

## BALSO KOKYBĖ MOBILIOJO RYŠIO SISTEMOSE

Evaldas Stankevičius

Vilniaus Gedimino technikos universitetas  
El. paštas evaldas.stankevicius@vgtu.lt

**Santrauka.** Nagrinėjama mobiliuoju tinklu perduoto balso kokybės matavimo metodikos problematika, balso kokybės įvertinimo algoritmų pasirinkimo galimybės. Aptariamas sukurtos balso kokybės matavimo sistemos tinkamumas, efektyvumas. Pateikiami sukurtos sistemos taikymo rezultatai parinkus optimalią įrangos konfigūraciją. Sąlygomis, artimomis idealioms, gauta, kad sukurta sistema balso kokybę įvertina vidutiniu 3,85 MOS įverčiu, o standartizuota *TEMS Investigation 9.0* – vidutiniu 4,05 MOS įverčiu. Aptarta balso kokybės prognozatoriaus sukūrimo galimybė. Ištirtas balso kokybės priklausomybės nuo mobiliojo tinklo parametrų prognozatorius, taikantis tiesinės ir netiesinės prognozės būdus. Netiesinė prognozė, taikant dirbtinius neuronų tinklus, teikia 0,62 koreliacijos koeficientą. Tiesinė prognozė mažiausiųjų kvadratų metodu teikia 0,57 koreliacijos koeficientą. Gauta analitinė balso kokybės funkcijos išraiška nuo trijų tinklo parametrų: BER, C/I, RSSI.

**Reikšminiai žodžiai:** QoS, PESQ, 3SQM, MOS, tiesinė ir netiesinė prognozė, neuronų tinklai, mažiausiųjų kvadratų metodas.

## Įvadas

Mobilusis ryšys, mobilusis internetas įgauna vis didesnę reikšmę. Jau seniai visi priprato prie mobiliųjų telefonų, mobiliojo interneto. Į telefonus jau perkeliamas mobilusis radijas ir televizija. Kompanija „Cisco“ paskelbė mobiliųjų tinklų duomenų perdavimo prognozė iki 2016 m. Joje teigiama, kad per artimiausius penkerius metus mobilusis interneto srautas padidės 18 kartų ir 2016 m. pasieks 10,8 egzabaito per mėnesį (vietas egzabaitas yra lygus maždaug 1,1 milijardo GB). 2011 m. šis skaičius siekė 0,6 egzabaito per mėnesį, o 2012 m. pasieks 1,3 egzabaito. Išmanieji telefonai, nešiojamieji kompiuteriai ir kiti mobilieji įrenginiai 2016 m. sukurs apie 90 % pasaulinio mobiliojo interneto srauto. Jį daugiausia padidins sparčiai besivystanti interneto televizija ir srautinės vaizdo paslaugos (Cisco Visual 2012).

Norint suvaldyti didelį vartotojų skaičių, duomenų srautus ir teikti kokybiškas paslaugas, paslaugų tiekėjams reikalingi kokybiški ir efektyvūs tinklai bei įdiegti paslaugos kokybės QoS (angl. *Quality of Service*) valdymo mechanizmai (Kajackas *et al.* 2008).

Vartotojas nori gauti kokybišką paslaugą. Jo požiūriu, kokybiška paslauga susideda iš patrauklios kainos ir didelės duomenų perdavimo spartos. Patrauklią kainą užtikrina efektyvi konkurencija tarp paslaugų teikėjų ir mobiliųjų operatorių. Didelę duomenų perdavimo spartą užtikrina optimalus tinklas.

Norint efektyviai naudoti tinklo išteklius, reikia optimaliai valdyti QoS. Paslaugų kokybės prognozė leistų

greitai įvertinti vartotojui reikalingą spartą, balso kokybės poreikį. Operatoriai nori kuo mažesnėmis sąnaudomis garantuoti tinkamą QoS lygį.

