusėje, o B – gavėjo pusėje. A – B atveju įrašai atskiriami 0,5 – 1 sekundės tylos tarpais, o A – B – A – B atveju tylos tarpai turėtų būti 1 – 1,5 sekundės. Vertintojai turėtų būti instruojami apie vertinimo skalę, kuri pateikta 11 lentelėje, prieš eksperimentą.

11 lentelė. Degradacijos vertinimo reikšmės

Balas	Įvertinimas
5	Degradacija nežymi
4	Degradacija nežymi, tačiau nereikia pastangų suprasti
3	Degradacija nežymi, tačiau reikalingos nedidelės pastangos suprasti
2	Žymi degradacija, reikia nemažai pastangų norint suprasti
1	Didelė degradacija, beveik neįmanoma suprasti kas kalbama

Vertinimo procedūra taikoma ACR metodu, kai vertinimo rezultatai vidurkinami, negali būti taikoma DCR metode. Čia imamas vienas rezultatas iš gautų atsitiktine tvarka (Pvz.: keturių kalbėtojų atveju bus gaunami aštuoni rezultatai). Toks įvertinimas vadinamas DMOS įverčiu.

Taip pat gali būti naudojamas labai panašus kokybės pablogėjimo vertinimo metodas CCR (angl. *Comparison Category Rating*). Lyginant du kalbos pavyzdžio įrašus (siuntėjo ir gavėjo), vertinama kiek pablogėjo kokybė.

12 lentelė. CCR metodo vertinimo reikšmės

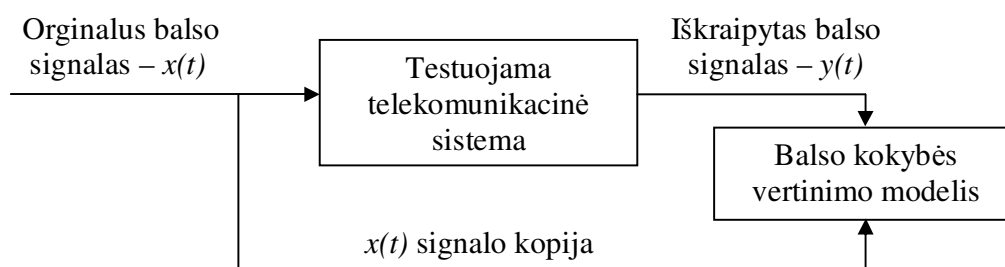
Balas	Įvertinimas
3	Žymiai geresnė
2	Geresnė
1	Šiek tiek geresnė
0	Beveik tokia pati
- 1	Šiek tiek blogesnė
- 2	Blogesnė
- 3	Žymiai blogesnė

Toks kokybės pablogėjimo vertinimo metodas leidžia nustatyti kuris, iš eksperimente naudojamų kalbos pavyzdžių įrašų, yra geriausios kokybės ir kiek geresnis vertinant balais (pagal sistemą 12 lentelėje). CCR metodas taikomas vietoj DCR, kai siuntėjo pusėje gaunami kalbos pavyzdžių įrašai sugadinti pašalinių trukšmų signalų. Toks kokybės pablogėjimo vertinimo rezultatas vadinamas CMOS įverčiu.

2.5 PESQ ALGORITMAS

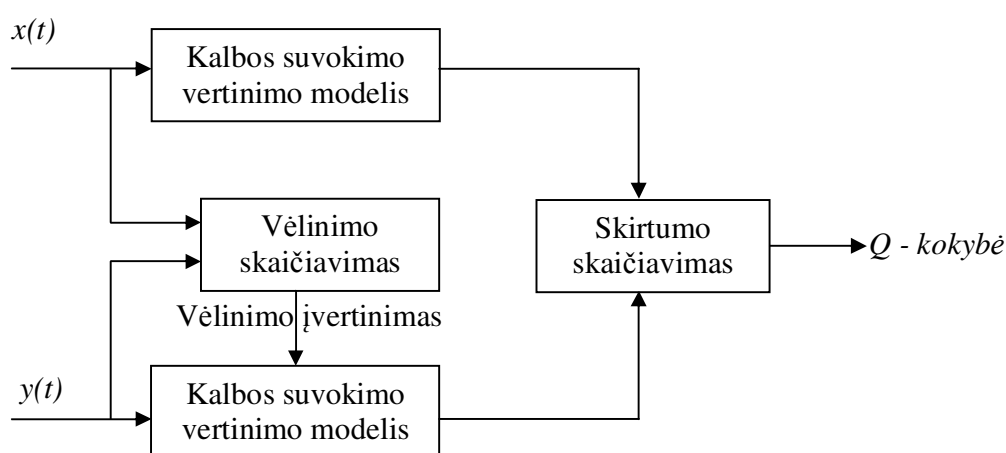
Subjektyvūs metodai naudingi tiriant naujų kodavimo ar perdavimo mechanizmų, įrenginių galimybes. Tačiau MOS įverčio matavimas labai priklauso nuo testų atlikimo sąlygų bei pačių respondentų, todėl kelių testų rezultatai gali būti skirtingi. Beto klausymosi testai yra brangūs ir

komplikuoti, reikalauja daug resursų. Objektiviūs būdai leidžia atlikti matavimus naudojant tą pačią yrangą, išlaikant tas pačias eksperimentų sąlygas. Yra sukurta eilė objektyvaus vertinimo algoritmų, dažniausiai iš jų naudojami PSQM (angl. *Perceptual Speech Quality Measure*) ir PESQ (angl. *Perceptual Evaluation of Speech Quality*) algoritmai, kurių rezultatas objektyvus MOS įverčio apskaičiavimas. PSQM algoritmas, kurį aprašo rekomendacija ITU-T P.861, buvo sukurtas balso kokybės kitimo vertinimui, naudojant skirtingus balso kodavimo ir suspaudimo algoritmus. PESQ algoritmas tai PSQM pakaitalas, kurį aprašo ITU-T P.862 rekomendacija [13]. Jis buvo sukurtas sukombinavus PSQM ir PAMS (angl. *Perceptual Analysis Measurement System*) algoritmus. Pagal PESQ, originalus balso signalas $x(t)$ lyginamas su perduota, degradavusia signalo versija $y(t)$ (žiūrėti 2.4 paveikslą).



2.4 pav. PESQ vertinimo schema

PESQ vertinimo rezultatas – priimto signalo $y(t)$ kokybė, kuri išreiškiama MOS skalėje ir gali būti labai panaši į kokybę, gautą vykdant subjektyvaus vertinimo klausymosi ar pokalbio testus (MOS ACR). Balso kokybės nustatymo modelio schema pavaizduota 2.5 paveiksle.



2.5 pav. PESQ balso kokybės vertinimo modelis

Teisingai atlikus eksperimentus, gaunama PESQ MOS reikšmė artima subjektyvaus vertimo MOS reikšmei. Skirtumas tarp PESQ MOS ir subjektyvaus vertinimo MOS rezultatų gali būti

nustatomas skaičiuojant koreliacijos koeficientą r . Koeficientas apskaičiuojamas pagal Pjersono (angl. *Pearson*) formulę:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.1)$$

Kur x_i – yra subjektyvaus MOS vertinimo i – rezultato reikšmė, $\bar{x}$ – MOS rezultatų vidurkis. O y_i – yra PESQ MOS vertinimo i – rezultato reikšmė, $\bar{y}$ – PESQ MOS rezultatų vidurkis.

Pagal ITU-T atliktus eksperimentus, 73,2% iš atliktų testų, skirtumas tarp PESQ MOS ir MOS yra 0,25 balo (5 – balų sistemoje), 91,1% iš atliktų testų skirtumas 0,5 balo. Vidutinis koreliacijos koeficientas – 0,935.

Balso signalų palyginimui naudojami kalbos įrašai. Dažniausiai naudojami 8 – 20 sekundžių trukmės kalbos įrašai, kur naudojama, keleto sakinių, atskirtų 1 – 3 sekundžių tylos tarpais, struktūra. Kalbos aktyvumo detektoriai gali užfiksuoti tylos intervalus nedidesnius nei 200 ms, taigi 40 – 80 % kalbos įrašo turi būti aktyvi kalba. Kalba įrašoma 8 arba 16 kHz dažniu naudojant 16 bitų PCM moduliaciją.

Pats PESQ algoritmas kompleksinis ir sudėtingas, todėl jo išsamiai nenagrinėsime, be to kartu su ITU-T P.862 rekomendacija pateikiamas blylų sąrašas – PESQ algoritmo programinis kodas:

- dsp.c *Basic DSP routines*
- dsp.h *Header file for dsp.c*
- pesq.h *General header file*
- pesqdsp.c *PESQ DSP routines*
- pesqio.c *File input/output*
- pesqmain.c *Main program*
- pesqmod.c *PESQ high-level model*
- pesqpar.h *PESQ perceptual model definitions*

Rekomendaciją ir programinį kodą galima atsisiųsti internetu (internetu nuoroda pateikta literatūros sąrašė [21]). Bylos pateiktos „C“ programavimo kalba, kurias atitinkamai sukompiliavus gaunama programa, leidžianti atlikti balso kokybės nustatymo eksperimentus pagal PESQ algoritmą.

2.6 R KOEFICIENTAS

Projektuojant telekomunikacines balso perdavimo sistemas, galima prognozuoti balso perdavimo kokybės MOS įvertį, taikant telekomunikacinio tinklo planavimo modelį – E-modelį. Tai modelis skirtas telekomunikacinio tinklo planavimui, siekiant kuo aukštesnės, balso perdavimo tarp galinių

tinklo įrenginių, kokybės. E – modelis yra aprašytas ITU – T G.107 rekomendacijoje [16]. Šis modelis nėra naujas kokybės įvertinimo būdas, jo panaudojimas leidžia prognozuoti projektuojamo tinklo paslaugos kokybę, remiantis telekomunikacinio tinklo perdavimo parametrais. Pagal tinklo parametrus apskaičiuota balso perdavimo kokybė išreiškiama R koeficientu. Kuris apskaičiuojamas taip:

$$R = R_o - I_s - I_d - I_e + A \quad (2.2)$$

R_o – signalas/triukšmas santykio koeficientas. I_s – koeficientas, įvertinantis balso kokybės pablogėjimą dėl nepakankamo garsumo lygio, dėl aplinkos triukšmo lygio, dėl kvantavimo triukšmų. I_d – koeficientas, įvertinantis balso kokybės pablogėjimą dėl vėlinimo ir aido efekto. I_e – koeficientas, įvertinantis balso kokybės pablogėjimą dėl paketų praradimo. A – aplinkybių koeficientas įvertinantis kokybės pablogėjimą, nesusijusį su aukščiau išvardintais parametrais. A koeficiento reikšmės pateiktos 13 lentelėje.

13 lentelė. Aplinkybių koeficiento A reikšmės

Ryšio sistemos pavyzdys	Didžiausia koeficiento A reikšmė
Kabeliniai tinklai	0
Judrusis ryšys patalpose	5
Mobilieji tinklai	10
Prieiga prie sunkiai pasiekiamų vietovių, pvz., palydovinis ryšys	20

R_o koeficientas

R_o koeficientas apskaičiuojamas pagal tokia formulę:

$$R_o = 15 - 1.5(SLR + N_o) \quad (2.3)$$

N_o – įvairių šaltinių sukuriamas triukšmų lygis.

SLR – garsumo lygis siuntimo pusėje (pagal nutylėjimą 8 dB).

I_s koeficientas

I_s – koeficientas apskaičiuojamas pagal tokia formulę:

$$I_s = I_{olr} + I_{st} + I_q \quad (2.4)$$

Kur I_{olr} – nepakankamo garsumo lygis. I_{st} – aplinkos triukšmo lygis. I_q – kvantavimo triukšmų įtakos koeficientas.

I_d koeficientas

Koeficientą I_d sudaro trys dėmenys:

$$I_d = I_{dte} + I_{dle} + I_{dd} \quad (2.5)$$

I_{dte} ir I_{dle} įvertina balso kokybės pablogėjimą dėl aido efekto, atitinkamai – siuntėjančioje ir priimančioje pusėje. I_{dd} – įvertina iškraipymus galinčius atsirasti dėl per daug didelio absoliutaus vėlinimo T_a .

$$I_{dte} = \left[\frac{Roe - Re}{2} + \sqrt{\frac{(Roe - Re)^2}{4} + 100} - 1 \right] (1 - e^{-T}) \quad (2.6)$$

$$Roe = -1.5(No - RLR) \quad (2.7)$$

$$Re = 80 + 2.5(TERV - 14) \quad (2.8)$$

$$TERV = TELR - 40 \lg \frac{1 + \frac{T}{10}}{1 + \frac{T}{150}} + 6e^{-0.3T^2} \quad (2.9)$$

TELR – aido lygis, pagal nutylėjimą 65 dB, T – vienpusis vėlinimas.

$$Idle = \frac{Ro - Rle}{2} + \sqrt{\frac{(Ro - Rle)^2}{4} + 169} \quad (2.10)$$

$$Rle = 10.5(WEPL + 7)(Tr + 1)^{-0.25} \quad (2.11)$$

WEPL – aido slopinimas, pagal nutylėjimą 110 dB.

$$I_{dd} = 0, \text{ kai } T_a < 100 \text{ ms}$$

$$I_{dd} = 25 \left\{ \left(1 + X^6 \right)^{\frac{1}{6}} - 3 \left(1 + \left[\frac{X}{3} \right]^6 \right)^{\frac{1}{6}} + 2 \right\}, \text{ kai } T_a > 100 \text{ ms} \quad (2.12)$$

$$X = \frac{\lg \left(\frac{T_a}{100} \right)}{\lg 2} \quad (2.13)$$

IP telefonijos tinkluose vėlinimo, vėlinimo kitimo įtakos sumažinimui, paketų eiliškumo korekcijai yra naudojami buferiai, todėl kokybės pablogėjimo koeficientas I_{dd} , dėl per daug didelio absoliutaus vėlinimo T_a , gali būti neįvertinamas.

I_e koeficientas

I_e – koeficiento, įvertinančio balso kokybės pablogėjimą dėl paketų praradimom reikšmės parenkamos pagal ITU-T G.113 rekomendaciją [17].

R koeficientas

E – modelio taikymo principą, balso kokybės vertinimui, galima apibūdinti taip:

- skaičiuojamas perdavimo kokybės koeficientas R;
- apskaičiuojamas MOS įvertis.

Taigi žinant kokybės perdavimo koeficientą R, galima apskaičiuoti MOS įvertį. Ryšį tarp R koeficiento ir vartotojų pasitenkinimo lygio apibūdina ITU-T G.107 rekomendacija [16] (žiureti 2.6 paveikslą ir 14 lentelę). MOS reikšmės apskaičiuojamos pagal tokia formulę:

$$\text{MOS} = 1, \text{ kai } R < 0$$

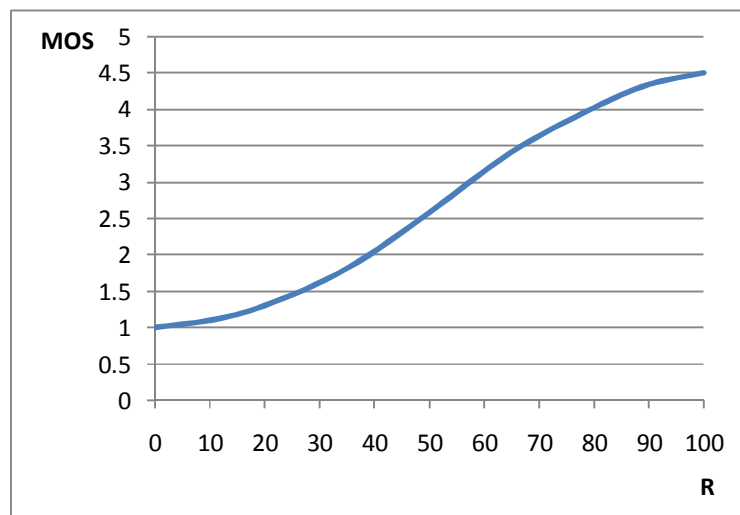
$$\text{MOS} = 1 + 0.035R + R(R - 60)(100 - R)^{-6}, \text{ kai } 0 < R < 100 \quad (2.14)$$

$$\text{MOS} = 4,5, \text{ kai } R > 100$$

Pagal šią išraišką MOS vertės yra tarp 1 ir 4,5: $1 < \text{MOS} < 4,5$. 11 paveiksle pateikta MOS įverčio priklausomybė nuo perdavimo koeficiento R.

14 lentelė. Balso perdavimo kokybės ir koeficiento R ryšys

R koeficiento reikšmė	MOS įverčio reikšmė	Vartotojo pasitenkinimas
100 – 90	4,50 – 4,34	Labai gera kokybė
90 – 80	4,34 – 4,02	Gera kokybė
80 – 65	4,02 – 3,36	Vidutinė kokybė
65 – 50	3,36 – 2,58	Patenkinama kokybė
<50	< 2,58	Bloga kokybė



2.6 pav. MOS priklausomybė nuo R

MOS priklausomybė nuo perdavimo kokybės koeficiento yra apibūdinama 14 lentelėje pateiktais duomenimis. Tačiau būtina pabrėžti, kad gaunamos MOS reikšmės, taikant E-modelį, nėra tokios pat kaip gaunamos, atliekant subjektyvaus vertinimo testus. E-modelio taikymas tai MOS įverčio prognozavimas, kuris gali būti artimas subjektyvaus vertinimo MOS įverčiui.

2.7 VQ ĮVERTINIMAS

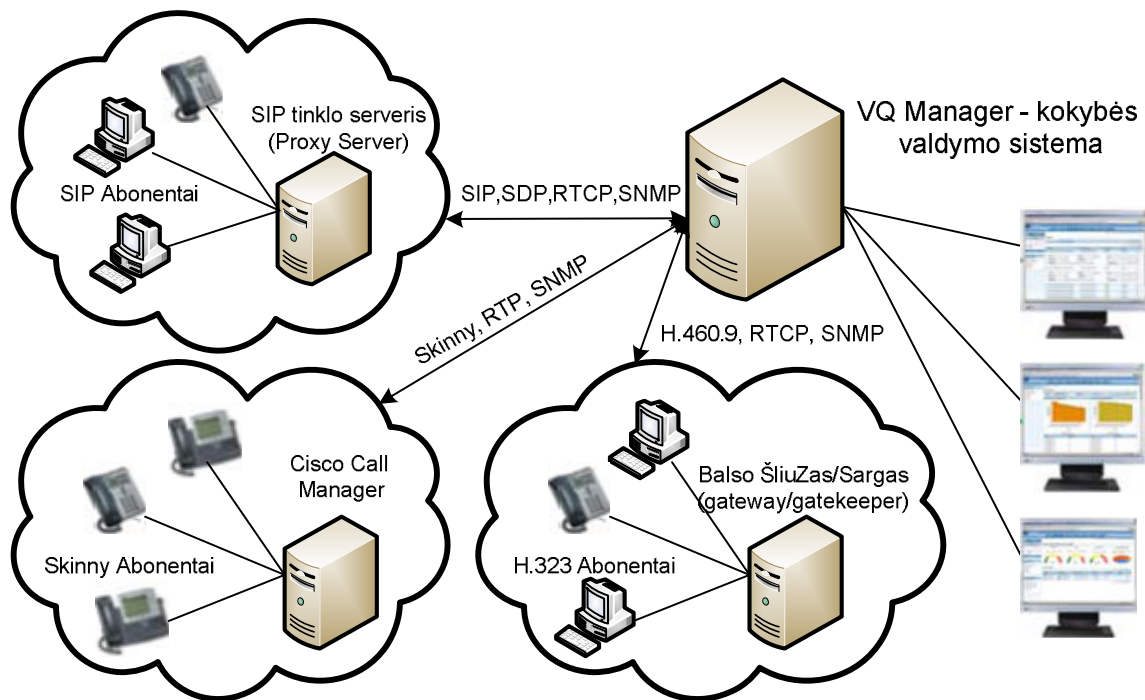
Teikiant balso perdavimo paslaugas, naudojant VoIP sistemas, stengiamasi kad paslaugų kokybės lygis būtų kuo aukštesnis (kaip minėjome anksčiau IP tinkluose paslaugų kokybė nėra garantuota). Tam tikslui naudojamos kokybės valdymo sistemos, kurios leidžia tinklo administratoriui laiku ir efektyviai spręsti problemas, susijusias su VoIP paslaugų kokybe. Taikant subjektyvius ar objektyvius balso kokybės vertinimo būdus, reikia nemažai resursų ir tam tikro laiko eksperimentams atlikti, todėl dažnai naudojamos VoIP sistemų efektyvumo stebėjimo ir diagnostikos programinės sistemos, leidžiančios realiu laiku stebėti VoIP sistemos balso perdavimo kokybės vertinimo rodiklius. Pagal šiuos rodiklius galima daryti sistemos pakeitimus, sprendžiant paslaugų kokybės gerinimo paslaugas.