Straipsnyje nagrinėjamos QoS įvertinimo, prognozavimo, optimizavimo problemos ir jų dvilypiškas. Ištiriama kokybinių tinklo parametrų prognozės galimybė. Straipsnyje pateikiamas sukurtos balso kokybės matavimo įrangos tinkamumo įvertinimas ir balso kokybės parametro prognozės galimybės, remiantis tinklo paramerais.

## Balso kokybės matavimo sistema

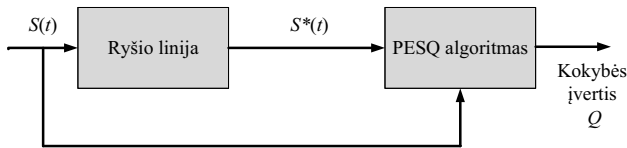
Žinomi įvairūs balso kokybės vertinimo algoritmai ir būdai. Galimas subjektyvus vertinimas, kai žmonės, klausydami balso garso įrašų, sprendžia apie jo kokybę. Ši vertinimo sistema vadinama MOS (angl. *Mean Opinion Score*). Ja remiantis balso įrašo kokybę vertinama balais nuo 1 iki 5 (1 lentelė). Ši vertinimo sistema nėra objektyvi dėl vertinančiųjų emocinės būsenos. Žmogus gali būti piktas arba laimingas, šios nuotaikos gali daryti poveikį jo vertinimo balams (Chu 2003; Jost 2003; Kajackas, Šaltis 2003).

1 lentelė. MOS vertinimo įverčiai

Table 1. MOS evaluation

Balai	Vertinimas
5	Puiki kokybė, nėra pastebimų pablogėjimų
4	Gera kokybė, labai silpnas pablogėjimas
3	Patenkinama kokybė, pastebima pablogėjimų
2	Silpna kokybė, stiprūs pablogėjimai
1	Bloga kokybė, stipriai iškreipta kalba

Objektyvūs vertinimo kriterijai skirstomi į invazinius ir neinvazinius. Neinvaziniai vertinimo metodai analizuoja tik perdavimo liniją. Jie yra lengviau įgyvendinami, bet pasižymi mažesne koreliacija su MOS vertinimo balais. Invaziniai vertinimo metodai taiko du signalus: perduotą ryšio liniją ir atraminį signalą. Tokią vertinimo sistemą taiko PESQ algoritmas. PESQ algoritmas apie balso kokybę sprendžia lygindamas du signalus (1 pav.).

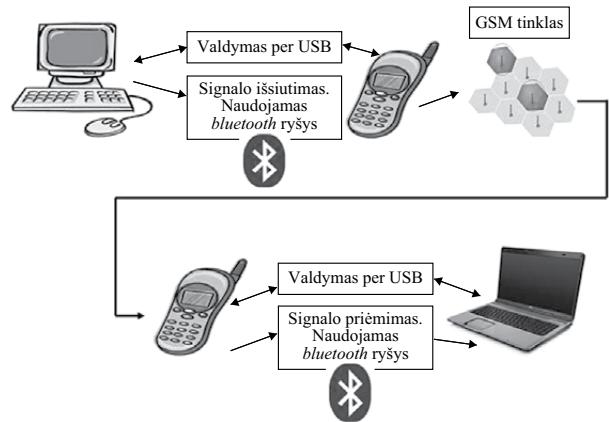


1 pav. Balso kokybės vertinimo struktūra  
Fig. 1. Voice quality estimation structure

Invazinių balso kokybės vertinimo metodų koreliacija su MOS įverčiais yra didesnė nei neinvazinių vertinimo kriterijų. Daugelyje balso vertinimo sistemų naudojamas PESQ algoritmas. Šis algoritmas yra standartizuotas ITU-T organizacijos. Jį apibūdina P.862 rekomendacija. PESQ algoritmas gali palyginti kiekvieną atraminio signalo atskaitą (kalbančiojo pusė) su triukšmų paveikto signalo atskaitomis (klausančiojo pusė). PESQ kiekvieną signalą segmentuoja 32 ms laiko intervalais. Kiekviename tokiaime segmente analizuojamas signalo spektras, matoma signalo dedamųjų sklaida. Taip randami iškreipimai ir vertinama balso kokybė. PESQ algoritmo vertinimo rezultatas pateikiamas MOS skalėje.

3SQM algoritmas aprašytas ITU-T P.563 rekomendacija. Šis algoritmas vertina tik bendrąsias žmogaus balso savybes. Programoje suformuotas žmogaus balso modelis, su kuriuo lyginamas tiriamasis signalas. 3SQM neturi priemonių, kuriomis galėtų atskirti triukšmus nuo žmogaus balso, o pokalbiai dažnai vyksta triukšmingoje aplinkoje. Tačiau tokie vertinimo algoritmai yra labai naudingi realiojo laiko tyrimų metu, kai reikia iš karto nustatyti, kokia perduodamo balso kokybė, nes 3SQM nereikia atraminio signalo. PESQ negali atlikti tokių vertinimų. Kiekvienas iš šių algoritmų turi savo pranašumų ir trūkumų, bet kiekvienas pasižymi gan didele savo gaunamų rezultatų koreliacija su subjektyviais MOS įverčiais. PESQ perduodamo balso koreliacija su subjektyviais MOS įverčiais yra apytiksliai 0,935, o 3SQM – 0,8. Taigi abu tyrimo algoritmai duoda patikimus rezultatus (ITU-T Rec. P.862. 2001; Guršnys 2008; Batkauskas 2006; ITU-T Rec. E.800. 1996).

Sukurtoje balso kokybės vertinimo sistemoje panaudotas PESQ algoritmas. Sistemos struktūra pateikta 2 pav.



2 pav. Balso kokybės matavimo struktūra  
Fig. 2. Voice quality measurement structure

Sistemą sudaro mobilioji ir stacionarioji stotys. Prie stacionariosios ir mobiliosios stoties prijungiamas mobilusis telefonas, naudojamas USB prievadas ir Bluetooth ryšys. Stacionarioje stotyje paleidžiamas 7,23 s trukmės balso įrašas. Mobilioje stotyje veikia aktyvus balso detektorius, kuris tikrina kiekvieną 80 ms trukmės balso įrašą ir ar jo lygis neviršija 30 dB. Viršijus šį lygį pradeda 10 s trukmės balso įrašas. Norint sužadinti aktyvus balso detektorius, balso įrašo pradžioje sukurtas 80 ms startinis impulsas (3 pav.).



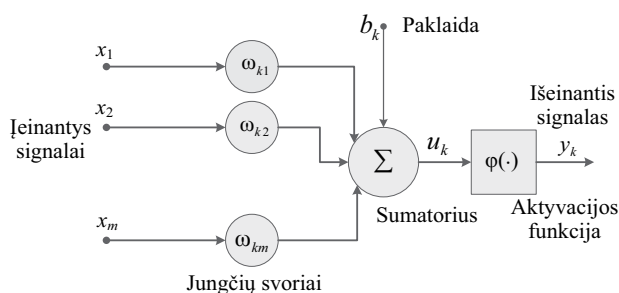
3 pav. Siunčiamojo signalo struktūra  
Fig. 3. Outgoing signal structure

Intervalas  $t_1$  – tai 0,15 s trukmės tyla. Toliau eina 0,08 s startinis impulsas (intervalas  $t_2$ ). Prieš balso signalą įterpiama 0,5 s trukmės tyla (intervalas  $t_3$ ). Šis tylos intervalas apsauginis, nes balso detektorius ne visada pradeda balso įrašymą vienu metu. Vėliau seka 6,5 s trukmės balso įrašas (intervalas  $t_4$ ).

Atlikus sistemos bandymus pastebėtos sisteminės klaidos:

1. Dalis įrašų yra ištrinami kaip netinkami, nes įrašuose lieka dalis startinio impulso. Todėl buvo parinktos tinkamiausios startinio impulso ir įrašymo pradžios laukimo intervalo trukmės.