„Manage Engine VQ Manager“, sukurtas „AdventNet“ kompanijos, programinis paketas – tai realaus laiko kokybės valdymo sistema, naudojama VoIP tinkluose [20]. Leidžianti stebėti bet kokios VoIP sistemos darbą, palaikančios SIP (RFC3261) ar „Cisco“ Skinny ir RTP/RTCP (RFC3550) protokolus. Nauja kokybės valdymo sistema remiasi keliais skirtingais (IETF, ITU-T, ETSI) standartais. Ji naudoja paskirstytos programinės įrangos tyrimo architektūrą, užtikrinančią tinklo rentabilumą, gerą realaus laiko skambinimo kokybę bei maksimalią tinklo aprėptį. Ši sistema dirba su paslaugų kokybės ir tinklo valdymo bei raportavimo protokolais:

- RTCP XR (angl. *Real-time Control Protocol Extended Reporting*) skirtas keistis skambučių kokybės informacija tarp VoIP galinių įrenginių. Įgalina galiniuose taškuose kaupti bei kurti skambučių kokybės raportus. Efektyvumo raportus skaidriai praleidžia pro ugniasienes. Leidžia tirti tinklą, išgaunant analoginio signalo informaciją nenaudojant balso paketų dekodavimo. Suderinamas su apsauginiu realaus laiko transportavimo protokolu SRTP (angl. *Secure Real-time Transport Protocol*), skirtu balso slaptumo užtikrinimui. Gali dirbti su H.323, SIP, MGCP, Megaco signalizacijos protokolais.

- SNMP (angl. *Simple Network Management Protocol*) – vienas iš tinklo protokolų. Skirtas tinkle veikiančių įrenginių stebėjimui ir valdymui. Skirtingai nuo daugumos dabar naudojamų, veikia ne tik TCP/IP tinkluose. Priešingai, nei teigia pavadinimas, protokolas yra bene sudėtingiausias iš standartizuotų protokolų, kuris turi kelis abstrakcijos lygmenis.

Paveiksle 2.7 pavaizduota „VQ Manager“ kokybės valdymo sistema. Tai klientas – serveris sistema, kur į VoIP sistemos galinius taškus integruotos nedidelės valdančios programos (agentai). Turint galimybę iš nutolusių tinklo elementų realiu laiku surinkti tinklo efektyvumą įtakančius duomenis, efektyvumo problemas galima greitai pašalinti.

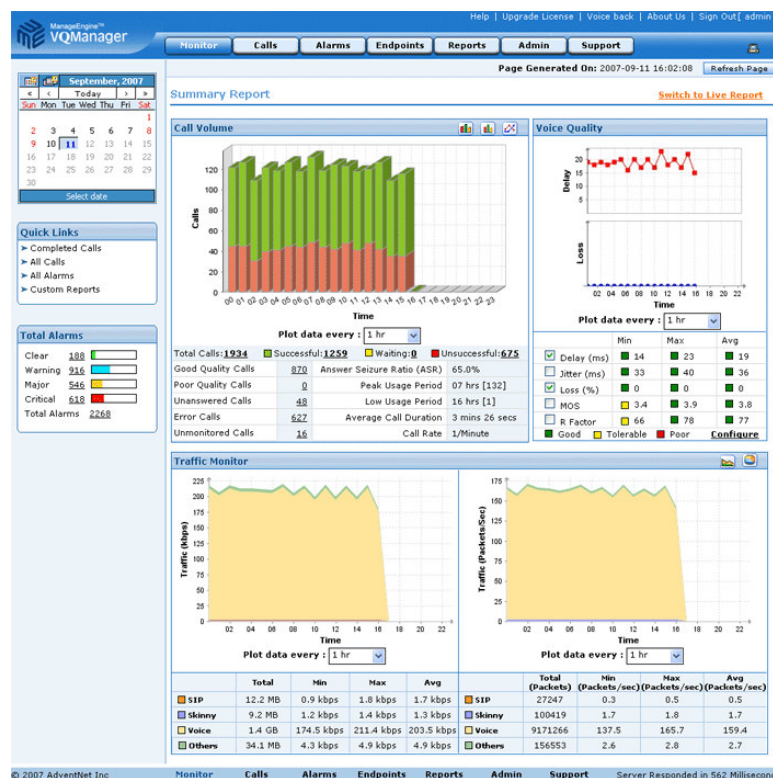


2.7 pav. „VQ Manager“ sistemos struktūra

VQ agentas yra efektyvus ir reikalauja mažai aparatūros resursų todėl gali būti įdiegtas tinklo aparatūroje nenaudojant tam atskiro procesoriaus ar atminties. Iš agentų surinkta informacija siunčiama į VQ serverį, kur apdorojama ir pateikiama sistemos administratoriui. Technologija matuoja pagrindines balso paketų srauto charakteristikas bei realiu laiku skaičiuoja tinklo efektyvumo duomenis, kuriuos tinklo operatorius gali naudoti paslaugų kokybę įtakančių problemų aptikimui bei charakterizavimui. Teikia detalų paslaugų kokybės įvertinimą, galima stebėti diagnostinę informaciją, tokią kaip paketų praradimas bei atmetimas. Tai įmanoma naudojant tik 0,1 % tinklo pralaidos resursų nes naudojami mažai tinklo sąnaudų reikalaujantys protokolai. Taškas – taškas skambučių kokybei skaičiuoti bei įvertinti remiasi nusistovėjusiu ITU G.107 E-Modeliu su ETSI TS 101329-5 Annex E papildymu.

VQmon/EP programinė įranga diegiama galiniuose tinklo elementuose, tokiuose kaip telefonas, delninis kompiuteris, nešiojamas kompiuteris ir t.t. Ši programinė įranga kontroliuoja gaunamų paketų srautą ir iš VoIP kodekų išgauna balso kokybės informaciją, kuri naudojama apytikrei skambučio kokybės informacijai apskaičiuoti.

VQmon/SA yra programinė įranga skirta VoIP paketų srautų analizei. Ji naudojama tiek bevieliniuose tiek kabeliniuose tinklo įrenginiuose ir skirta nukreipti IP paketų srautus į diagnostikos įrenginius kur paketai sugaunami/dekoduojami/analizuojami. Naudojama tinklo įrenginiuose sujungtuose su centralizuotom valdymo stotim.



2.8 pav. VoIP sistemos darbo stebėjimas

Kontroliuoja paketų srautus, automatiškai atpažįsta individualių skambučių srautus bei naudojamus kodekų tipus. Ši technologija nustato koks paketas kur prarandamas ar atmetamas, naudojantis šiais duomenimis bei specialiais algoritmais apytikriai nustatoma skambučių kokybė. Parametrai gaunami naudojant „VQ Manager” sistemą:

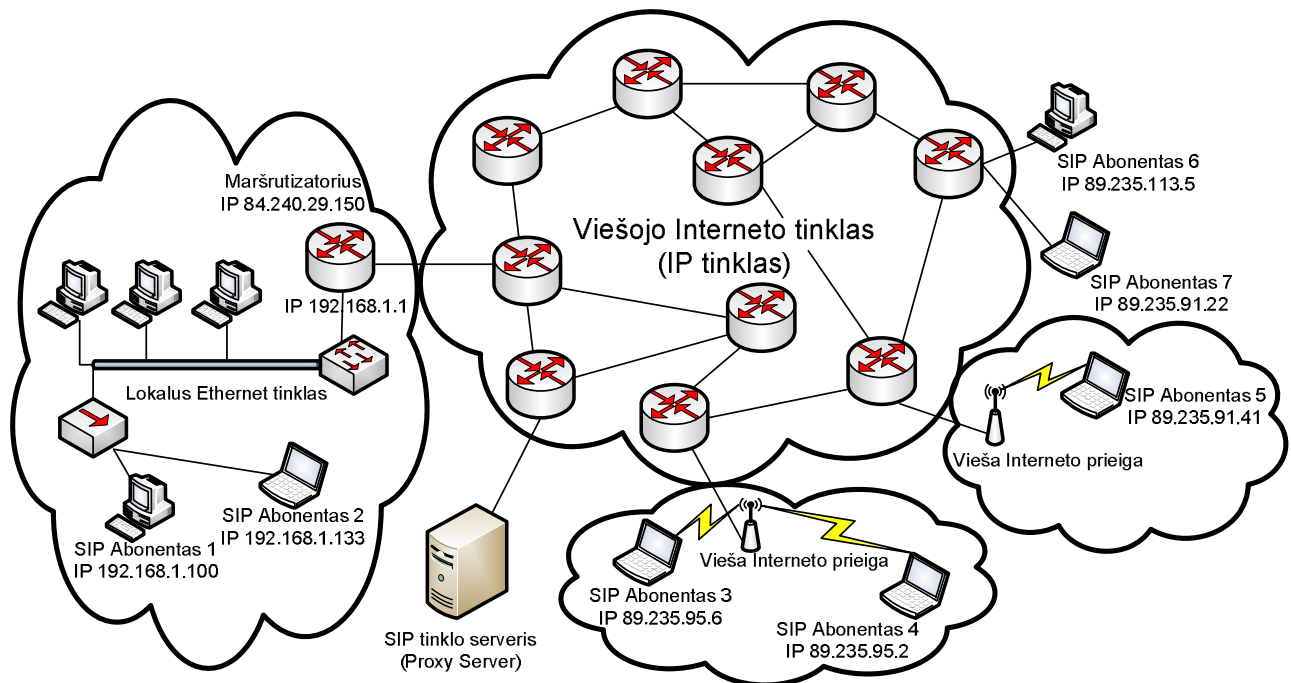
- Skambučių kokybės įvertinimas: MOS įvertis, R koeficiento įvertis.
- Procentinis kokybės pablogėjimas dėl paketų praradimo, naudojamo kodeko, vėlinimo, vėlinimo švytavimo, signalo lygio, triukšmo lygio, aido įtakos.
- IP/RTP statistika: paketų vėlinimas, praradimo dažnis, vėlinimo švytavimas.

3. VOIP TELEFONO SISTEMA

Šiame darbe bus atliekami, VoIP balso perdavimo kokybės nustatymo eksperimentai. Tam tikslui reikalinga veikianti VoIP telefoninė sistema. Šiame skyriuje aptariamas sistemos projektavimas ir realizavimas. Sistema projektuojama taip, kad būtų realizuojama Vilniaus miesto viešojo Interneto tinkle. Kaip išsiaiškinome 1.4 – 1.5 skyreliuose, SIP protokolas yra labiausiai pritaikytas internetinės telefonijos tinklams, sukurtas IETF organizacijos. Todėl telefoninė sistema bus kuriama SIP protokolo pagrindu.

3.1 SISTEMOS PROJEKTAVIMAS – STRUKTŪRINĖ SCHEMA

Pagal SIP protokolo tinklo architektūrą, sistemą sudaro vartotojo agentai – galiniai įrenginiai ir tinklo serveriai, valdantys ryšio seansus tarp galinių taškų. Kadangi telefoninė sistema kuriama su prielaida, jog bus naudojama dešimties abonentų, sistemą sudaro vienas tinklo serveris ir galiniai įrenginiai programiniai telefonai, įdiegiami kompiuteriuose. Tinklo serveris atlieka ryšio seansų valdymo, vartotojų registravimo funkcijas. Sistemos struktūrinė schema pavaizduota 3.1 paveiksle.



3.1 pav. VoIP telefono sistemos struktūrinė schema

Sudarius telefoninės sistemos struktūrą, būtina nustatyti reikalingą pralaidumo juostą, balso perdavimui IP tinkle. Rekomendacijose teigiama, jog balso perdavimui reikalinga ne mažesnė 64 Kbit/s pralaidumo juosta. Tačiau tai pralaidumo juosta, kurią užima duomenų srautas, sukuriamas galinių taškų įrenginiuose, kai analoginis balso signalas paverčiamas skaitmeniniu duomenų srautu. Vykstant balso perdavimui IP tinklu, prie kiekvieno balso duomenų paketo yra pridėdama keletas antraščių laukų, kuriuose talpinama tarnybinė informacija, dėl to padidėja pralaidumo juosta, reikalinga telefoninei sistemai. Taigi sekančiame skyrelyje atliekamas pralaidumo juostos skaičiavimas.

3.2 PRALAUDUMO JUOSTOS SKAIČIAVIMAS BALSO PERDAVIMUI IP TINKLE

Vienas iš svarbiausių dalykų, planuojant telefoninę sistemą IP tinkle, yra reikiamos pralaidumo juostos skaičiavimas. Tinkamas pralaidumo juostos užtikrinimas vienas iš pagrindinių faktorių leidžiančių gerą perduodamo balso kokybę palnuojamoje sistemoje.

IP telefonijoje gali būti naudojami skirtingi balso suspaudimo algoritmai, pateikti 15 lentelėje. Naudojant skirtingus algoritmus – reikalingas ir skirtingas pralaidumas. Jis priklauso nuo balso kodavimo spartos ir papildomos tarnybinės informacijos pridedamos prie vartotojo informacijos.

15 lentelė. Balso glaudinimo algoritmai

Balso suspaudimo algoritmas	Kodavimo sparta, kbps	Suspausto balso paketo dydis, baitais	Suspausto balso paketo trukmė, ms	MOS
G.711 PCM	64	80	10	4.1
G.729 CS-ACELP	8	10	10	3,92
G.723.1 MP-MLQ	6,3	24	30	3,9
G.723.1 ACELP	5,3	20	30	3,8
G.726 ADPCM	32	20	5	3,85
G.728 LD-CELP	16	10	5	3,61

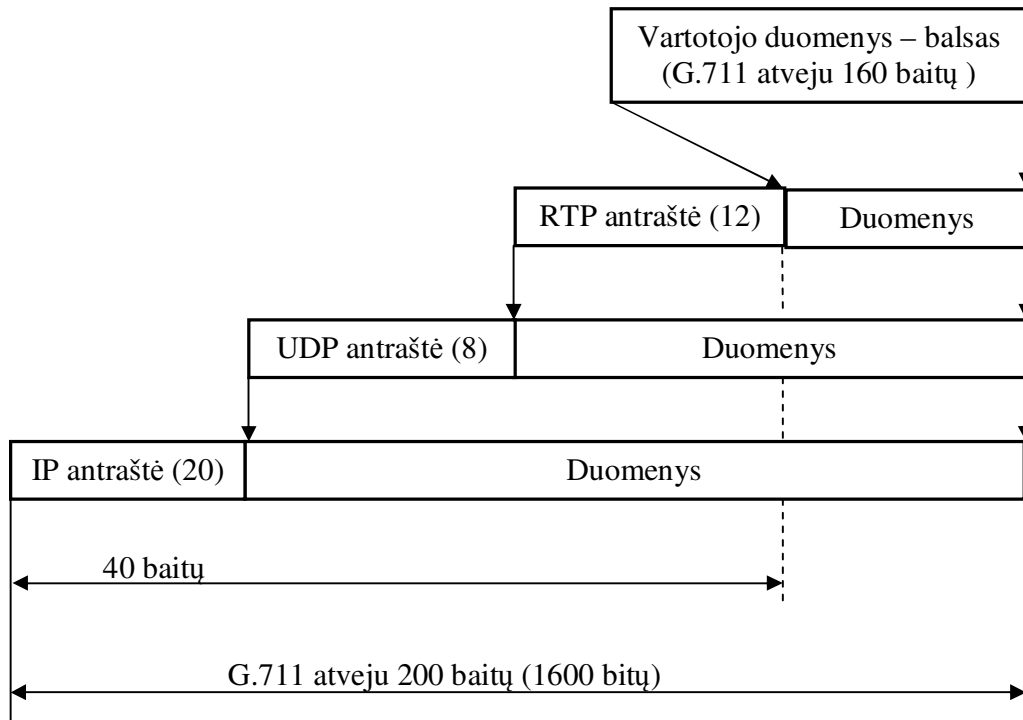
Balso glaudinimo algoritmo kodavimo sparta nurodo balso duomenų bitų skaičių per sekundę vykstant telefoniniam pokalbiui. Suspausto balso pekto dydis – baitų skaičių, kuriais skaitmeninis signalų procesorius (angl. *DSP – Digital Signal Processor*) užkoduoja kėkvieną imamą atitinkamos trukmės laiko intervalą. Suspausto balso paketo trukmė tai laiko intervalai kuriais operuoja balso suspaudimo algoritmas. Pvz. G.711 algoritmas 10 ms laiko intervalą užkoduoja 80 baitų (640 bitų) 64 Kbit/s sparta.

$$KodavimoSparta(kbps) = \frac{PaketoDydis(bitai)}{PaketoTrukmė(s)} \quad (3.1)$$

$$KodavimoSparta = \frac{80(baitai)}{10(ms)} = \frac{640}{0,01} = 64000 = 64 \text{ Kbit/s}$$

Kadangi IP tinkluose duomenų perdavimui naudojama keletas protokolų UDP/IP, RTP/RTCP prie kėkvieno duomenų paketo pridedama keletas antraščių laukų – tarnybinė informacija. Aukštesnio

lygio protokolų paketai dedami į žemesnio lygmens protokolo paketą. Taip kiekvieno lygmens protokolas prie paketo prideda savo antraštę su reikalinga tarnybine informacija. Toks mechanizmas vadinamas enkapsuliacija.



3.2 pav. Balso paketo sandara

Kaip matome 3.2 paveiksle, tinklinio lygmens balso paketo antraštę sudaro 40 baitų tarnybinės informacijos. Pagal nutylėjimą, balso paketo trukmė yra 20 ms – G.711 ir G.729, G.726 balso suspaudimo algoritmų atveju, o G.723.1 ir G.728 – 30 ms. Taigi skaičiuodami pralaidumo juostą telefoninei sistemai, turime įvertinti balso paketų antraščių laukų užimamą juostą. Kadangi balso perdavimui naudojami nedideli paketai (maksimalus duomenų dydis gaunamas G.711 algoritmo atveju 160 baitų, kai MTU (angl. *Maximum Transmission Unit*) galimas 1460 baitų) beveik trečdalį naudojamos pralaidumo juostos užima paketų antraštės. Reikiama pralaidumo juosta apskaičiuojama pagal tokias formules:

$$PPD = A_{KLP} + A_{IP/UDP/RTP} + B \quad (3.2)$$

Kur PPD – pilnas balso paketo dydis baitais, A_{KLP} – kanalinio lygmens antraštės dydis (pvz Ethernet su CRC lauku 18 baitų), $A_{IP/UDP/RTP}$ – IP, UDP, RTP protokolų tarnybinės informacijos laukų

dydis baitais, B – balso duomenų paketo dydis baitais (G.711 atveju, kai pagal nutylėjimą paketo intervalas 20 ms, paketo dydis 160 baitų).

$$PPS = \frac{KS}{B} \quad (3.3)$$

Kur PPS – perduodamų paketų skaičius per sekundę, KS – balso suspaudimo algoritmo kodavimo sparta.

$$PJ = PPD * PPS \quad (3.4)$$

Kur PJ – reikiamos pralaidumo juostos dydis [5]. Atlikus skaičiavimus kiekvienam balso suspaudimo algoritmui atitinkamai gaunami rezultatai 16 lentelėje.