- Perduodant signalą sąlygomis, artimomis idealioms, gautas vidutinis 3,85 PESQ MOS įvertis (dviejų vienodų signalų įvertis vertinamas 4,5). Atliekant analogiškus bandymus su *TEMS Investigation 9.0* įranga gautas vidutinis 4,05 SQI-MOS įvertis. Taigi kiekvieną kart matuojant atsiranda sisteminė įverčio paklaida, kuri bandymų metu gali būti pakoreguota.
- Siunčiant vienodos amplitudės 1 kHz 10 s ilgio signalą, priimančiojoje pusėje pastebėta, kad signalo dažnis pakinta vidutiniškai 4 Hz.



4 pav. Neurono modelis  
Fig. 4. Model of neuron

## Balso kokybės prognozavimas

Tiesiogiai matuojant mobiliuoju ryšiu perduoto balso kokybę sunku išvengti matavimo įrangos įtakos. Balso kokybės prognozatorius, kuris vertintų perduodamo balso kokybę, remdamasis mobiliojo ryšio tinklo parametrais, leistų kitaip pažvelgti į balso kokybės vertinimo galimybes. Galimi du būdai:

- Netiesinė prognozė neuronų tinklais.
- Tiesinė prognozė mažiausiųjų kvadratų metodu.

## Netiesinė prognozė

Neurono matematinis modelis sukurtas remiantis žmogaus smegenų modeliu. Neuroną sudaro trys pagrindinės dalys (4 pav.):

- Jungtys tarp neuronų, kurios susietos su duomenų svarbumu (svoriu)  $\omega_{kj}$ ,  $x_j$ -toji jungtis  $k$ -tojo neurono).
- Sumatorius, vykdamas pasvertas įvestų duomenų linijines kombinacijas.
- Aktyvacijos arba spūsties funkcija  $\varphi(\cdot)$ , kuri nustato neuronų limitą išeinantiems duomenims.

Matematiškai, turint  $m$  įeinančių signalų, vienas neuronas gali būti aprašomas taip:

$$v_k = \sum_j^m \omega_{kj} \cdot x_j, \quad (1)$$

$$y_k = \varphi(u_k) = \varphi(\omega_k + b_k), \quad (2)$$

čia  $b_k$  žymi paklaidos kontrolę;  $v_k$  – įeinančių signalų su jungčių svoriais suma;  $\omega_{kj}$  – jungties svoris;  $x_j$  – įeinantis signalas;  $y_k$  – išeinantis signalas.

Egzistuoja slenksčio (angl. *threshold function*), dalinė (angl. *piecewise function*) ir sigmoidinė (angl. *sigmoid function*) aktyvacijos funkcijos.

Dažniausiai taikoma yra sigmoidinė funkcija (Jain *et al.* 1996; Haykin 2008).

Dirbtinių neuroninių tinklui siunčiamas vektorius sudarytas iš trijų rūšių duomenų – BER, C/I parametru ir signalo lygio RSSI. Kaip funkcijos vertė pasirinktas SQI parametras.

Uždaviniui išspręsti galima naudoti neuroninį tinklą su vienu ar keletu paslėptųjų sluoksnių (angl. *Feed-Forward Network*). Tyrimo pradžioje naudotas vienas paslėptasis sluoksnis. Mokymo tikslu neuroniniam tinklui pasiūsta 10 000 apmokymo vektorių. Apmokyti taikytas Levenberg-Marquardt algoritmas (Jain *et al.* 1996). Mokyti ir testuoti parinkti skirtingi įėjimo vektoriai. 2 lentelėje pateikta neuronų skaičiaus paslėptajame sluoksnyje įtaka aproksimacijos tikslumui.

2 lentelė. Neuronų skaičiaus įtaka aproksimacijos tikslumui  
Table 2. Number of neurons influence to the accuracy of approximation

Neuronų skaičius paslėptajame sluoksnyje	Skirtumo vidurkis tarp pateiktos ir aproksimuotos funkcijos	Vidutinė kvadratinė paklaida (RMSE)	Koreliacija tarp pateiktos ir aproksimuotos funkcijos
2	-0,0782	1,2230	0,5899
3	-0,0860	1,2096	0,6035
4	-0,1222	1,2138	0,5991
5	-0,1192	1,2080	0,6063
6	-0,1034	1,2191	0,5933
7	-0,1072	1,1982	0,6129
8	-0,1151	1,2067	0,6069
9	-0,1291	1,1948	0,6195
10	-0,0970	1,2283	0,5844
15	-0,1067	1,2170	0,5949
20	-0,0914	1,2280	0,5839
25	-0,0994	1,2254	0,5870
30	-0,1119	1,2700	0,5532

Matyti, kad geriausi rezultatai gauti, kai neuronų skaičius – 9. Tada koreliacijos koeficientas siekia ~0,62. Siekiant pagerinti prognozės rezultatus, sukurtas antras paslėptasis sluoksnis, o pirmajame palikti 9 neuronai. 3 lentelėje pateikti prognozės rezultatai rodo, kad antras paslėptasis sluoksnis nepagerino prognozės tikslumo – koreliacijos koeficientas tesiekia ~0,57.

3 lentelė. Neuronų skaičiaus įtaka aproksimacijos tikslumui, kai naudojami du paslėptieji sluoksniai

Table 3. The number of neurons influence the accuracy of approximation, using two hidden layers

Neuronų skaičius antrame paslėptajame sluoksnyje	Skirtumo vidurkis tarp pateiktos ir aproksimuotos funkcijos	Vidutinė kvadratinė paklaida (RMSE)	Koreliacija tarp pateiktos ir aproksimuotos funkcijos
2	-0,0862	1,3050	0,5279
3	-0,1170	1,2065	0,5569
4	-0,0879	1,2497	0,5714
5	-0,1095	1,3166	0,5106

### Tiesinė prognozė

Labiausiai paplitęs tokių uždavinių sprendimo būdas – mažiausių kvadratų metodas. Siekiama surasti minimalų atstumą tarp empirinės kreivės ir eksperimento taškų arba atstumą tarp empirinės kreivės ir eksperimento taškų modulių. Praktikoje tiesinės prognozės kreivė dažniausiai aprašoma tiesinės funkcijos pavidalu (Faraway 2002), kuris geriausiai priartina ieškomą kreivę:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_NX_N, \quad (3)$$

čia  $Y$  žymi tiesės lygtį;  $X$  – taškas, esantis ant tiesės;  $b$  – ieškomas koeficientas.

Tam taikomas mažiausių kvadratų metodas, kai stebimų  $Y$  nuo jų įverčių  $\hat{Y}$  nuokrypių kvadratų suma yra minimizuojama (Faraway 2002). Tiesinė prognozė vykdyta panaudojus kiekvieną parametą – BER, C/I, signalo lygio, ir visus tris parametrus. Pagrindinis panašumo rodiklis – determinacijos koeficientas. Determinacijos koeficientas parodo, kokią dalį tiriamojo požymio dispersijos apima taikomasis matematinis modelis. Turint determinacijos koeficientą  $R_{det}^2$  galima rasti koreliacijos koeficientą  $R_{kor}$ :

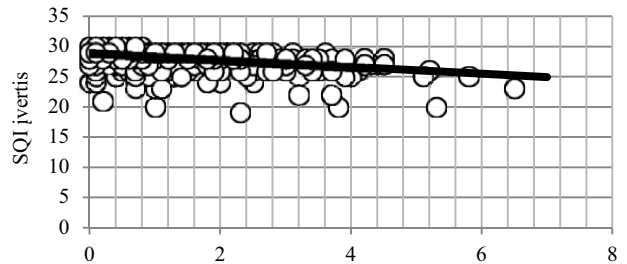
$$R_{kor} = \sqrt{R_{det}^2}. \quad (4)$$

Skaičiuojant SQI parametro tiesinę priklausomybę nuo BER parametro, gautas rezultatas pateiktas 5 pav. Šiuo atveju determinacijos koeficientas nėra didelis ir lygus 0,22. Taigi nėra stipraus tiesinės priklausomybės ryšio tarp SQI ir BER parametru.