16 lentelė. Pralaidumo juosta, reikalinga balso perdavimui

Balso suspaudimo algoritmas	KS, kbps	B, baitais	balso paketo trukmė pagal nutylėjimą, ms	PPS	IP lygmens PJ, kbps	Ethernet lygmens PJ, kbps
G.711 PCM	64	160	20	50	80	87,2
G.729 CS-ACELP	8	20	20	50	24	31,2
G.723.1 MP-MLQ	6,3	24	30	34	17,4	21,9
G.723.1 ACELP	5,3	20	30	34	16,3	20,8
G.726 ADPCM	32	80	20	50	48	55,2
G.728 LD-CELP	16	60	30	34	27,2	31,5

Kaip pvz. apskaičiuokime reikiamą pralaidumo juostą, naudojant G.711 balso kodeką:

$$PPD = 18 + 40 + 160 = 218 \text{ baitų} = 1744 \text{ bitai}$$

$$KS = 64 \text{ kbps} = 64000 \text{ bit/s}$$

$$B = 160 \text{ baitų} = 1280 \text{ bitai}$$

$$PPS = \frac{64000}{1280} = 50 \text{ paket/s}$$

$$PJ = 1744 * 50 = 87200 \text{ bps} = 87,2 \text{ Kbit/s}$$

Iš duomenų, pateiktų 15 ir 16 lentelėse, matyti, kad didžiausias pralaidumas reikalingas G.711 algoritmu už koduotiems balso paketams. G.729 ir G.723.1 algoritmais suspausto balso paketams reikalingas pralaidumas ne daug skiriasi. Tačiau geriausia balso kokybė pasiekama naudojant G.711

algoritmą. Kita vertus, telekomunikacinio tinklo resursai efektyviau būtų išnaudojami taikant G.729 ir G.723.1 algoritmus. Taigi, projektuojant telefoninę sistemą naudojančia G.711 balso suspaudimo algoritmą, būtina užtikrinti ne mažesnę 87,2 kbit/s pralaidumo juostą kanaliniam lygmenyje (pagal OSI tinklo modelį). Interneto paslaugų tiekėjai, teikdami paslaugą, sutartyje dažniausiai aprašo informacijos pralaidumo juostą tinkliniam lygmenyje.

3.3 IP TINKLO BŪSENA VILNIAUS MIESTE

Projektuojant VoIP telefono sistemą, būtina užtikrinti reikiamą pralaidumo juostos plotį. Skyrelyje 3.2 išsiaiškinome kad didžiausias pralaidumo juostos plotis, reikalingas balso perdavimui IP tinkle, yra 87,2 Kbit/s naudojant G.711 balso kodavimo algoritmą. Telefono sistema bus diegiama Vilniaus miesto viešojo interneto tinkle, su prielaida kad bus naudojama dešimties vartotojų – abonentų. Taigi turime išmatuoti dešimties taškų pralaidumo juostos plotį. Matavimai buvo atlikti naudojant „Iperf” programą, kuri matuoja visą pralaidumo juostą, įskaitant tanybinę informaciją. Rezultatai pateikti 17 lentelėje.

17 lentelė. Pralaidumo juostos matavimai

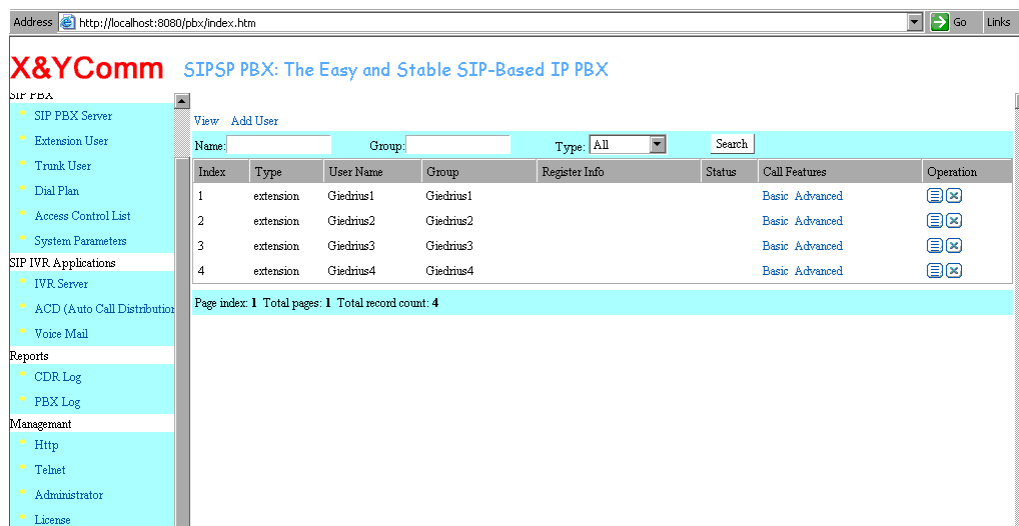
Galinio taško Nr.	IP adresas	Iperf Pralaidumas, Mb/s	Ping Vėlinimas, ms	Paketų Praradimai, %
1	88.119.113.2	4,00	39	1
2	88.119.91.38	4,99	92	4
3	88.119.91.17	0,98	361	12
4	88.119.91.10	0,82	432	14
5	88.119.113.5	2,07	128	3
6	88.119.113.2	4,13	73	2
7	88.119.112.26	4,70	57	0
8	88.119.113.27	2,11	146	4
9	88.119.91.22	1,89	208	7
10	88.119.91.41	4,07	22	0

Matavimai buvo atlikti tarp taško, kurio IP adresas 84.240.29.150, ir taškų pažymėtų tam tikru numeriu lentelėje. Lentelėje pateikti ne tik pralaidumo juostos bet ir paketų vėlinimo bei praradimo matavimo rezultatai. Paketų vėlinimo ir praradimo matavimai buvo atliekami naudojantis „Ping” programa, kai į tinklą pasiunčiamas kontrolinis ICMP paketas. Tokiu būdu gaunamas RTT (angl. *Round Trip Time*) įvertis, kuris parodo paketo siuntimo, pirmyn ir atgal tarp dviejų tinklo taškų, laiką, taigi gaunamas paketų vėlinimas į abi puses. Paketų vėlinimas ir praradimas buvo matuojamas, į tinklą pasiunčiant 100 kontrolinių paketų, iš kurių RTT laiko rezultatų buvo gautas paketų vėlinimo vidurkis konkrečiame taške, bei gauta procentinė paketų praradimo vertė.

Kaip matome iš 17 lentelėje pateiktų duomenų mažiausia pralaidumo juosta yra 0.98 Mbit/s (980 Kbit/s), o reikiama didžiausia pralaidumo juosta balso perdavimui 87,2 Kbit/s. Didžiausias paketų velinimas į abi puses 432 ms, o reikiamas vienpusis vėlinimas 150 ms (pagal ITU-T G.1010 rekomendaciją). Taigi iš dalies galima teigti kad tinklas tinka VoIP telefono sistemos diegimui.

3.4 VOIP SISTEMOS ĮRANGA

Sistemos realizavimui naudojamas vienas SIP tinklo serveris ir programiniai telefonai diegiami galiniuose tinklo taškuose (vartotojų įrangoje). Kaip SIP tinklo serveris naudojamas kompanijos „X&Y Comm” serveris „SIP-SP-PBX”, kuris leidžia valdyti, organizuoti ir maršrutizuoti skambučius. Galiniuose taškuose naudojami „3CX VoIP Phone” programiniai telefonai, įdiegti kompiuteriuose.

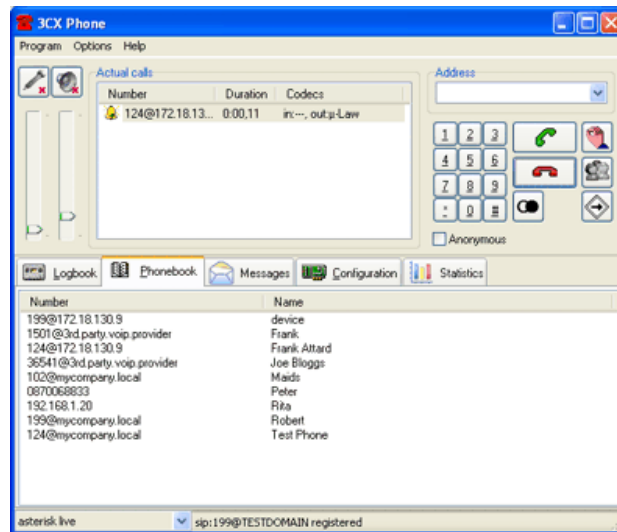


3.3 pav. SIP tinklo serveris

„SIP-SP-PBX” – tai kompanijos “X&Y Comm” programinis PBX, veikiantis SIP protokolo pagrindu, parašytas „C” programavimo kalba. Gali atlikti tinklo, peradresavimo ir registravimo serverio funkcijas. Gali veikti X86 kompiuteriuose su „Windows” operacinėmis sistemomis, yra patikimas ir stabilus naudoja nedaug kompiuterio resursų. Nesunkiai konfigūruojamas ir valdomas. Pasirinktas todėl, kad gali būti diegiamas į „Windows” tipo operacines sistemas. Turi puikų grafinį interfeisą bei lengvai konfigūruojamas. “X&Y Comm” kompanija rekomenduoja naudoti mažo ir vidutinio verslo kompanijoms.

„3CX VoIP Phone” – tai programinis telefonas skirtas „Windows” tipo operacinėms sistemoms, veikiantis SIP protokolo pagrindu. Pasirinkau jį nes jis yra nemokamas (dauguma mokami), lengvai konfigūruojamas ir valdomas programinis telefonas. „3CX VoIP Phone” puikiai veikia su visais VoIP

SIP tinklo serveriais. Kad galėtume jį naudoti mums reikalingas kompiuteris su „Windows” operacine sistema ir „full duplex” garso korta, taip pat ausinėmis ir mikrofonu.



3.4 pav. Programinis telefonas

Naudojant SIP protokolą yra galimybę vykdyti skambučius, naudojantis įvairiais balso kodavimo algoritmais (balso kodekais). Naudojamas programinis telefonas palaiko šiuos kodekus:

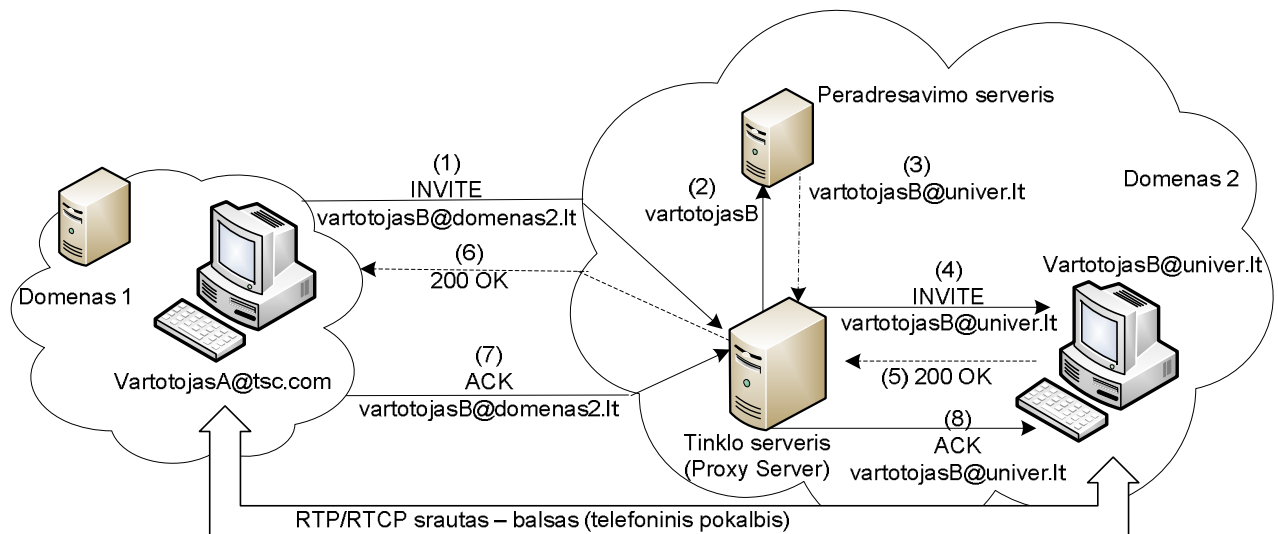
- G.711 A-Law
- G.711 μ -Law
- G.726-32
- GSM
- iLBC
- Speex

SIP protokolas skambučio inicijavimo metu nustato kokius kodekus naudoja galiniai įrenginiai ir išrenka vienodus abiem galiniams taškams. Perduodamo balso kokybė ir duomenų srautas priklauso būten nuo to koki kodekai naudojami balso kompresijai.

3.5 SISTEMOS VEIKIMO PRINCIPAS

Tam kad išsiaiškintume telefono sistemos veikimo principą, šiame skyriuje nagrinėjamas tipiškas skambutis, vykdomas SIP telefoninėje sistemoje. Skambutis vykdomas tarp dviejų abonentų – galinių taškų, esančių skirtinguose domenuose. Kai abu abonentai yra tame pačiame lokaliame tinkle (domene) sujungimas gali būti sudaromas tiesiog tarp galinių taškų – vartotojų agentų, nenaudojant kitų SIP tinklo įrenginių. Tačiau kai abonentai yra skirtinguose domenuose ar kai naudojama NAT (angl. *Network Address Translation*) technologija, tam kad būtų sudarytas sujungimas, naudojamas SIP tinklo

serveris. Kiti tinklo komponentai gali būti ir nenaudojami, tai priklauso nuo telefoninio tinklo struktūros.



3.5 pav. Tipiškas skambutis internetu panaudojant SIP protokolą

Paveiksle 3.5 pavaizduotas tipiškas skambutis internetu panaudojant SIP protokolą. (1) vartotojas A siunčia INVITE užklausą tinklo serveriui, norėdamas užmegsti ryšį su vartotoju B. (2) ją gavęs tinklo serveris kreipiasi į peradresavimo serverį dėl vartotojo B adreso. (3) tinklo serveris gauna vartotojo B adresą. (4) tinklo serveris siunčia vartotojui B užklausą INVITE, ar galima su juo užmegsti ryšį. (5) vartotojas B atsako tinklo serveriui žinute, kurios busena “200 OK”, ryšys galimas ir vartotojas B pasiruošęs siūsti duomenis. (6) tinklo serveris persiunčia žinute su busena “200 OK” vartotojui A. (7) vartotojas A išsiunčia ACK, patvirtinimą kad gavo žinutę, tinklo serveriui. (8) serveris persiunčia patvirtinimo žinutę vartotojui B ir sudaromas sujungimas tarp vartotojo A ir B. Pradedami siūsti duomenys (vyksta pokalbis). Pasibaigus pokalbiui kuriam nors vartotojui inicijavus pokalbio nutraukimą, tinklo serveriui siunčiama žinutė BAY ir sujungimas išardomas.

SIP architektūroje tinklo serveriai reikalingi vienas nuo kito nutolusių galinių taškų sujungimui. SIP žinučių signalizacijos pagalba, nustatomi sujungimo sudarymui reikalingi parametrai: adresai, duomenų srautui reikalinga pralaidumo juosta, naudojami balso kodekai.

Žinutės perduodamos TCP arba UDP segmentais, kurie dedami į IP paketus. O už naudingos informacijos – balso perdavimą atsakingas RTP/RTCP protokolas kuris yra UDP protokolo dalis.

IP tinklas yra sudėtinga sistema turinti daug tinklo mazgų, vartotojų kurie nesinaudoja VoIP paslauga, kiekvienas mazgas siunčia savo informacijos srauto dalį ir naudoja tinklo resursą. Tinklu perduodami balso paketai turi nukeliauti tam tikrą atstumą ir praeiti tam tikrą skaičių tinklo mazgų kuriuose paketai talpinami buferiuose, dėl ko pasireiškia vėlinimai, taip pat jei tinklo mazgai apkrauti,

paketai gali būti atmetami dėl ko atsiranda paketų praradimai. Telefono sistemos paslaugos kokybės tyrimai atliekami kitame skyriuje.

4. TELEFONO SISTEMOS TYRIMAS

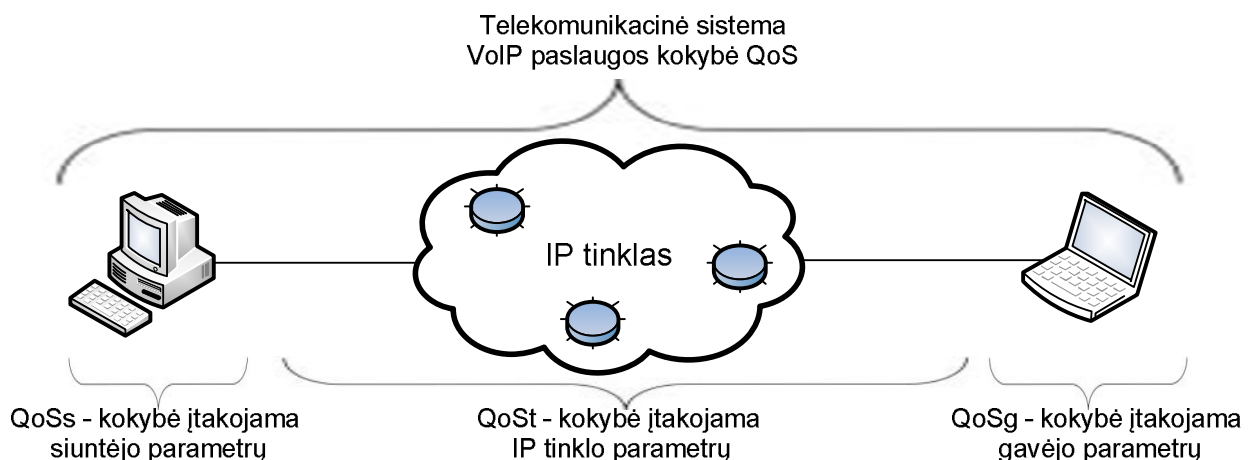
Šiame skyriuje atliekami, suprojektuotos VoIP telefono sistemos tyrimai (telefono sistema įdiegta Vilniaus miesto viešojo interneto tinkle). Išmatuota balso perdavimui naudojama pralaidumo juosta, atlikti balso perdavimo kokybės vertinimo eksperimentai, taikant subjektyvaus ir objektyvaus balso kokybės vertinimo būdus. Subjektyvaus vertimo eksperimentas atliktas taikant klausymosi testus ACR metodu, pagal ITU-T P.800 ir P.830 rekomendacijas. Gautas kokybės vertinimo rezultatas pagal MOS skalę. Objektyvaus vertinimo eksperimentas atliktas taikant PESQ algoritmą, gautas balso kokybės PESQ MOS įvertis. Taip pat atliktas MOS įverčio prognozavimas, taikant „E-Model” tinklo planavimo modelį, apskaičiuotas R koeficientas. Gauti eksperimentų ir skaičiavimo rezultatai palyginti su rezultatais, gautais iš kokybės stebėjimo programinio paketo „Image Engine VQ Manager”.

4.1 EKSPERIMENTO APRAŠYMAS

Paprastai teikiant kokias nors telekomunikacines paslaugas tiekėjas su vartotojais pasirašo SLA (angl. *Service Level Agreement*) sutartis, kuriomis nustatoma teikiamų paslaugų kokybę – QoS (angl. *Quality of Service*). VoIP paslaugos – balso perdavimo IP tinklu kokybė gali būti išreiškiama tokia formule [2]:

$$QoS = QoS_S + QoS_T + QoS_G \quad (4.1)$$

Formulėje pateiktų kintamųjų reikšmė atspindi 4.1 paveiksle.