Skaičiuojant SQI parametro tiesinę priklausomybę nuo C/I parametro, gautas rezultatas pateiktas 6 pav. Šiuo atveju gautas 0,0024 determinacijos koeficientas.

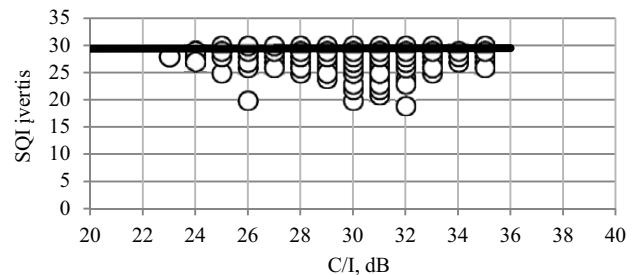
Skaičiuojant SQI parametro tiesinę priklausomybę nuo RSSI parametro (7 pav.), gautas 0,15 determinacijos koeficientas.

Žinoma, kad tiesinės prognozės modelis gali būti taikomas, kai determinacijos koeficiento vertė didesnė už 0,2.



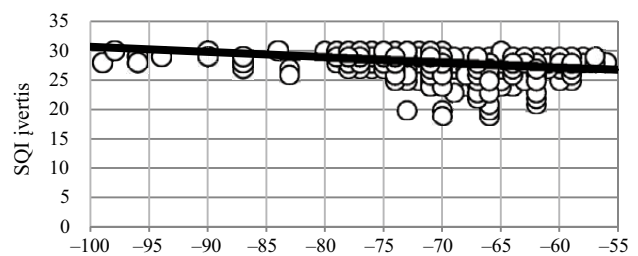
5 pav. SQI tiesinė priklausomybė nuo BER parametro, kai lygtis  $y = -0,57BER + 28,9$ , determinacijos koeficientas 0,22, koreliacijos koeficientas 0,47

Fig. 5. SQI linear dependence of BER, as equation  $y = -0.57BER + 28.9$ , coefficient of determination 0.22, correlation coefficient 0.47



6 pav. SQI tiesinė priklausomybė nuo C/I parametro, kai lygtis  $y = -0,028C/I + 29,4$ , determinacijos koeficientas 0,0024, koreliacijos koeficientas 0,049

Fig. 6. SQI linear dependence of C/I, as equation  $y = -0.028C/I + 29.4$ , coefficient of determination 0.0024, correlation coefficient 0.049



7 pav. SQI tiesinė priklausomybė nuo RSSI parametro, kai lygtis  $y = -0,087RSSI + 21,99$ , determinacijos koeficientas 0,15, koreliacijos koeficientas 0,39

Fig. 7. SQI linear dependence of RSSI, as equation  $y = -0.087RSSI + 21.99$ , coefficient of determination 0.15, correlation coefficient 0.39

Atlikus tiesinę prognozę pagal visus tris parametrus iš karto determinacijos koeficientas gautas lygus 0,31 (koreliacijos koeficientas – 0,57). Tiesinio modelio lygtis šiuo atveju yra:

$$y = 22,52 - 0,6BER - 0,011C/I - 0,09RSSI, \quad (5)$$

čia BER žymi bitų klaidos tankį; C/I – signalo lygis virš triukšmo; RSSI – priimamo signalo lygis.

Ši analitinė funkcijos išraiška leidžia apskaičiuoti balso kokybės įvertį su 0,31 determinacijos koeficientu turint tris tinklo parametrus – BER, C/I, RSSI

## Išvados

1. Sukurta balso kokybės matavimo įranga, kuri artimomis idealioms sąlygoms mobiliuoju tinklu perduoto balso kokybę įvertina vidutiniu 3,85 PESQ-MOS įverčiu. Tokiomis pat sąlygomis *TEMS Investigation 9.0* balso kokybę įvertina vidutiniu 4,05 SQI-MOS įverčiu.
2. Neuronų tinklu modeliuojant balso kokybės prognozę remiantis tinklo parametrais (BER, C/I ir RSSI) gauta vidutinė 0,62 koreliacija. Analogiškoms sąlygoms taikant mažiausiųjų kvadratų metodą gautas vidutinis koreliacijos koeficientas – 0,57.

## Literatūra

- Batkauskas, V. 2006. *Mobiliojo tinklo paslaugų kokybės vertinimo ir gerinimo būdų tyrimas*: daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 104 p.
- Chu, W. C. 2003. *Speech Coding Algorithms: Foundation and Evolution of Standardized Coders*. John Wiley & Sons, Inc. 584 p. <http://dx.doi.org/10.1002/0471668850>
- Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2011–2016 [interaktyvus]. 2012. Cisco [žiūrėta 2012 03 20]. Prieiga per internetą: [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white\\_paper\\_c11-520862.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_c11-520862.html)
- Faraway, J. J. 2002 [interaktyvus]. *Practical Regression and Anova Using R* [žiūrėta 2012 03 20]. Prieiga per internetą: <http://cran.r-project.org/doc/contrib/Faraway-PRA.pdf>
- Guršnys, D. 2008. *Balso kokybės vertinimo metodai ir priemonės mobiliojo ryšio sistemoms*: daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 82 p. ISBN 978-9955-28-338-6.
- Hykin, S. 2008. *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*. New Jersey: Prentice Hall. 842 p.
- ITU-T Rec. E.800. *Terms and Definitions related to Quality of Service and Network Performance including Dependability*. 1996. Geneva. 30 p.
- ITU-T Rec. P.862. *Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ): An Objective Method for End-to-End Speech Quality Assessment of Narrowband Telephone Networks and Speech Coders*. 2001. Geneva. 30 p.

Jain, A. K.; Jianchang Mao; Mohiuddin, K. M. 1996. Artificial neural networks, *Computer* 29(3): 31–44. <http://dx.doi.org/10.1109/2.485891>

Jost, H. 2003. Benchmarking GSM indoor voice quality. Denmark. Center for Tele-Information, in *Ascom* [interaktyvus] 5(3) [žiūrėta 2012 03 20]. Prieiga per internetą: [http://www.fbr.dk/upload/application/e4457fc5/denmark-indoor\\_report.pdf](http://www.fbr.dk/upload/application/e4457fc5/denmark-indoor_report.pdf)

Kajackas, A.; Medeišis, A.; Paulikas, Š.; Sidaras, S. 2008. *Telekomunikacinių technologijų raida*. Vilnius: Technika. 316 p. ISBN 978-9955-28-313-3. <http://dx.doi.org/10.3846/1028-S>

Kajackas, A.; Šaltis, A. 2003. Balso signalų kalbos ir tylos intervalų modeliai ir jų taikymas, *Elektronika ir elektrotechnika* 5(47): 7–12. ISSN 1392-1215.

## VOICE QUALITY IN MOBILE TELECOMMUNICATION SYSTEMS

### E. Stankevičius

#### Abstract

The article deals with methods measuring the quality of voice transmitted over the mobile network as well as related problem, algorithms and options. It presents the created voice quality measurement system and discusses its adequacy as well as efficiency. Besides, the author presents the results of system application under the optimal hardware configuration. Under almost ideal conditions, the system evaluates the voice quality with MOS 3.85 average estimate; while the standardized TEMS Investigation 9.0 has 4.05 average MOS estimate. Next, the article presents the discussion of voice quality predictor implementation and investigates the predictor using nonlinear and linear prediction methods of voice quality dependence on the mobile network settings. Nonlinear prediction using artificial neural network resulted in the correlation coefficient of 0.62. While the linear prediction method using the least mean squares resulted in the correlation coefficient of 0.57. The analytical expression of voice quality features from the three network parameters: BER, C/I, RSSI is given as well.

**Keywords:** QoS, PESQ, 3SQM, MOS, linear and non-linear prediction, artificial neural networks, LMS.