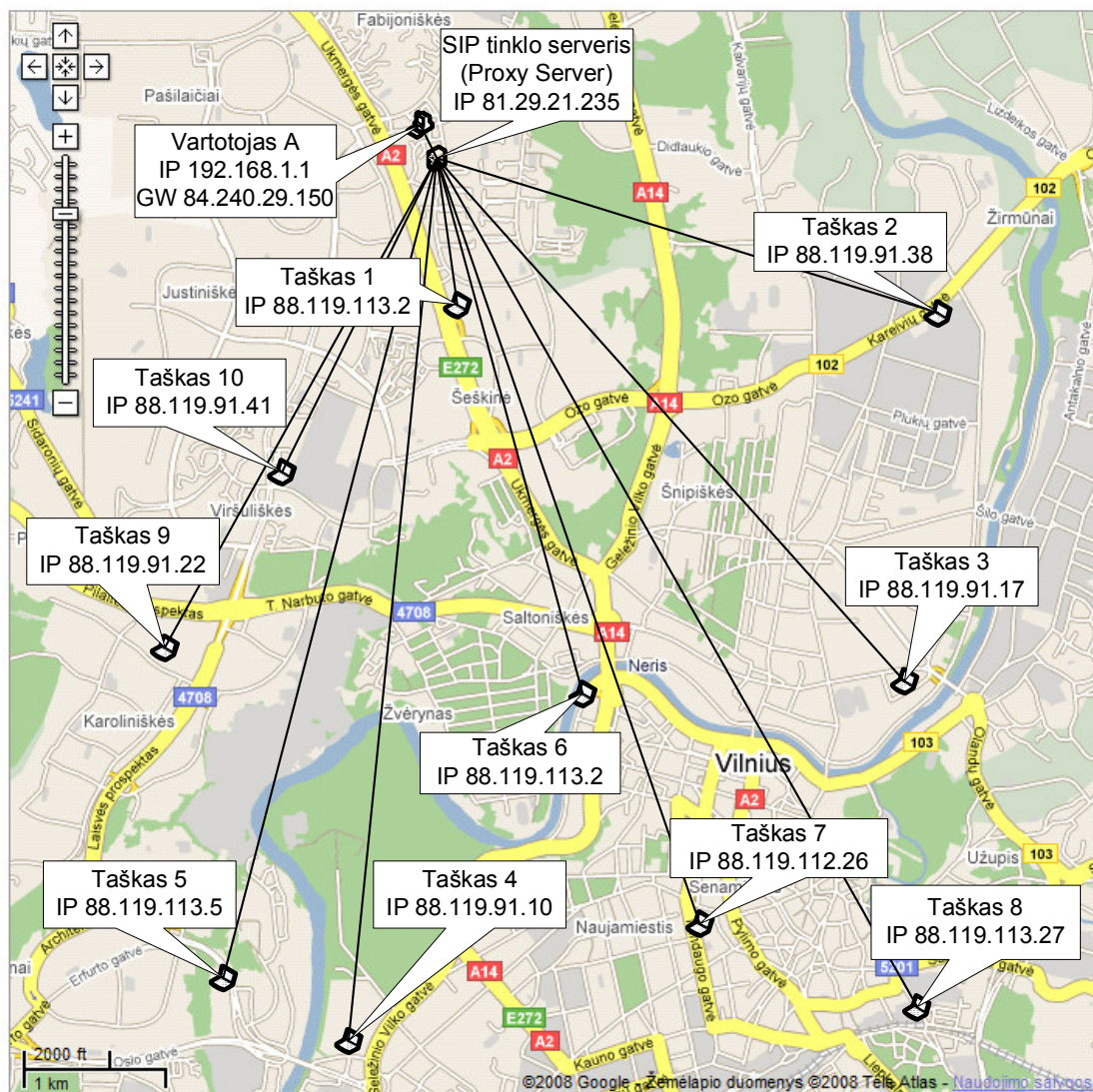
4.1 pav. VoIP paslaugos kokybė QoS

QoS – parodo balso perdavimo kokybę telekomunikacinėje sistemoje tarp dviejų tinklo taškų (vykstant skambučiui tarp dviejų abonentų). Ją įtakoja tinklo ir vartotojo įrangos parametrai. Kad būtų lengviau matuoti ir vertinti, QoS galime išskaidyti į tris dalis:

QoS_S – kokybė įtakoja IP tinklo parametrų: reikiama pralaidumo juosta, paketų vėlinimas, vėlinimo fluktuacijos, paketų praradimas.

QoS_T – kokybė įtakoja siuntėjo (vartotojo) įrangos parametrų: programinė įranga, audio įranga, naudojami balso kodekai.

QoS_G – kokybė įtakoja gavėjo (vartotojo) įrangos parametrų: programinė įranga, garso įranga, naudojami balso kodekai.



4.2 pav. VoIP paslaugos kokybės eksperimento schema

Šiame darbe atliekami perduodamo balso kokybės eksperimentai, atsižvelgiant tik į tinklo parametrus. Kadangi vartojo programinę, garso įrangą ir naudojami balso kodekai visų eksperimentų

metu bus tie patys, tai QoS_S ir QoS_G bus vienoda, todėl bendroje balso perdavimo kokybės išraiškoje jų nevertinsime. Taigi galima parašyti tokia lygtį:

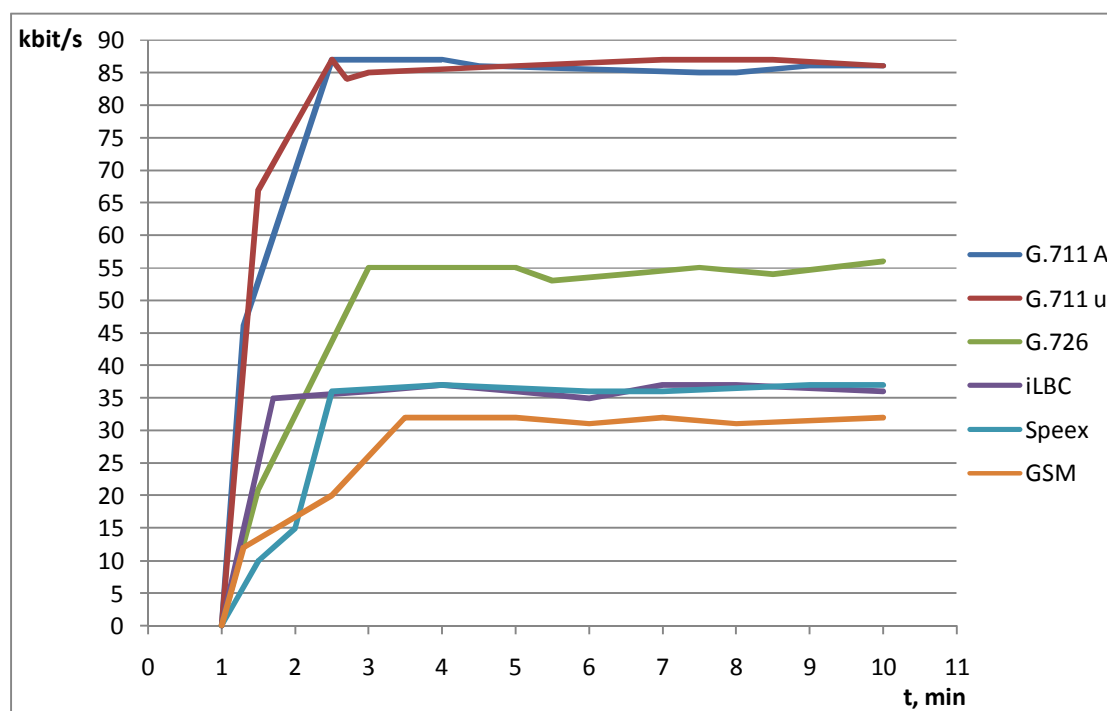
$$QoS = QoS_T \quad (4.2)$$

VoIP telefono sistemo paslaugos kokybės eksperimentai bus atliekami vykdant telefoninius pokalbius tarp dešimties abonentų (tarp dešimties tinklo galinių taškų), pagal 4.2 paveiksle pavaizduotą schemą.

4.2 NAUDOJAMOS PRALAUDUMO JUOSTOS MATAVIMAS

Šiame skyrelyje atliekami, balso perdavimui naudojamos, pralaidumo juostos matavimai. Skyrelyje 3.2 buvo atlikti, reikiamos pralaidumo juostos skaičiavai, taigi atlikę matavimus galėsime įsitikinti ar skaičiavimai buvo teisingi. Taip pat galėsime matyti kokią dalį galimos pralaidumo juostos, užima balso perdavimas.

Matavimai atliekami pagal 4.2 paveiksle pavaizduotą schemą, skambinama iš taško „Vartotojas A“ į taškus pažymėtus atitinkamu numeriu (1,2,3...). Vykstant telefoniniam pokalbiui matuojamas, į tinklą siunčiamų, duomenų srautas kompiuterio „Ethernet“ sąsajoje. Eksperimento metu naudojami „3CX Phone“ programiniai telefonai, turintys galimybę naudoti keletą balso suspaudimo algoritmų, kiekvieno algoritmo atveju sukuriamas skirtingas duomenų srautas (*G.711*, *G.726*, *iLBC*, *Speex*, *GSM*).



4.3pav. Srautas, sukuriamas naudojant skirtingus balso suspaudimo algoritmus

Fiksuoto telefono sistemose balsas dažniausiai koduojamams PCM būdu. Bendrieji PCM parametrai parenkami pagal ITU-T rekomendaciją G.711. Nors skirtinguose regionuose taikomi skirtingi (A ar μ) kompresijos dėsniai, balso signalai diskretizuojami imant imtis 8 kHz dažniu, o kvantuotos imtys koduojamos 8 ženklų dvejetainiu kodu. Balso signalas pakeičiamas $2Fn = 64000$ dvejetainių ženklų per sekundę seka arba $2Fn = 64$ Kbit/s.

IP tinklo darbo stebėjimui ir duomenų srautų fiksavimui naudojame kompanijos „Paessler“ tinklo stebėjimo programą „PRTG Traffic Grapher“. Tai „Windows“ tipo operacinės sistemos skirta tinklo srauto (angl. *traffic*) stebėjimo programa veikianti SNMP protokolo pagrindu. Programa turi galimybę stebėti kiekvieno, suprojektuotos telefono sistemos, komponento sukuriamą ir siunčiamą į tinklą duomenų srautą (žiūrėti 4.3 paveikslą).

18 lentelė. Naudojamos pralaidumo juostos matavimai

Balso suspaudimo algoritmas	Balso duomenų sukuriamas srautas, kbit/s	Apskaičiuota pralaidumo juosta, kbit/s	Užfiksuota pralaidumo juosta „Ethernet“ sasajoje, kbit/s
G.711 A	64	87,2	86
G.711 μ	64	87,2	87
G.726	32	55,2	54
iLBC	15	37,5	37
Speex	15	37,5	38
GSM	12	31,2	32

Kaip matome iš 4.3 paveikslo ir 18 lentelėje pateiktų rezultatų galime teigti, kad reikalingos pralaidumo juostos skaičiavimai yra teisingi. Užfiksuota naudojama pralaidumo juosta nėra pastovi, dėl RTP/RTCP protokolo mechanizmo, taip pat kas tam tikrą laiko tarpą perduodama tarnybinė informacija, todėl šiek tiek skiriasi nuo apskaičiuotos. Iš 19 lentelėje pateiktų duomenų galime matyti kad naudojama pralaidumo juosta sudaro tik nedidelę dalį galimos pralaidumo juostos.

19 lentelė. Galimos ir naudojamos pralaidumo juostos matavimai

Galinio taško Nr.	IP adresas	Galimas pralaidumas, kbit/s	Balso perdavimui naudojama pralaidumo juosta, kbit/s
1	88.119.113.2	4000	82,3
2	88.119.91.38	4990	85,6
3	88.119.91.17	980	85,2
4	88.119.91.10	820	86,0
5	88.119.113.5	2070	86,0
6	88.119.113.2	4130	87,2
7	88.119.112.26	4700	80,0
8	88.119.113.27	2110	81,3
9	88.119.91.22	1890	86,0
10	88.119.91.41	4070	86,3

4.3 SUBJEKTYVAUS VERTINIMO MOS EKSPERIMENTAS

Pagrindiniai, perduodamo balso IP tinkle, kokybę lemiantys parametrai yra: pralaidumo juostos užtikrinimas, paketų vėlinimas, paketų praradimas. Skyrelyje 4.2 išsiaiškinome, kad naudojama pralaidumo juosta užima tik nedidelę dalį galimos, tačiau kyla klausimas kokią įtaką daro paketų vėlinimo ir praradimo parametrai. Šiame skyrelyje atliekamas subjektyvus vertinimo eksperimentas, pagal MOS skalę.

Atliekamas telefono sistemos, įdiegtos Vilniaus miesto viešojo interneto tinkle, eksperimentas taikant ACR metodą, darant klausymosi testus. Originalus kalbos įrašas perduodamas iš tinklo taško pažymėto „Vartotojas A“ į taškus pažymėtus tam tikru numeriu (pagal 4.2 paveiksle pavaizduotą schemą). Gavėjo taške priimamas balso signalas įrašomas. Perklausę įrašus eksperimento dalyviai vertina perduoto balso kokybę.

Įrašo tekstas: „Vilniaus Gedimino technikos universitetas. Baigiamojo magistro darbo tyrimas. Bandymas vienas, du, trys, keturi, penki. Įrašo trukmė – 20 sekundžių.

Dešimties vertintojų buvo paprašyta, eksperimento metu gautus įrašus įvertinti penkiabalėje sistemoje, naudojant 1 balo tikslumo skalę. Vertinant kreiptas dėmesys į:

- balso aiškumą;
- teksto suprantamumą;
- pašalinius trikdžius;
- aidą;
- garsumą.

Penkiabalės MOS vertinimo sistemos reikšmės pateiktos žemiau esančioje lentelėje.

20 lentelė. Eksperimento MOS įvertinimų reikšmės

Balas	Įvertinimas	Suprantamumas	Kalbos garsumas
5	Puiki kokybė.	Visiškai atsipalaidaves, suprantama be pastangų.	Žymiai garsesnis nei triukšmas.
4	Gera kokybė.	Reikia atkreipti dėmesį, reikalingos nežymios pastangos.	Garsesnis nei triukšmas.
3	Patenkinama kokybė.	Norint suprasti kalba reikia įdėti nemažai pastangų.	Beveik tokpat kaip triukšmas.
2	Bloga kokybė.	Beveik nesuprantama kalba.	Tylesnis nei triukšmas.
1	Labai bloga kokybė.	Visiškai neįmanoma suprasti kas kalbama.	Žymiai tylesnis nei triukšmas.

Eksperimento metu gauti MOS įvertinimai pateikti 21 lentelėje. Eksperimento metu buvo naudojamas, didžiausią kokybę užtikrinantis, G.711 balso kodavimo algoritmas.

21 lentelė. Subjektyvus vertinimo eksperimento MOS rezultatai

Dalyvio Nr. Taško Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	4	4	5	4	4	4	5	4	4	4
2	3	4	4	4	3	4	5	4	4	3
3	2	2	3	2	2	3	4	2	3	2
4	1	2	2	2	1	2	3	2	1	2
5	3	3	4	4	3	4	4	4	4	3
6	3	3	4	4	3	3	4	3	4	3
7	4	4	4	4	3	4	5	4	4	4
8	3	4	4	3	4	4	4	3	4	3
9	3	3	4	3	3	3	4	4	3	3
10	4	5	5	3	4	4	3	4	4	3

Eksperimento metu gauti, subjektyvus vertinimo, rezultatai suvidurkinti, taikant vidutinės kvadratinės paklaidos metodą, ir apskaičiuotos pasikliautinojo intervalo ribos. Skaičiavimai atlikti pagal tokias formules:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n) \quad (4.3)$$

Apskaičiuojamas artmetinis vidurkis.

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}} \quad (4.4)$$

Apskaičiuojama vidutinė kvadratinė paklaida.

$$\Delta x = \pm t_{\alpha,n} S_x \quad (4.5)$$

Apskaičiuojamos pasikliautinojo intervalo ribos.

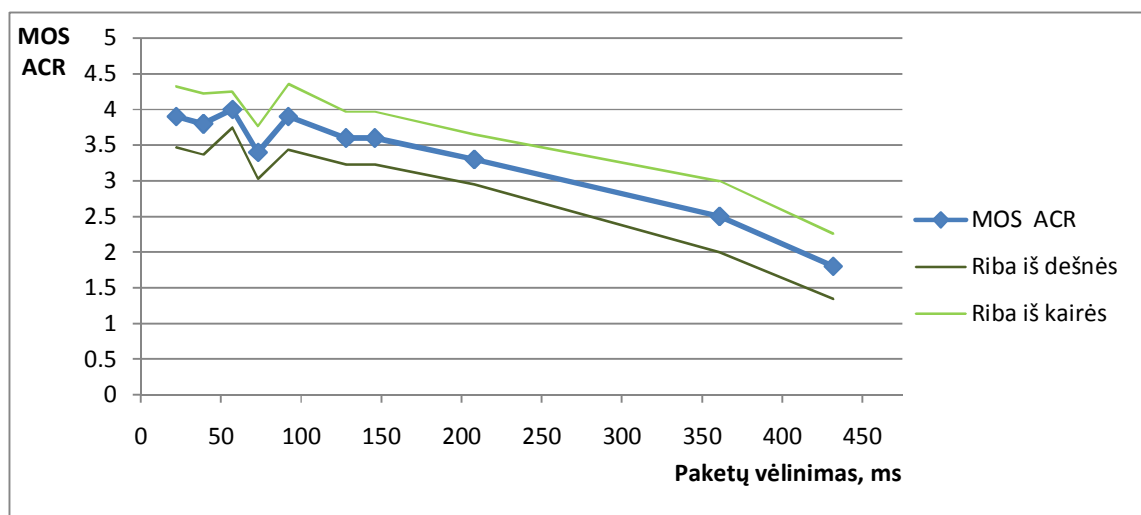
$t_{\alpha,n}$ – Stjudento koeficientas, priklausantis nuo patikimumo koeficiento α ir vertinimų skaičiaus n , kai $n = 10$ ir $\alpha = 0,95$, tai $t_{\alpha,n} = 2,3$.

Suvidurkinti subjektyvus balso kokybės vertinimo rezultatai, pagal MOS skalę, pateikti 22 lentelėje. Taip pat skliausteliuose pateiktos pasikliautinojo intervalo ribos. Lentelėje taip pat pateiktos paketų vėlinimo (RTT – vėlinimas į abi puses) ir praradimo reikšmės, gautos eksperimento metu.

22 lentelė. Eksperimento MOS rezultatai

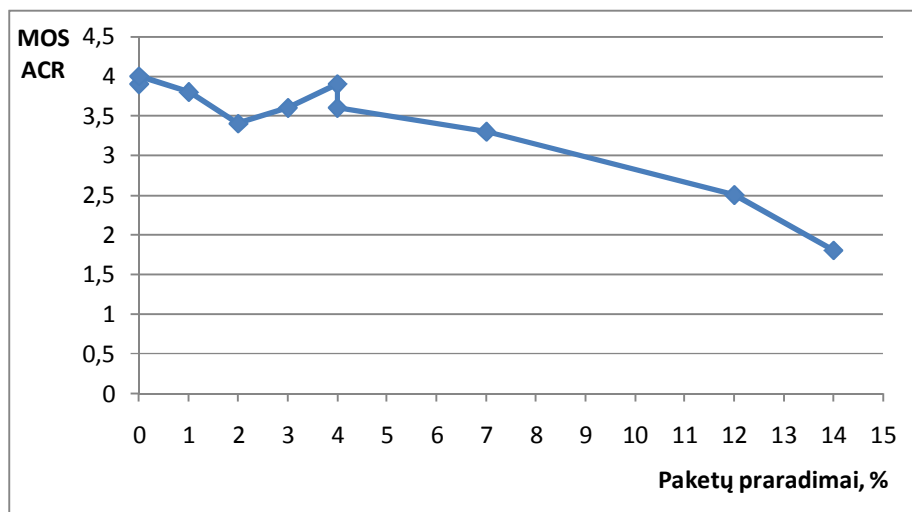
Taško Nr.	MOS ACR įvertis	Vėlinimas (RTT), ms	Paketų praradimai, %
1	4,2 ($\pm 0,29$)	39	1
2	3,8 ($\pm 0,46$)	92	4
3	2,5 ($\pm 0,5$)	361	12
4	1,8 ($\pm 0,46$)	432	14
5	3,6 ($\pm 0,37$)	128	3
6	3,4 ($\pm 0,37$)	73	2
7	4,0 ($\pm 0,35$)	57	0
8	3,6 ($\pm 0,37$)	146	4
9	3,3 ($\pm 0,35$)	208	7
10	3,9 ($\pm 0,53$)	22	0

Pagal 22 lentelėje pateiktus duomenis galima gauti balso kokybės priklausomybę nuo paketų vėlinimo į abi puses ir paketų praradimo. Priklausomybę vaizduojantys grafikai pateikti, žemiau esančiuose, paveiksluose.



4.4pav. Subjektyvaus vertinimo MOS įverčio priklausomybė nuo paketų vėlinimo

Paveiksle 4.4 pavaizduota balso kokybės MOS įverčio priklausomybė nuo vėlinimo į abi puses, matome, kad viršijus 150 ms ribą MOS įvertis mažėja labiau, tačiau tokį kokybės pablogėjimą lemia paketų praradimai. Dažniausiai didėjant paketų vėlinimui, didėja ir paketų praradimo reikšmė. Balso kokybės įverčio priklausomybė nuo paketų praradimo pavaizduota 4.5 paveiksle. Iš pateiktų grafikų matome, kad kreivės abiejuose paveiksluose labai panašios, nes labiausiai balso kokybę įtakoja paketų praradimas (tuo bus galima įsitikinti kai atliksime MOS įverčio prognozavimą taikant E-modelį).



4.5 pav. Subjektyvaus vertinimo MOS įverčio priklausomybė nuo paketų praradimo

Taip yra, nes paketų praradimas daro didžiausią įtaką balso aiškumui, žodžių suprantamumui. Tuo tarpu vėlinimo įtaka yra mažesnė. Didėjant vėlinimui, prastėja garso įrašo kokybė – stipresnis foninis triukšmas, balsas, esantis eksperimentiniame įrašė, skiriasi nuo balso, esančio originaliame įrašė.

4.4 OBJEKTIVIAUS VERTINIMO EKSPERIMENTAS

Subjektyvaus vertinimo eksperimentai reikalauja daug laiko ir resursų, balso kokybės vertinimui, dažnai taikomi objektyvaus vertinimo modeliai. Vienas iš pagrindinių ir dažniausiai naudojamų modelių yra vertinimo modelis, pagrįstas PESQ algoritmu. Taigi šiame skyrelyje bus atliekamas kokybės vertinimo eksperimentas taikant PESQ algoritmą pagal ITU-T P.862 rekomendaciją.

Eksperimento esmė – taikant PESQ algoritmą gauti suprojektuotos telefono sistemos perduodamo balso kokybės įvertinimus MOS skalėje. Eksperimentas atliekamas pagal 4.2 paveiksle pavaizduotą schemą (taip pat kaip ir subjektyvaus vertinimo metodu). Originalus balso įrašas „Org1” perduodamas iš taško pažymeto „VartotojasA” į taškus pažymėtus atitinkamu numeriu (Taškas1, Taškas2, Taškas3...). Gavėjo taške balso signalas įrašomas. Taikant PESQ algoritmą, lyginant įrašą „Org1” su įrašu po perdavimo „Taškas1” (1,2,3...) nustatomas balso kokybės įvertis, kuris išreiškiamas balais pagal MOS skalę. Įrašų palyginimui naudojama „Pesqmain” programa, kuri paleidžiama „Windows” komandiniame lange surinkus komandą „pesqmain.exe”. Programa pavaizduota 4.6 paveiksle.

```

Administrator: C:\Windows\system32\cmd.exe
D:\PESQ\PESQM>
D:\PESQ\PESQM>
D:\PESQ\PESQM>
D:\PESQ\PESQM>
D:\PESQ\PESQM>
D:\PESQ\PESQM>pesqmain.exe
Usage:
  PESQ HELP           Displays this text
  PESQ loptionsl ref deg
  Run model on reference ref and degraded deg

Options: +8000 +16000 +swap +wb
Sample rate - No default. Must select either +8000 or +16000.
Swap byte order - machine native format by default. Select +swap for byteswap.
Default mode of operation is P.862 (narrowband handset listening). Select +wb
to use P.862.2 wideband extension (headphone listening).

File names may not begin with a + character.

Files with names ending .wav or .WAV are assumed to have a 44-byte header, which
is automatically skipped. All other file types are assumed to have no header.

D:\PESQ\PESQM>_

```

4.6 pav. PESQ programa

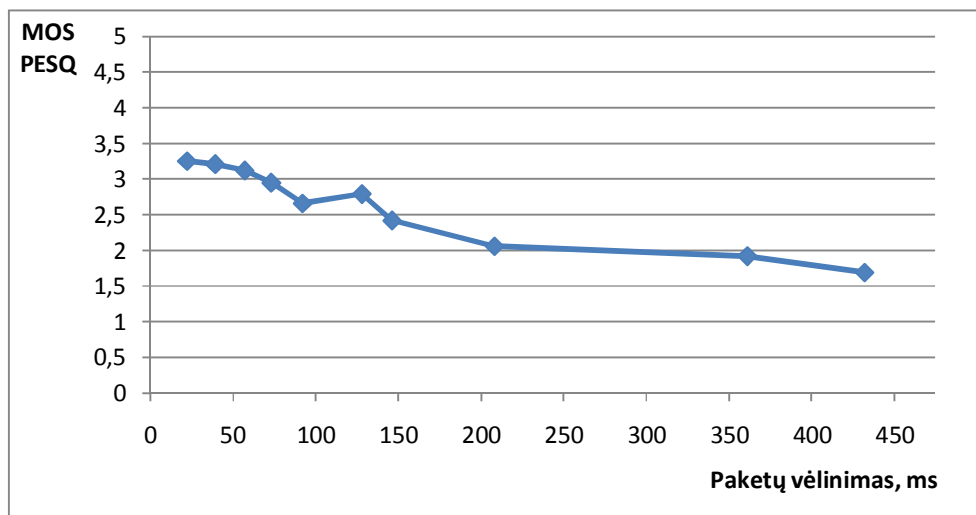
Programą „Pesqmain” galima gauti sukompiliavus atitinkamas bylas kurios pateiktos kartu su ITU-T P.862 rekomendacija, bylos pateiktos „C” programavimo kalbos formate. Balso kokybės nustatymui naudojami 20 sekundžių „wav” formato kalbos įrašai. Kokybės nustatymas atliekamas surinkus komandą: „ pesqmain.exe +16000 <originalaus įrašo pavadinimas> <įrašo po perdavimo pavadinimas> ”. Taigi atlikus eksperimentą, gaunama dešimties sujungimų perduodamo balso kokybės įvertinimai MOS skalėje (PESQ MOS), rezultatai pateikti 23 lentelėje.

23 lentelė. MOS PESQ rezultatai

Sujungimo taško Nr.	MOS PESQ įvertis	PV – paketų vėlinimas, ms	PP – paketų praradimai, %
1	3.218	39	1
2	2.663	92	4
3	1.685	361	12
4	2.061	432	14
5	2.789	128	3
6	2.952	73	2
7	3.118	57	0
8	2.423	146	4
9	1.919	208	7
10	3.251	22	0

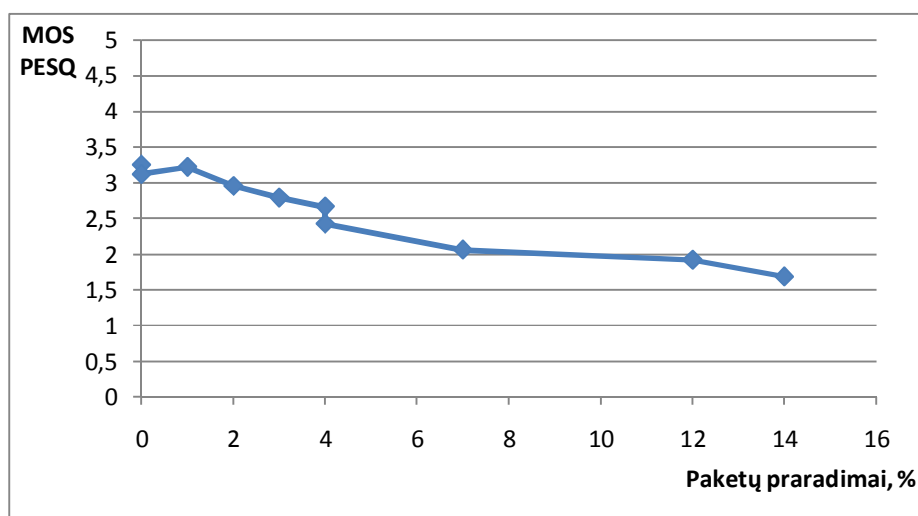
Iš lentelėje pateiktų rezultatų galima pastebėti kad gauti rezultatai žymiai žemesni nei subjektyvaus vertinimo metu, nes atliekant ekeperimetnus, pagrįstus PESQ algoritmo taikymu, žymiai labiau vertinamas signalo tono pakitimas, foniniai triukšmai ir signalo praradimai dėl balso paketų praradimo. Kaip išsiaiškinome 3.2 skyrelyje, naudojant G.711 balso kodavimo algoritmą, pagal

nutylėjimą paketo dydis yra 20 ms ir per sekundę išsiunčiama 50 paketų (50 paket/s). Dėl paketų vėlinimo padidėjimo atsiranda aidas, padidėja foniniai triukšmai. Padidėjus paketų praradimams atsiranda kalbos pertraukimai, kur kalbos paketai buvo prarasti. Pagal atlikto eksperimento kokybės vertinimo rezultatus galime gauti MOS įverčio priklausomybę nuo vėlinimo suprojektuotoje telefono sistemoje (paveikslas 4.7).

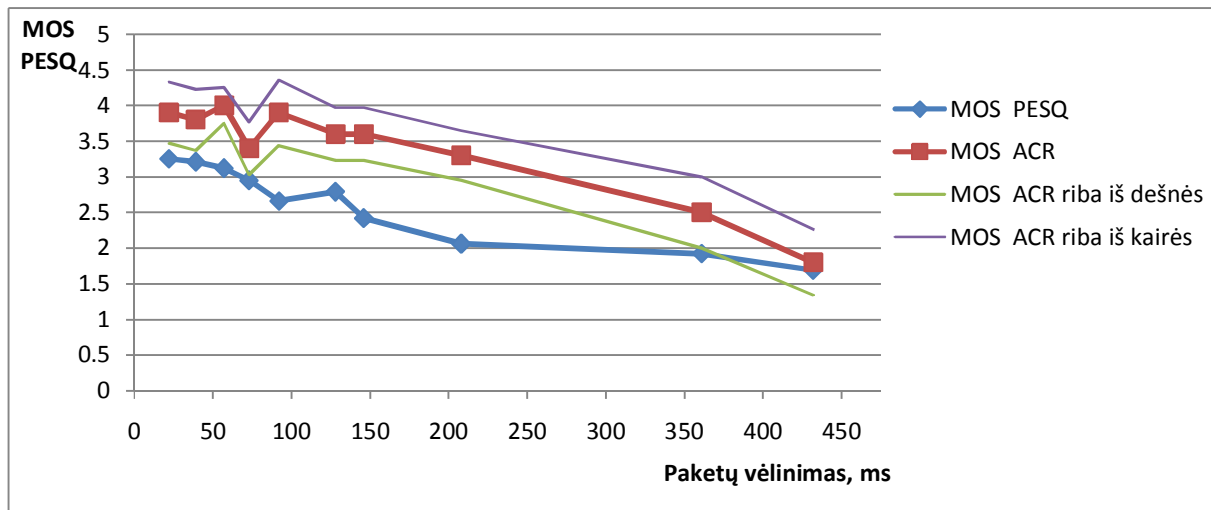


4.7 pav. MOS įverčio priklausomybė nuo paketų vėlinimo pagal PESQ algoritmą

Kaip matome iš 4.7 paveikslo grafiko, didėjant paketų vėlinimui balso kokybės įvertis mažėja nevysiškai tiesiškai, taip yra dėl paketų praradimo įtakos balso kokybei. Kokybės įverčio priklausomybė nuo paketų praradimo pavaizduota 4.8 paveiksle. Matome kad grafikas labiau panašus į tiesę nei 4.7, iš to galima daryti išvadą kad balso kokybę labiausiai įtakoja paketų praradimai.



4.8 pav. MOS įverčio priklausomybė nuo paketų praradimo pagal PESQ algoritmą



4.9 pav. MOS ACR ir MOS PESQ palyginimas

Aukščiau esančiame 4.9 paveiksle pavaizduotas MOS ACR ir MOS PESQ priklausomybių palyginimas. Matome, kad grafikai žymiai skiriasi, MOS PESQ kokybės įverčio rezultatai ženkliai žemesni, nes vykdant klausymosi testus respondantai, vertindami įrašus primiršta įrašo pradžioje buvusių trukdžių ir triukšmus, tuo tarpu PESQ vertinimo modelis užfiksuoja visus netikslumus ir skirtumus tarp originalaus įrašo ir pablogėjusio įrašo.

4.5 R KOEFICIENTO SKAIČIAVIMAS

Balso kokybės įvertinimas dažnai reikalingas, dar prieš diegiant ar projektuojant telekomunikacinius tinklus, tokia galimybė yra taikant telekomunikacinio tinklo E-modelį. Taikant šį modelį pagal tinklo parametrus ir aplinkos veiksnus galima apskaičiuoti R koeficientą, kuris yra balso kokybės vertinimo rezultatas ir gali būti perskaičiuotas į MOS įvertį.

Taigi šiame skyrelyje apskaičiuosime, superjektuotos telefono sistemos, perduodamo balso kokybės prognozuojamus įverčius – R koeficiento reikšmes (dešimčiai sujungimų pagal 4.2 paveikslą), kurios bus perskaičiuojamos į MOS skalę. Kaip pavyzdį atliksime skaičiavimus, sujungimo Nr.1 atveju. R koeficientas apskaičiuojamas pagal 4.6 formulę.

$$R = R_o - I_s - I_d - I_e + A \quad (4.6)$$

R_o – koeficientas parodo signalo triukšmo santykį, įvertinant įvairius aplinkos triukšmus, garsumo lygį siuntimo pusėje, aidų lygį, garsumo lygį. Apskaičiuojamas tokia tvarka:

$$R_o = 15 - 1.5(SLR + No) \quad (4.7)$$

SLR – garsumo lygis siuntimo pusėje (pagal nutylėjimą 8 dB).

$$N_o = 10 \lg \left[10^{\frac{N_c}{10}} + 10^{\frac{N_{os}}{10}} + 10^{\frac{N_{or}}{10}} + 10^{\frac{N_{fo}}{10}} \right] \quad (4.8)$$

N_o – įvairių šaltinių sukuriamas triukšmų lygis.

$N_c = -70$ dBm (reikšmė pagal nutylėjimą, tinklo grandinių bendras triukšmų lygis).

$N_{os} = -69$ dBm (reikšmė gaunama pagal 5 formulę).

$$N_{os} = P_s - SLR - D_s - 100 + 0.004(P_s - OLR - D_s - 14)^2 \quad (4.9)$$

$P_s = 35$ dB (reikšmė pagal nutylėjimą, kambario triukšmo lygis siuntimo pusėje)

$D_s = 3$ (reikšmė pagal nutylėjimą, koeficientas siuntėjo pusėje)

$OLR = SLR + RLR = 2 + 8 = 10$ dB (reikšmės pagal nutylėjimą)

SLR – garsumo lygis gavėjo pusėje (pagal nutylėjimą 2 dB).

$N_{or} = -77$ dBm (reikšmė gaunama pagal 6 formulę).

$$N_{or} = RLR - 121 + Pre + 0.008(Pre - 35)^2 \quad (4.10)$$

$$Pre = Pr + 10 \lg \left[1 + 10^{\frac{(10 - LSTR)}{10}} \right] = 36 \quad (4.11)$$

$LSTR$ – tonas gavėjo pusėje (pagal nutylėjimą 18 dB).

$N_{fo} = -56$ dBm (reikšmė gaunama pagal 4.11 formulę).

$$N_{fo} = N_{for} + RLR \quad (4.12)$$

N_{for} – žemutinė triukšmo lygio riba (pagal nutylėjimą -64 dBmp).

Apskaičiavus visus koeficientus, gaunama reikšmė $N_o = -55,6$ pagal 4.8 formulę. Ir pagal 4.7 formulę gaunama **$R_o = 94,4$** .

I_s – koeficientas, įvertinantis balso kokybės pablogėjimą dėl kvantavimo triukšmų, apskaičiuojamas tokia tvarka:

$$I_s = I_{olr} + I_{st} + I_q \quad (4.13)$$

$I_{olr} = 0,4$ (nepakankamo garsumo lygis) apskaičiuojamas taip:

$$I_{olr} = 20 \left[\left\{ 1 + \left(\frac{X}{8} \right)^8 \right\}^{\frac{1}{8}} - \frac{X}{8} \right] \quad (4.14)$$

$$X = OLR + 0.2(64 + N_o - RLR) = 10 + 0.2(64 - 55,6 - 8) = 10,08 \quad (4.15)$$

$I_{st} = 0,4$ (aplinkos triukšmo lygis) apskaičiuojamas taip:

$$I_{st} = 10 \left[1 + \left(\frac{STMRO - 12}{5} \right)^6 \right]^{\frac{1}{6}} - 46 \left[1 + \left(\frac{STMRO}{23} \right)^{10} \right]^{\frac{1}{10}} + 36 \quad (4.16)$$

$$STMRO = -10 \lg \left[10^{-\frac{STM}{10}} + e^{\frac{T}{4}} 10^{-\frac{TELR}{10}} \right] = 15 \quad (4.17)$$

STM = 15 dB (reikšmė pagal nutylėjimą, triukšmo lygis)

TELR = 65 dB (reikšmė pagal nutylėjimą, aido lygis)

$I_q = 0,97$ (kvatavimo triukšmų įtakos koeficientas) apskaičiuojamas pagal tokia formulę:

$$I_q = 15 \lg [1 + 10^Y + 10^Z] \quad (4.18)$$

$$Y = \frac{R_o - 100}{15} + \frac{46}{8,4} - \frac{G}{9} = -5,1 \quad Z = \frac{46}{30} - \frac{G}{40} = -0,79 \quad (4.19)$$

$$G = 1,07 + 0,258Q + 0,0602Q^2 = 93 \quad Q = 37 - 15 \lg(qdu) = 37 \quad (4.20)$$

qdu = 1 (reikšmė pagal nutylėjimą)

Taigi pagal 4.13 formulę apskaičiuojama I_s koeficiento reikšmė $I_s = 1,77$. Koeficientų R_o ir I_s reikšmės visiems dešimt telefono sistemos sujungimų bus vienodos, taip pat aplinkybių koeficientas visada bus $A = 5$ (reikšmė pagal nutylėjimą).

I_d – koeficientas, įvertinantis balso kokybės pablogėjimą dėl vėlinimo ir aido efekto. Kaip pavyzdį skaičiuosime sujungimo Nr.1 atveju. Apskaičiuojama tokia tvarka:

$$I_d = I_{dte} + I_{dle} + I_{dd} \quad (4.21)$$

I_{dte} ir I_{dle} įvertina balso kokybės pablogėjimą dėl aido efekto, atitinkamai – siunčiančioje ir priimančioje puseje. $I_{dte} = 0,05$ apskaičiuojamas taip:

$$I_{dte} = \left[\frac{Roe - Re}{2} + \sqrt{\frac{(Roe - Re)^2}{4} + 100} - 1 \right] (1 - e^{-T}) \quad (4.22)$$

$$Roe = -1,5(No - RLR) = 95,4 \quad (4.23)$$

$$Re = 80 + 2,5(TErv - 14) = 188,5 \quad (4.24)$$

$$TERV = TELR - 40 \lg \frac{1 + \frac{T}{10}}{1 + \frac{T}{150}} + 6e^{-0.3T^2} = 57,4 \quad (4.25)$$

TELR = 65 dB (reikšmė pagal nutylėjimą, aido lygis)

T = 6 ms (paketų vėlinimas į vieną pusę).

$I_{dle} = 0,29$ apskaičiuojamas taip:

$$Idle = \frac{Ro - Rle}{2} + \sqrt{\frac{(Ro - Rle)^2}{4} + 169} \quad (4.26)$$

$$Rle = 10.5(WEPL + 7)(Tr + 1)^{-0.25} = 663,39 \quad (4.27)$$

WEPL = 110 dB (reikšmė pagal nutylėjimą, aido slopinimas)

Tr = 11 ms (paketų vėlinimas į abi puses).

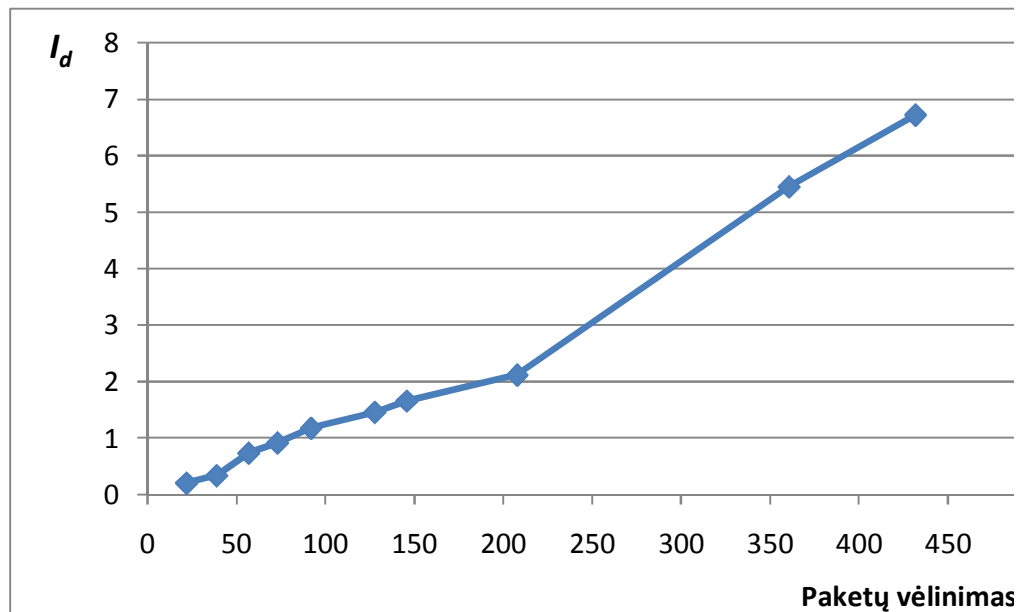
$Idd = 0$, kai $Ta < 100$ ms (Ta – absoliutus vėlinimas).

Taigi pagal 18 formulę gaunama I_d reikšmė $I_d = 0,34$. Taip apskaičiuotos koeficiento reikšmės visiems dešimčiai sujungimų (pagal 4.2 paveikslą). Lentelėje 24 pateikti skaičiavimo rezultatai. Paveiksle 4.5 atvaizduota koeficiento priklausomybė nuo vėlinimo.

24 lentelė. I_d – koeficiento reikšmės

Sujungimo taško Nr.	I_d – koeficiento reikšmė	PV – paketų vėlinimo reikšmė (RTT), ms
1	0,34	39
2	1,18	92
3	5,45	361
4	6,72	432
5	1,46	128
6	0,92	73
7	0,74	57
8	1,66	146
9	2,13	208
10	0,21	22

Koeficiento I_d priklausomybė nuo paketų vėlinimo (RTT) gaunama su sąlyga kad paketų keliavimo laikas pirmyn lygus keliavimo laikui atgal.



4.10 pav. Koeficiento I_d priklausomybė nuo vėlinimo

Aukščiau esančiame paveiksle, galima pastebėti kad iki 200 ms paketų vėlinimo I_d koeficiento reikšmė didėja tiesiškai, paketų vėlinimui viršijus 200 ms ribą koeficientas didėja žymiai sparčiau, nes įvertinama I_{dd} dedamoji.

I_e – koeficiento, įvertinančio balso kokybės pablogėjimą dėl paketų praradimo reikšmės gaunamos iš ITU-T G.113 rekomendacijos. Koeficiento reikšmės pateiktos 25 lentelėje.

25 lentelė. I_e – koeficiento reikšmės

I_e – koeficiento reikšmė	PP – paketų praradimo reikšmė, %
2	0
4	0,5
6	1
8	1,5
10	2
14	3
18	4
32	7
36	12
40	14
44	16

Žinodami koeficientus: R_o , I_s , I_d , I_e , A galima apskaičiuoti R koeficiento reikšmes pagal 4.28 formulę (suprojektuotoje telefono sistemoje didžiąją dalį tinklo sudaro kabelinis tinklas todėl $A=0$). Gauti rezultatai pateikti 26 lentelėje. R koeficiento reikšmės galima perskaičiuoti į MOS skalės vertes pagal 4.29 formulę.

$$R = R_o - I_s - I_d - I_e \quad (4.28)$$

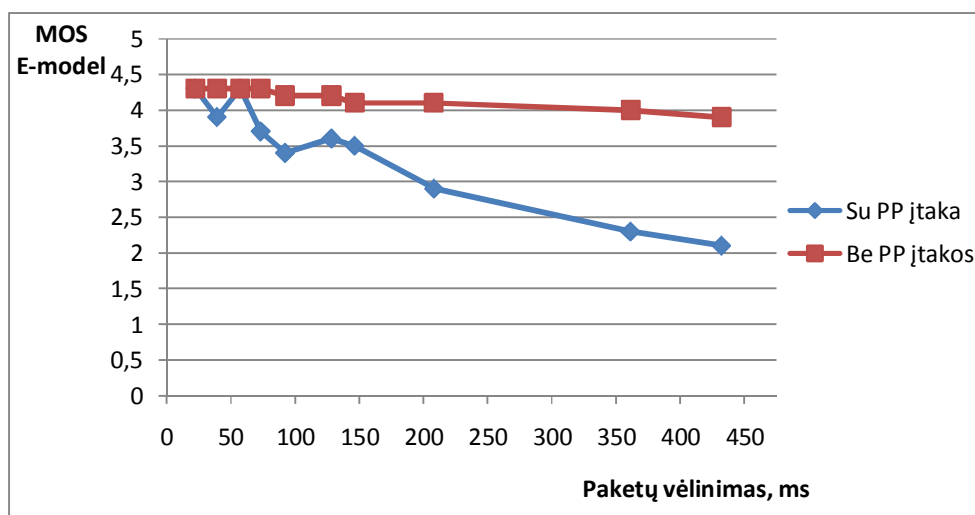
$$\text{MOS} = 1 + 0.035R + R(R - 60)(100 - R)7 \cdot 10^{-6}, \text{ kai } 0 < R < 100 \quad (4.29)$$

$$\text{MOS} = 4,5, \text{ kai } R > 100 \quad \text{MOS} = 1, \text{ kai } R < 0$$

26 lentelė. MOS prognozavimas

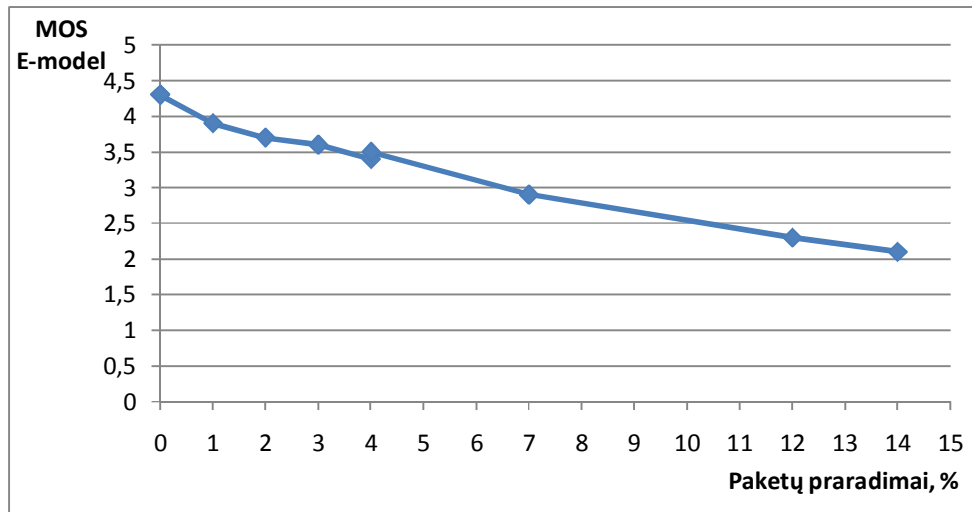
Sujungimo taško Nr.	R– koeficiento reikšmė	Prognozuojamas MOS E-model įvertis	PV – paketų vėlinimas, ms	PP – paketų praradimai, %
1	90,3	4.3	39	1
2	78,8	3.4	92	4
3	51,8	2.3	361	12
4	43,3	2.1	432	14
5	77,4	3.6	128	3
6	81,8	3.7	73	2
7	90,3	4.3	57	0
8	73,3	3.5	146	4
9	57,6	2.9	208	7
10	91	4.3	22	0

Atlikus skaičiavimus taikant telekomunikacinio tinklo E-modelį, gauti suprojektuotos telefono sistemos, perduodamo balso kokybės vertinimo rezultatai, tačiau tai nėra tikrasis MOS vertinimas (vertinimas pagal vartotojo nuomonę), tai tik prognozuojamos kokybės vertinimo reikšmės, kurios gali būti panašios į gautas, atlikus subjektyvaus vertinimo eksperimentą. Kadangi skaičiavimai buvo atliekami su sąlyga, kad paketų vėlinimo laikas į abi puses buvo vienodas, galima gauti balso kokybės priklausomybę nuo paketų vėlinimo (RTT).



4.11 pav. Prognozuojamo MOS įverčio priklausomybė nuo paketų vėlinimo pagal E-modelį

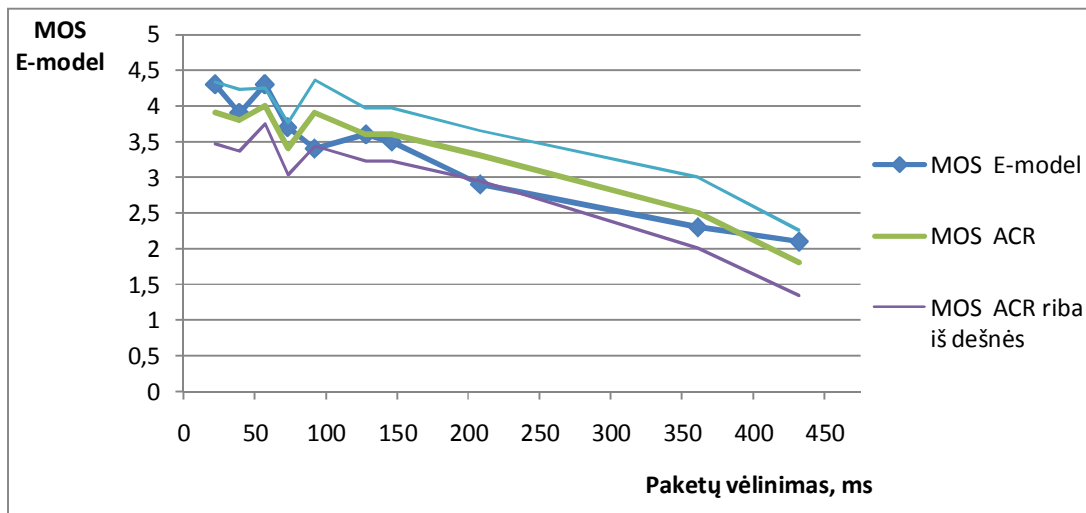
Paveiksle 4.11 pavaizduoti du grafikai, raudona linija žymimas grafikas parodo balso kokybės priklausomybę nuo paketų vėlinimo be paketų praradimo įtakos. Mėlina linija žymimas grafikas parodo balso kokybės priklausomybę nuo paketų vėlinimo laiko su paketų praradimo įtaka. Kaip matome grafikai stipriai skiriasi.



4.12 pav. Prognozuojamo MOS įverčio priklausomybė nuo paketų praradimo pagal E-modelį

Paveiksle 4.12 pavaizduota balso kokybės priklausomybė nuo paketų praradimo, kaip matome kokybės įvertis tiesiškai mažėja didėjant paketų praradimui. Paketų praradimams pasiekus 3 % ribą, balso kokybė nuo labai geros (MOS = 4,3) sumažėja iki patenkinamos (MOS = 3,5), tai patvirtina ITU-T rekomendacijų nurodymus, kad VoIP sistemos turėtų būti projektuojamos tinkluose, kuriuose paketų praradimai neviršija 3 % ribos, tačiau dauguma IP tinklų šios salygos netenkina, o ypač viešojo interneto tinklai. Iš grafiko matome kad paketų praradimui pasiekus 14 % ribą, prognozuojama balso kokybė labai bloga (MOS = 2), o tai ypač tikėtina padidėjus tinklo vartotojų skaičiui.

Iš paveikslo 4.11 grafikų matome, kad didėjant paketų vėlinimui balso kokybės įvertis mažėja nežymiai. Pasiekus 500 ms paketų vėlinimo ribą balso kokybė sumažėja nuo labai geros (MOS = 4,3) iki geros (MOS = 3,9), tačiau balso kokybė stipriai sumažėja atsiradus paketų praradimams. Tai patvirtina išvadas, padarytas atlikus subjektyvaus ir objektyvaus vertinimo eksperimentus, kad pagrindinis veiksnys lemiantis perduodamo balso kokybę yra paketų praradimai, o paketų vėlinimo įtaka nedidelė. Taigi galima būtų manyti kad paketų vėlinimo VoIP sistemose galima būtų nepaisyti, tačiau dažniausiai didėjant paketų vėlinimui kartu didėja ir paketų praradimai. Be to vėlinimui viršijus 500 ms ribą, balso signalas vartotoją pasiekia pavėliuotai ir VoIP sistemos abonentui atrodo kad jo pašnekovas yra pavargęs, nelaiku atsako į klausimus, darosi sunku susikalbėti.



4.13 pav. MOS E-model ir MOS ACR palyginimas

Pveiksle 4.13 pavaizduotas MOS E-model ir MOS ACR kokybės įverčių palyginimas, kaip matome rezultatai gauti, taikant telekomunikacinio tinklo E-modelį, patenka į pasikliautinojo intervalo ribas, rezultatų gautų, atlikus MOS ACR kausymosi testus. Galime daryti išvadą, kad E-modelio taikymas, žymiai labiau tinka balso kokybės vertinimui VoIP sistemose, nei PESQ algoritmo taikymas.

4.6 VQ ĮVERTIS

Atlikus subjektyvaus ir objektyvaus vertinimo eksperimentus bei kokybės prognozavimo skaičiavimus, matome kad kokybės vertinimas gan sudėtingas ir nemažai laiko reikalaujantis procesas. O norint padidinti VoIP sistemos paslaugų kokybę, keičiant tinklo parametrus, dažniausiai reikia atklikti ar pakartoti kokybės vertinimo procedūras keleta kartų, o tam sugaištama daug laiko ir resursų. Norint to išvengti naudojami kokybės valdymo ir stebėjimo programiniai paketai, leidžiantys stebėti perduodamo balso kokybę ir VoIP sistemų darbą realiu laiku. Šiame skyrelyje aptariami blaso kokybės stebėjimo rezultatai, naudojantis „Image Engine VQ Manager“ programiniu paketu. Perduodamo balso kokybės stebėjimai buvo atlikti pagal 4.2 paveiksle pavaizduotą schemą (kaip ir ankščiau aprašytuose eksperimentuose). Buvo atlikta dešimties sujungimų – telefoninių pokalbių kokybės stebėjimas, stebimi parametrai:

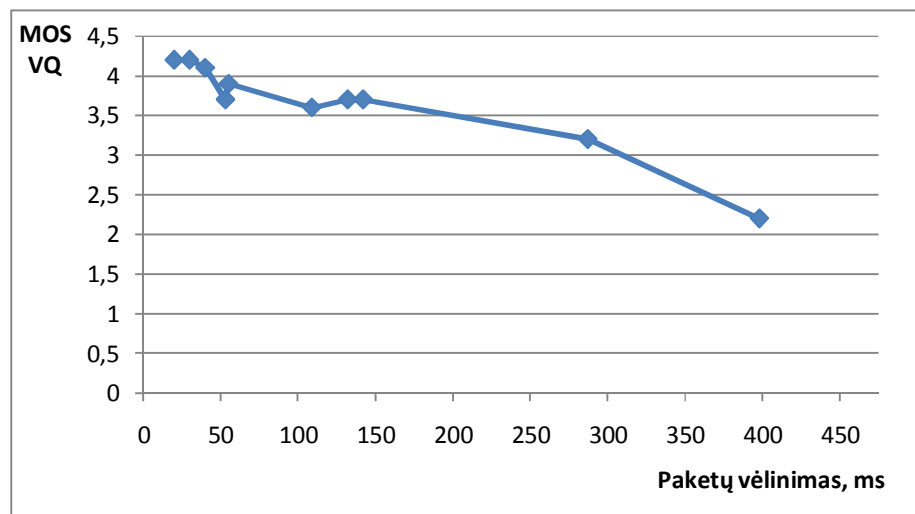
- paketų vėlinimas;
- paketų praradimai;
- R koeficiento reikšmė;
- MOS įverčio reikšmė.

Stebėjimo rezultatai pateikti 27 lentelėje.

27 lentelė. VQ MOS reikšmės

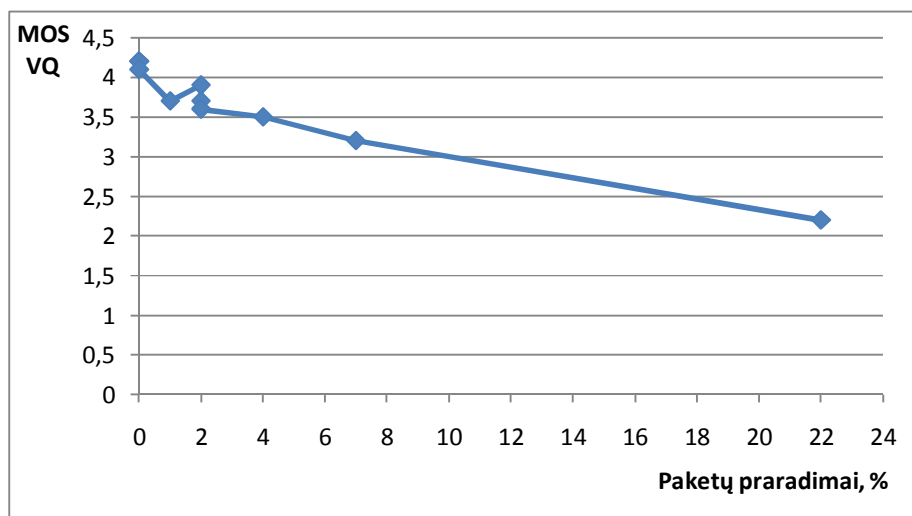
Taško Nr.	MOS VQ įvertis	R koeficientas	Vėlinimas (RTT), ms	Paketų praradimai, %
1	4,2	92	20	0
2	3,9	80	55	2
3	3,2	65	287	7
4	2,2	36	398	22
5	3,7	77	142	2
6	3,7	77	53	1
7	4,1	91	40	0
8	3,6	84	109	2
9	3,5	82	132	4
10	4,1	92	30	0

Lentelėje pateikti IP tinklo parametrai skiriasi nuo kitų eksperimentų naudojamų tinklo parametrų, nes buvo matuojami ne tuo pačiu metu (atlikti keleta eksperimentų tuo pačiu metu labai sudėtinga), todėl gauti balso kokybės vertinimo rezultatai skiriasi nuo gautų anksčiau atliktuose subjektyvaus ir objektyvaus vertinimo eksperimentuose. Žemiau esančiuose paveiksluose pavaizduoti balso kokybės įverčio (pagal MOS skalę) priklausomybių nuo paketų vėlinimo ir praradimo grafikai.



4.14pav. VQ MOS įverčio priklausomybė nuo paketų vėlinimo

Paveiksle 4.14 pavaizduotas grafikas nėra tiesė, nes kaip minėjome anksčiau pagrindinis veiksnys darantis įtaką balso kokybei yra paketų praradimai. Balso kokybės priklausomybė nuo paketų praradimo pavaizduota 4.15 paveiksle. Iš grafikų galima pastebėti kad gauti rezultatai panašūs į gautus, atlikus subjektyvaus vertinimo eksperimentą ir MOS įverčio prognozavimo skaičiavimus.



4.15 pav. VQ MOS įverčio priklausomybė nuo paketų praradimo

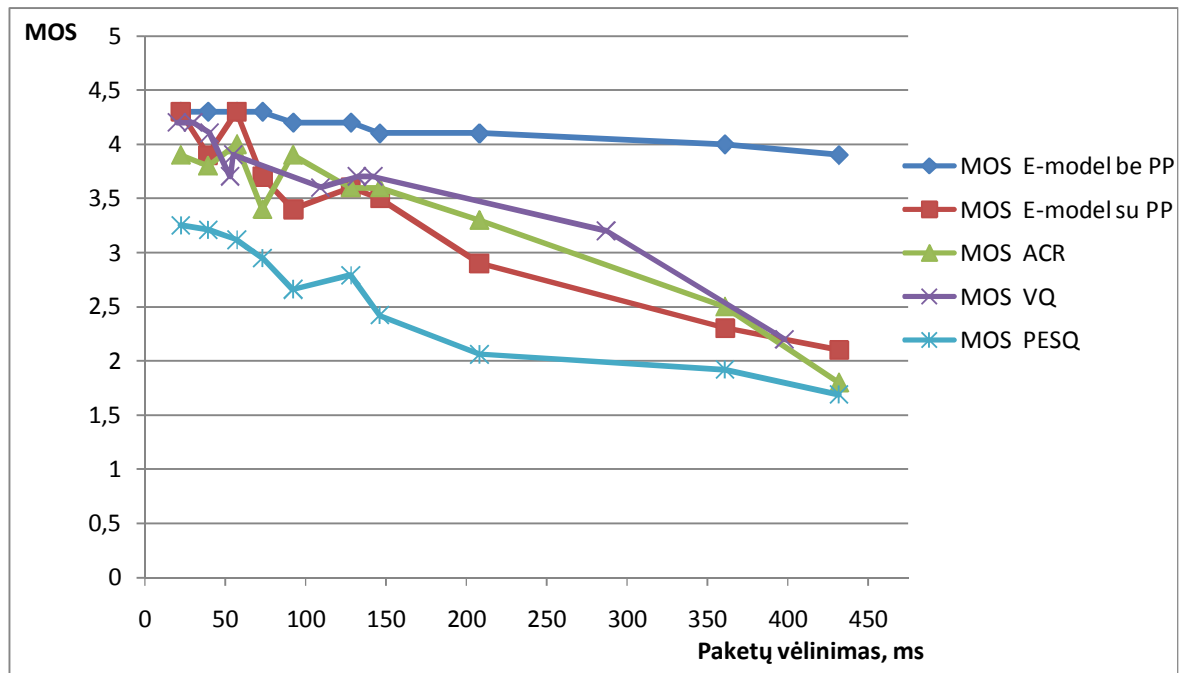
Atlikus, suprojektuotos telefono sistemos, perduodamo balso kokybės stebėjimus, naudojant „Image Engine VQ Manager“ programinį paketą, galima būtų manyti kad toks balso kokybės vertinimo būdas vienas iš geriausių variantų, galintis pakeisti subjektyvaus vertinimo metodus. Tačiau toks balso kokybės vertinimo būdas nevisiškai atspindi VoIP paslaugos kokybę nes remiasi tik suprojektuotos sistemos tinklo parametrais. Išsamesnis rezultatų, gautų įvairiais kokybės vertinimo metodais ir būdais, palyginimas aptariamas kitame skyrelyje.

4.7 GAUTŲ REZULTATŲ PALYGINIMAS

Šiame darbe buvo suprojektuota VoIP telefono sistema SIP protokolo pagrindu ir realizuota Vilniaus miesto viešojo interneto tinkle. Atliktas VoIP paslaugos – perduodamo balso kokybės tyrimas:

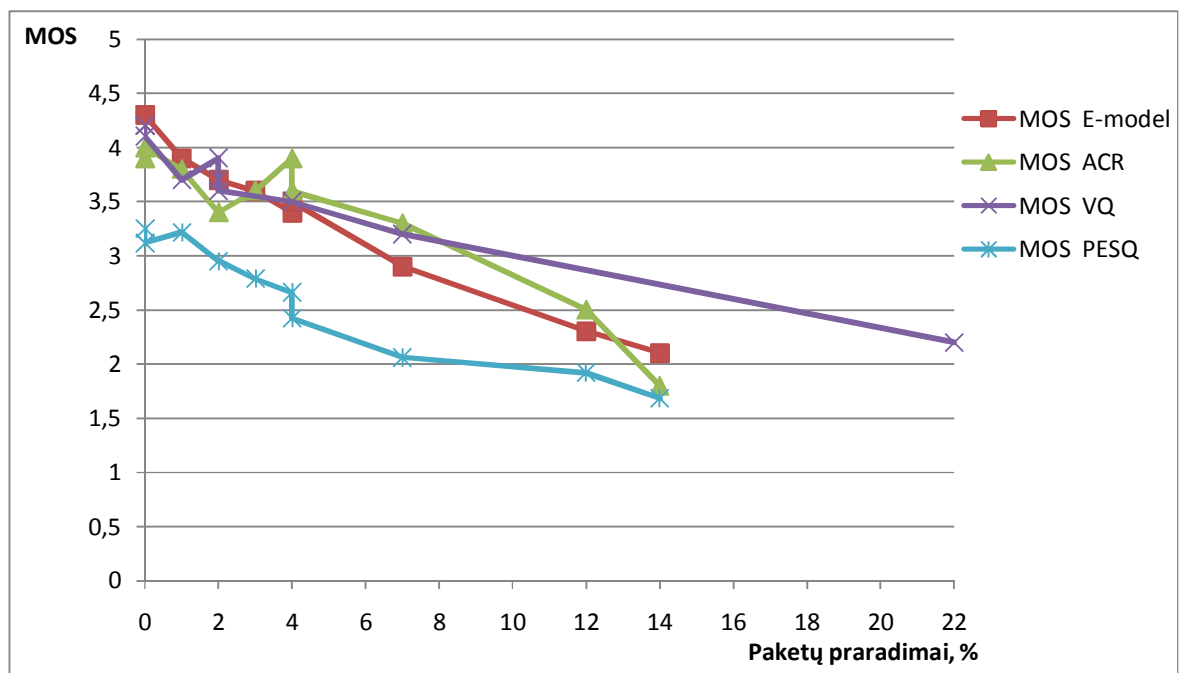
- Subjektyvaus vertinimo eksperimentas ACR metodu.
- Objektyvaus vertinimo eksperimentas taikant PESQ algoritmą.
- R koeficiento skaičiavimas – MOS prognozavimas taikant telekomunikacinio tinklo E-modelį.
- VoIP sistemos balso kokybės stebėjimas naudojant „Image Engine VQ Manager“.

Atlikus eksperimentus, skaičiavimus ir stebėjimus visi rezultatai gauti pagal MOS vertinimo skalę. Gautas, suprojektuotos telefono sistemos, perduodamo balso kokybės MOS įverčio priklausomybės nuo paketų velinimo ir praradimo. Priklausomybių grafikų palyginimas pavaizduotas 4.16 ir 4.17 paveiksluose. Iš grafikų pateiktų 4.16 paveiksle matome kad paketų vėlinimo didėjimas nežymiai įtakoja balso kokybę (naudojant G.711 kodavimo algoritmą), pagrindinis ir didžiausią įtaką darantis veiksnys paketų praradimai (dėl to grafikai tampa netiesiški).



4.16 pav. MOS įverčio priklausomybių nuo paketų vėlinimo palyginimas

Iš grafikų galima pastebėti, kad priklausomybės gautos subjektyvaus vertinimo metodu, MOS prognozavimo būdu pagal E-modelį ir atlikus stebėjimus naudojant „Image Engine VQ Manager“ yra panašios, o rezultatai, gauti taikant PESQ algoritmą žymiai mažesni, nors kreivė ir panašaus pobūdžio. Todėl galima būtų manyti kad PESQ algoritmas netinka VoIP paslaugų kokybės vertinimui, o labiau tinkamas, kai reikia atlikti mažo skirtumo balso kokybės matavimus.



4.17 pav. MOS įverčio priklausomybių nuo paketų praradimo palyginimas

Taip pat būtų galima manyti kad lengviausias ir optimaliausias būdas vertinti perduodamo balso kokybę VoIP sistemose yra – naudojant programinius kokybės stebėjimo paketus, kaip „Image Engine VQ Manager“, nes subjektyvaus vertinimo atveju sugaištama daug laiko, o vertinimo rezultatai labai priklauso nuo eksperimento dalyvių – žmonių individualumo. Be to kiekvieną kartą pakartojus subjektyvaus vertinimo eksperimentą gaunami skirtingi rezultatai.

Suvidurkinus balso kokybės rezultatus, gaunamas bendras, suprojektuotos telefono sistemos VoIP paslaugos, kokybės rodiklis, taikant atitinkamą būdą ar metodą. Gauti rezultatai pateikti 28 lentelėje.

28 lentelė. VoIP paslaugos kokybė

Taško Nr.	MOS ACR	MOS PESQ	MOS E-model	MOS VQ	
1	4,2	3.218	4.3	4,2	
2	3,8	2.663	3.4	3,9	
3	2,5	1.685	2.3	3,2	
4	1,8	2.061	2.1	2,2	
5	3,6	2.789	3.6	3,7	
6	3,4	2.952	3.7	3,7	
7	4,0	3.118	4.3	4,1	
8	3,6	2.423	3.5	3,6	
9	3,3	1.919	2.9	3,5	
10	3,9	3.251	4.3	4,1	
					Bendras
Vidurkis	3,4	2,6	3,4	3,6	3,3

Taigi iš lentelėje pateiktų duomenų matome kad suprojektuotos VoIP telefono sistemos, realizuotos Vilniaus miesto viešojo interneto tinkle, paslaugos kokybė yra vidutinė arba patenkinama. Tačiau tai yra tik dešimties abonentinės telefono sistemos, didėjant abonentų skaičiui, didės paketų vėlinimai ir praradimai, todėl kokybė mažės. Taigi nesikišant į IP tinklo valdymą, teikti kokybiškų VoIP paslaugų neįmanoma, būtina imtis kokybę užtikrinančių priemonių. Pagrindinė problema, lemianti žemą paslaugos kokybę, IP tinklo paketų praradimai.

IŠVADOS

Šiame darbe buvo apžvelgta VoIP technologijos specifika, suprojektuota VoIP sistema, SIP protokolo pagrindu. Telefono sistema įdiegta Vilniaus miesto viešojo interneto tinkle, ir atliktas VoIP paslaugos – perduodamo balso (IP tinklu) kokybės tyrimas, taikant subjektyvaus ir objektyvaus balso kokybės vertinimo metodus.

Projektuojant telefono sistemą, atlikus Vilniaus miesto viešojo interneto tinklo pralaidumo juostos, paketų vėlinimo, paketų praradimo matavimus paaiškėjo kad, kai kuriais atvejais tinklas neatitinka ITU-T rekomendacijose pateiktų nurodymų, nes viešojo interneto tinklas yra labai nepastovių parametrų tinklas. Vienintelis IP tinklo parametras, kuris visose VoIP tinklo dalyse nemažesnis už reikiamą, yra pralaidumo juostos plotis (mažiausias užfiksuotas 0,82 Mbit/s, didžiausias 4,99 Mbit/s). Suprojektuotos VoIP telefono sistemos darbas priklauso nuo IP tinkle esančių vartotojų kiekio, todėl galimas pralaidumo juostos sumažėjimas.

VoIP paslaugos kokybės tyrimams atlikti, buvo taikyti subjektyvaus ir objektyvaus balso kokybės vertinimo modeliai. Atlikti subjektyvaus vertinimo, ACR metodu, ir objektyvaus vertinimo, taikant PESQ algoritmą, eksperimentai. Gautos telefono sistemos perduodamo balso kokybės įvertinimo rezultatai ir kokybės priklausomybės nuo paketų vėlinimo ir praradimų.

Taip pat buvo atliktas suprojektuotos sistemos perduodamo balso kokybės prognozavimas, taikant telekomunikacinio tinklo „E-modelį“, ir kokybės stebėjimo eksperimentas, naudojantis „Image Engine VQ Manager“ programiniu paketu.

Atlikus eksperimentus galima teigti, kad tolimesniems kokybės vertinimo eksperimentams būtų naudinga, naudoti kokybės vertinimo programinius paketus, remiantis tinklo parametrais: paketų vėlinimas ir praradimai, nes subjektyvaus vertinimo eksperimentai užima daug laiko ir reikalauja nemažai finansinių resursų. O objektyvaus vertinimo modelis taikant PESQ algoritmą labiau taikytinas matuojant nedidelius balso kokybės skirtumus (pvz.: naudojant skirtingus balso kodavimo algoritmus).

Pagal gautus kokybės vertinimo rezultatus nustatyta, kad balso kokybė nežymiai sumažėja didėjant paketų vėlinimui (G.711 algoritmo atveju), o pagrindinis kokybę lemiantis veiksnys yra paketų praradimas. Pagal gautus telefono sistemos rezultatus galima teigti, kad gaunama paslaugos kokybė yra vidutinė arba priimtina, o didėjant IP tinklo vartotojų skaičiui perdaudamo balso kokybė sumažės. Taigi teikti kokybiškas VoIP paslaugas, nesikišant į tinklo valdymą yra neįmanoma. Būtina imtis kokybę užtikrinančių priemonių. Vienas iš būdų galinčių padidinti perduodamo balso kokybę yra VLAN, VPN (virtualių lokaliu tinklu) technologijos panaudojimas, atskiriant balso srautus nuo duomenų srautų, išskiriant balso srautui reikiamą IP tinklo resursą. Taigi nors VoIP technologija duoda galimybę, kurti

integruotus duomenų ir balso perdavimo tinklus, tačiau norint teikti kokybiškas paslaugas, būtinas loginis balso ir duomenų tinklų atskyrimas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Andreassen F. Foster B. Cisco Systems Network Working Group. Media Gateway Control Protocol (MGCP) Version 1.0. RFC 3435 rekomendacija. January 2003.
2. David J. Wright. Voice over Packet Networks. Wiley Series on Communications Technology. Sep 2001
3. Debashish Mitra. Network convergence and voice over IP March 2001.
4. Crocker David H. Dept. of Electrical Engineering. Standard for ARPA Internet Text Messages. University of Delaware, Newark, DE. August 13, 1982.
5. Cisco systems. Voice Over IP - Per Call Bandwidth Consumption. Dokument ID 7934.
6. IETF RFC791 rekomendacija. Internet Pprotocol. 1981.
7. IETF RFC793 rekomendacija. Transmission Control Protocol. 1981.
8. IETF RFC768 rekomendacija. User Datagram Protocol. 1980.
9. IETF RFC1889 rekomendacija. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. 1996.
10. IETF RFC1890 rekomendacija. RTP Profile for Audio and Video Conferences with Minimal Control. 1996.
11. ITU-T G.1010 rekomendacija. Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks. Quality of service and performance. End-user multimedia QoS categories. 11/2001.
12. IETF RFC 2474 rekomendacija. Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers. 1998.
13. ITU-T P.862 rekomendacija. Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs. 2001/02.
14. ITU-T P.800 rekomendacija. Methods for subjective determination of transmission quality. 1996/08.
15. ITU-T P.830 rekomendacija. Subjective performance assessment of telephone-band and wideband digital codecs. 1996/03.
16. ITU-T G.107 rekomendacija. The E-Model, a computational model for use in transmission planning. 2003/03
17. ITU-T G.113 rekomendacija. Transmission Systems and Media, Digital Systems and Networks. International telephone connections and circuits – General Recommendations on the transmission quality for an entire international telephone connection. 1998.
18. Rindzevičius R. Tervydis P. Balso perdavimo interneto tinklu charakteristikų tyrimas. ELEKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA. 2003. Nr.5(47).
19. Yergeau F. Alis Technologies. UTF-8, a transformation format of ISO 10646. RFC 2279

rekomendacija. January 1998.

20. AdventNet techninė dokumentacija. VQ Manager – Introduction. Žiūrėta 2008 03 01. Prieiga per internetą: <http://manageengine.adventnet.com/products/vqmanager/help/index.html>
21. ITU-T P.862 rekomendacija. PESQ modelio programos kodas. Žiūrėta 2008 04 23. Prieiga per internetą: <http://www.itu.int/itudoc/itu-t/aap/sg12aap/history/p862/index.html>

PRIEDAI

Priedas 1. Pralaidumo juostos matavimai

Eilės Nr.	Pralaidumas (IPerf)
1	C:\>iperf – c 88.199.113.2 ----- Client connecting to 88.199.113.2, TCP port 5001 TCP windows size: 8.00 KByte (default) ----- [108] local 192.168.1.100 port 55960 connected with 88.119.113.2 port 5001 [ID] Interval Transfer Bandwidth [108] 0.0-10.0 sec 4.78 MBytes 4.00 Mbits/sec
2	C:\>iperf – c 88.199.91.38 ----- Client connecting to 88.199.91.38, TCP port 5001 TCP windows size: 8.00 KByte (default) ----- [108] local 192.168.1.100 port 55960 connected with 88.119.91.38 port 5001 [ID] Interval Transfer Bandwidth [108] 0.0-10.0 sec 5.87 MBytes 4.99 Mbits/sec
3	C:\>iperf – c 88.199.91.17 ----- Client connecting to 88.199.91.17, TCP port 5001 TCP windows size: 8.00 KByte (default) ----- [108] local 192.168.1.100 port 55960 connected with 88.119.91.17 port 5001 [ID] Interval Transfer Bandwidth [108] 0.0-10.0 sec 1.17 MBytes 0.98 Mbits/sec
4	C:\>iperf – c 88.199.91.10 ----- Client connecting to 88.199.91.10, TCP port 5001 TCP windows size: 8.00 KByte (default) ----- [108] local 192.168.1.100 port 55960 connected with 88.119.91.10 port 5001 [ID] Interval Transfer Bandwidth [108] 0.0-10.0 sec 1.01 MBytes 0.82 Mbits/sec
5	C:\>iperf – c 88.199.113.5 ----- Client connecting to 88.199.113.5, TCP port 5001 TCP windows size: 8.00 KByte (default) ----- [108] local 192.168.1.100 port 55960 connected with 88.119.113.5 port 5001 [ID] Interval Transfer Bandwidth [108] 0.0-10.0 sec 2.48 MBytes 2.07 Mbits/sec
6	C:\>iperf – c 88.199.113.2 ----- Client connecting to 88.199.113.2, TCP port 5001 TCP windows size: 8.00 KByte (default) ----- [108] local 192.168.1.100 port 55960 connected with 88.119.113.2 port 5001 [ID] Interval Transfer Bandwidth [108] 0.0-10.0 sec 4.94 MBytes 4.13 Mbits/sec

7	C:\>iperf – c 88.199.112.26 ----- Client connecting to 88.199.112.26, TCP port 5001 TCP windows size: 8.00 KByte (default) ----- [108] local 192.168.1.100 port 55960 connected with 88.119.112.26 port 5001 [ID] Interval Transfer Bandwidth [108] 0.0-10.0 sec 5.62 MBytes 4.70 Mbits/sec
8	C:\>iperf – c 88.199.113.27 ----- Client connecting to 88.199.113.27, TCP port 5001 TCP windows size: 8.00 KByte (default) ----- [108] local 192.168.1.100 port 55960 connected with 88.119.113.27 port 5001 [ID] Interval Transfer Bandwidth [108] 0.0-10.0 sec 2.48 MBytes 2.11 Mbits/sec
9	C:\>iperf – c 88.199.91.22 ----- Client connecting to 88.199.91.22, TCP port 5001 TCP windows size: 8.00 KByte (default) ----- [108] local 192.168.1.100 port 55960 connected with 88.119.91.22 port 5001 [ID] Interval Transfer Bandwidth [108] 0.0-10.0 sec 2.17 MBytes 1.89 Mbits/sec
10	C:\>iperf – c 88.199.91.41 ----- Client connecting to 88.199.91.41, TCP port 5001 TCP windows size: 8.00 KByte (default) ----- [108] local 192.168.1.100 port 55960 connected with 88.119.91.41 port 5001 [ID] Interval Transfer Bandwidth [108] 0.0-10.0 sec 5.02 MBytes 4.07 Mbits/sec

Priedas 2. Paketų vėlinimo ir praradimo matavimai

Eilės Nr.	Vėlinimas ir praradimai (Ping)
1	Ping statistics for 88.119.113.2: Packets: Sent = 100, Received = 99, Lost = 1 (1% loss), Approximate round trip times in milli-seconds: Minimum = 10ms, Maximum = 51ms, Average = 39ms
2	Ping statistics for 88.119.91.38: Packets: Sent = 100, Received = 96, Lost = 4 (4% loss), Approximate round trip times in milli-seconds: Minimum = 10ms, Maximum = 141ms, Average = 92ms
3	Ping statistics for 88.119.91.17: Packets: Sent = 100, Received = 88, Lost = 12 (12% loss), Approximate round trip times in milli-seconds: Minimum = 11ms, Maximum = 556ms, Average = 361ms
4	Ping statistics for 88.119.91.10: Packets: Sent = 100, Received = 86, Lost = 14 (14% loss), Approximate round trip times in milli-seconds: Minimum = 11ms, Maximum = 3047ms, Average = 432ms
5	Ping statistics for 88.119.113.5: Packets: Sent = 100, Received = 97, Lost = 3 (3% loss), Approximate round trip times in milli-seconds: Minimum = 10ms, Maximum = 688ms, Average = 128ms

6	Ping statistics for 88.119.113.2: Packets: Sent = 100, Received = 98, Lost = 2 (2% loss), Approximate round trip times in milli-seconds: Minimum = 33ms, Maximum = 126ms, Average = 73ms
7	Ping statistics for 88.119.112.26: Packets: Sent = 100, Received = 100, Lost = 0 (0% loss), Approximate round trip times in milli-seconds: Minimum = 10ms, Maximum = 151ms, Average = 57ms
8	Ping statistics for 88.119.113.27: Packets: Sent = 100, Received = 96, Lost = 4 (4% loss), Approximate round trip times in milli-seconds: Minimum = 10ms, Maximum = 345ms, Average = 146ms
9	Ping statistics for 88.119.91.22: Packets: Sent = 100, Received = 93, Lost = 7 (7% loss), Approximate round trip times in milli-seconds: Minimum = 10ms, Maximum = 358ms, Average = 208ms
10	Ping statistics for 88.119.91.41: Packets: Sent = 100, Received = 100, Lost = 0 (0% loss), Approximate round trip times in milli-seconds: Minimum = 10ms, Maximum = 180ms, Average = 22ms

Priedas 3. Eksperimentų garso įrašai

Eilės Nr.	Bylos pavadinimas	MOS įvertinimas	PESQ MOS įvertinimas
1	Fabijoniškės1	4,2	3.218
2	Žirmūnai1	3,8	2.663
3	Žirmūnai2	2,5	1.685
4	Geležinio Vilko1	1,8	2.061
5	Lazdynai1	3,6	2.789
6	Geležinio Vilko2	3,4	2.952
7	Centras1	4,0	3.118
8	Stotis1	3,6	2.423
9	Karoliniškės1	3,3	1.919
10	Viršuliškės1	3,9	3.251

Priedas 4. PESQ programos kodas

```
#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include "pesq.h"
#include "dsp.h"
#define ITU_RESULTS_FILE      "_pesq_itu_results.txt"
#define SIMPLE_RESULTS_FILE   "_pesq_results.txt"
int main (int argc, const char *argv []);
void usage (void);
void pesq_measure (SIGNAL_INFO * ref_info, SIGNAL_INFO * deg_info,
    ERROR_INFO * err_info, long * Error_Flag, char ** Error_Type);
void usage (void) {
    printf ("Usage:\n");
    printf (" PESQ HELP           Displays this text\n");
    printf (" PESQ [options] ref deg [smos] [cond]\n");
    printf (" Run model on reference ref and degraded deg\n");
    printf ("\n");
    printf ("Options: +8000 +16000 +swap\n");
    printf (" Sample rate - No default. Must select either +8000 or +16000.\n");
}
```

```

printf (" Swap byte order - machine native format by default. Select +swap for byteswap.\n");
printf ("\n");
printf (" [smos] is an optional number copied to %s\n", ITU_RESULTS_FILE);
printf (" [cond] is an optional condition number copied to %s\n", ITU_RESULTS_FILE);
printf (" smos must always precede cond. However, both may be omitted.");
printf ("\n");
printf ("File names, smos, cond may not begin with a + character.\n");
printf ("\n");
printf ("Files with names ending .wav or .WAV are assumed to have a 44-byte header, which");
printf (" is automatically skipped. All other file types are assumed to have no header.\n");
}
int main (int argc, const char *argv []) {
    int arg;
    int names = 0;
    long sample_rate = -1;
    SIGNAL_INFO ref_info;
    SIGNAL_INFO deg_info;
    ERROR_INFO err_info;
    long Error_Flag = 0;
    char * Error_Type = "Unknown error type.";
    if (argc < 3){
        usage ();
        return 0;
    } else {
        strcpy (ref_info.path_name, "");
        ref_info.apply_swap = 0;
        strcpy (deg_info.path_name, "");
        deg_info.apply_swap = 0;
        err_info. subj_mos = 0;
        err_info. cond_nr = 0;
        for (arg = 1; arg < argc; arg++) {
            if (argv [arg] [0] == '+') {
                if (strcmp (argv [arg], "+swap") == 0) {
                    ref_info.apply_swap = 1;
                    deg_info.apply_swap = 1;
                } else {
                    if (strcmp (argv [arg], "+16000") == 0) {
                        sample_rate = 16000L;
                    } else {
                        if (strcmp (argv [arg], "+8000") == 0) {
                            sample_rate = 8000L;
                        } else {
                            usage ();
                            fprintf (stderr, "Invalid parameter '%s'.\n", argv [arg]);
                            return 1;
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
    } else {
        switch (names) {
            case 0:
                strcpy (ref_info.path_name, argv [arg]);
                break;
            case 1:
                strcpy (deg_info.path_name, argv [arg]);
                break;
            case 2:
                sscanf (argv [arg], "%f", &(err_info. subj_mos));
                break;
            case 3:
                sscanf (argv [arg], "%d", &(err_info. cond_nr));

```

```

        break;
    default:
        usage ();
        fprintf (stderr, "Invalid parameter '%s'.\n", argv [arg]);
        return 1;
    }
    names++;
}
}
if (sample_rate == -1) {
    printf ("PESQ Error. Must specify either +8000 or +16000 sample frequency option!\n");
    exit (1);
}
strcpy (ref_info. file_name, ref_info. path_name);
if (strchr (ref_info. file_name, '\\') != NULL) {
    strcpy (ref_info. file_name, 1 + strchr (ref_info. file_name, '\\'));
}
if (strchr (ref_info. file_name, '/') != NULL) {
    strcpy (ref_info. file_name, 1 + strchr (ref_info. file_name, '/'));
}
strcpy (deg_info. file_name, deg_info. path_name);
if (strchr (deg_info. file_name, '\\') != NULL) {
    strcpy (deg_info. file_name, 1 + strchr (deg_info. file_name, '\\'));
}
if (strchr (deg_info. file_name, '/') != NULL) {
    strcpy (deg_info. file_name, 1 + strchr (deg_info. file_name, '/'));
}
select_rate (sample_rate, &Error_Flag, &Error_Type);
pesq_measure (&ref_info, &deg_info, &err_info, &Error_Flag, &Error_Type);
}
}
if (Error_Flag == 0) {
    printf ("\nPrediction : PESQ_MOS = %.3f\n", (double) err_info.pesq_mos);
    return 0;
} else {
    printf ("An error of type %d ", Error_Flag);
    if (Error_Type != NULL) {
        printf (" (%s) occurred during processing.\n", Error_Type);
    } else {
        printf ("occurred during processing.\n");
    }
    return 0;
}
}
double align_filter_dB [26] [2] = {{0., -500},
    {50., -500},
    {100., -500},
    {125., -500},
    {160., -500},
    {200., -500},
    {250., -500},
    {300., -500},
    {350., 0},
    {400., 0},
    {500., 0},
    {600., 0},
    {630., 0},
    {800., 0},
    {1000., 0},
    {1250., 0},
    {1600., 0},

```

```

        {2000., 0},
        {2500., 0},
        {3000., 0},
        {3250., 0},
        {3500., -500},
        {4000., -500},
        {5000., -500},
        {6300., -500},
        {8000., -500}};
double standard_IRS_filter_dB [26] [2] = {{ 0., -200},
        { 50., -40},
        {100., -20},
        {125., -12},
        {160., -6},
        {200., 0},
        {250., 4},
        {300., 6},
        {350., 8},
        {400., 10},
        {500., 11},
        {600., 12},
        {700., 12},
        {800., 12},
        {1000., 12},
        {1300., 12},
        {1600., 12},
        {2000., 12},
        {2500., 12},
        {3000., 12},
        {3250., 12},
        {3500., 4},
        {4000., -200},
        {5000., -200},
        {6300., -200},
        {8000., -200}};
#define TARGET_AVG_POWER 1E7
void fix_power_level (SIGNAL_INFO *info, char *name, long maxNsamples)
{
    long n = info-> Nsamples;
    long i;
    float *align_filtered = (float *) safe_malloc ((n + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000)) * sizeof (float));
    float global_scale;
    float power_above_300Hz;
    for (i = 0; i < n + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000); i++) {
        align_filtered [i] = info-> data [i];
    }
    apply_filter (align_filtered, info-> Nsamples, 26, align_filter_dB);
    power_above_300Hz = (float) pow_of (align_filtered,
        SEARCHBUFFER * Downsample,
        n - SEARCHBUFFER * Downsample + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000),
        maxNsamples - 2 * SEARCHBUFFER * Downsample + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000));
    global_scale = (float) sqrt (TARGET_AVG_POWER / power_above_300Hz);
    for (i = 0; i < n; i++) {
        info-> data [i] *= global_scale;
    }
    safe_free (align_filtered);
}
void pesq_measure (SIGNAL_INFO * ref_info, SIGNAL_INFO * deg_info,
    ERROR_INFO * err_info, long * Error_Flag, char ** Error_Type)
{
    float * ftmp = NULL;

```

```

ref_info-> data = NULL;
ref_info-> VAD = NULL;
ref_info-> logVAD = NULL;
deg_info-> data = NULL;
deg_info-> VAD = NULL;
deg_info-> logVAD = NULL
if ((*Error_Flag) == 0)
{
    printf ("Reading reference file %s...", ref_info-> path_name);
    load_src (Error_Flag, Error_Type, ref_info);
    if ((*Error_Flag) == 0)
        printf ("done.\n");
}
if ((*Error_Flag) == 0)
{
    printf ("Reading degraded file %s...", deg_info-> path_name);
    load_src (Error_Flag, Error_Type, deg_info);
    if ((*Error_Flag) == 0)
        printf ("done.\n");
}
if (((ref_info-> Nsamples - 2 * SEARCHBUFFER * Downsample < Fs / 4) ||
    (deg_info-> Nsamples - 2 * SEARCHBUFFER * Downsample < Fs / 4)) &&
    ((*Error_Flag) == 0))
{
    (*Error_Flag) = 2;
    (*Error_Type) = "Reference or Degraded below 1/4 second - processing stopped ";
}
if ((*Error_Flag) == 0)
{
    alloc_other (ref_info, deg_info, Error_Flag, Error_Type, &ftmp);
}
if ((*Error_Flag) == 0)
{
    int    maxNsamples = max (ref_info-> Nsamples, deg_info-> Nsamples);
    float * model_ref;
    float * model_deg;
    long   i;
    FILE *resultsFile;
    printf (" Level normalization...\n");
    fix_power_level (ref_info, "reference", maxNsamples);
    fix_power_level (deg_info, "degraded", maxNsamples);
    printf (" IRS filtering...\n");
    apply_filter (ref_info-> data, ref_info-> Nsamples, 26, standard_IRS_filter_dB);
    apply_filter (deg_info-> data, deg_info-> Nsamples, 26, standard_IRS_filter_dB);
    model_ref = (float *) safe_malloc ((ref_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000)) * sizeof (float));
    model_deg = (float *) safe_malloc ((deg_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000)) * sizeof
(float));
    for (i = 0; i < ref_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000); i++) {
        model_ref [i] = ref_info-> data [i];
    }
    for (i = 0; i < deg_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000); i++) {
        model_deg [i] = deg_info-> data [i];
    }
    input_filter( ref_info, deg_info, ftmp );
    printf (" Variable delay compensation...\n");
    calc_VAD (ref_info);
    calc_VAD (deg_info);
    crude_align (ref_info, deg_info, err_info, WHOLE_SIGNAL, ftmp);
    utterance_locate (ref_info, deg_info, err_info, ftmp);
    for (i = 0; i < ref_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000); i++) {
        ref_info-> data [i] = model_ref [i];
    }
}

```

```

    }
    for (i = 0; i < deg_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000); i++) {
        deg_info-> data [i] = model_deg [i];
    }
    safe_free (model_ref);
    safe_free (model_deg);
    if ((*Error_Flag) == 0) {
        if (ref_info-> Nsamples < deg_info-> Nsamples) {
            float *new_ref = (float *) safe_malloc((deg_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000)) *
sizeof(float));
            long i;
            for (i = 0; i < ref_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000); i++) {
                new_ref [i] = ref_info-> data [i];
            }
            for (i = ref_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000);
                i < deg_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000); i++) {
                new_ref [i] = 0.0f;
            }
            safe_free (ref_info-> data);
            ref_info-> data = new_ref;
            new_ref = NULL;
        } else {
            if (ref_info-> Nsamples > deg_info-> Nsamples) {
                float *new_deg = (float *) safe_malloc((ref_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000)) *
sizeof(float));
                long i;
                for (i = 0; i < deg_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000); i++) {
                    new_deg [i] = deg_info-> data [i];
                }
                for (i = deg_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000);
                    i < ref_info-> Nsamples + DATAPADDING_MSECS * (Fs / 1000); i++) {
                    new_deg [i] = 0.0f;
                }
                safe_free (deg_info-> data);
                deg_info-> data = new_deg;
                new_deg = NULL;
            }
        }
    }
    }
    printf (" Acoustic model processing...\n");
    pesq_psychoacoustic_model (ref_info, deg_info, err_info, ftmp);
    safe_free (ref_info-> data);
    safe_free (ref_info-> VAD);
    safe_free (ref_info-> logVAD);
    safe_free (deg_info-> data);
    safe_free (deg_info-> VAD);
    safe_free (deg_info-> logVAD);
    safe_free (ftmp);
    resultsFile = fopen (ITU_RESULTS_FILE, "at");
    if (resultsFile != NULL) {
        long start, end;
        if (0 != fseek (resultsFile, 0, SEEK_SET)) {
            printf ("Could not move to start of results file %s!\n", ITU_RESULTS_FILE);
            exit (1);
        }
        start = ftell (resultsFile);
        if (0 != fseek (resultsFile, 0, SEEK_END)) {
            printf ("Could not move to end of results file %s!\n", ITU_RESULTS_FILE);
            exit (1);
        }
        end = ftell (resultsFile);
    }

```

```

        if (start == end) {
            fprintf(resultsFile, "REFERENCE\t DEGRADED\t PESQMOS\t PESQMOS\t SUBJMOS\t COND\t
SAMPLE_FREQ\t CRUDE_DELAY\n");
            fflush(resultsFile);
        }
        fprintf(resultsFile, "%s\t ", ref_info-> path_name);
        fprintf(resultsFile, "%s\t ", deg_info-> path_name);
        fprintf(resultsFile, "SQValue=%.3f\t ", err_info->pesq_mos);
        fprintf(resultsFile, "%.3f\t ", err_info->pesq_mos);
        fprintf(resultsFile, "%.3f\t ", err_info->subj_mos);
        fprintf(resultsFile, "%d\t ", err_info->cond_nr);
        fprintf(resultsFile, "%d\t", Fs);
        fprintf(resultsFile, "%.4f\n ", (float) err_info-> Crude_DelayEst / (float) Fs);
        fclose(resultsFile);
    }
    resultsFile = fopen (SIMPLE_RESULTS_FILE, "a");
    if (resultsFile != NULL) {
        long start, end;
        if (0 != fseek (resultsFile, 0, SEEK_SET)) {
            printf ("Could not move to start of results file %s!\n", SIMPLE_RESULTS_FILE);
            exit (1);
        }
        start = ftell (resultsFile);
        if (0 != fseek (resultsFile, 0, SEEK_END)) {
            printf ("Could not move to end of results file %s!\n", SIMPLE_RESULTS_FILE);
            exit (1);
        }
        end = ftell (resultsFile);
        if (start == end) {
            fprintf(resultsFile, "DEGRADED\t PESQMOS\t SUBJMOS\t COND\t SAMPLE_FREQ\t CRUDE_DELAY\n");
            fflush(resultsFile);
        }
        fprintf(resultsFile, "%s\t ", deg_info-> file_name);
        fprintf(resultsFile, "%.3f\t ", err_info->pesq_mos);
        fprintf(resultsFile, "%.3f\t ", err_info->subj_mos);
        fprintf(resultsFile, "%d\t ", err_info->cond_nr);
        fprintf(resultsFile, "%d\t", Fs);
        fprintf(resultsFile, "%.4f\n ", (float) err_info-> Crude_DelayEst / (float) Fs);
        fclose(resultsFile);
    }
}
return;
}
/* END OF FILE */

```