

OTOAKUSTINĖS EMISIJOS SIGNALŲ ĮVERTINIMAS PANAUDOJANT
SINCHRONINĮ VIDURKINIMĄLinus Sankauskas¹, Andrius Petrėnas², Vaidotas Marozas³

Kauno technologijos universitetas

El. paštas: ¹linas@eqsound.lt; ²andrius.petrenas@ktu.lt; ³vaimaro@ktu.lt

Santrauka. Nagrinėjamos sinchroninio vidurkinimo metodo galimybės išskirti otoakustinės emisijos (OAE) signalus iš triukšmo. Metodus iširtas naudojant sintetinius ir realius signalus. Sumodeliuotu sintetinių signalų ansambliu įvertinta triukšmo standartinės deviacijos ir vidurkio įtaka signalo ir triukšmo santykiui (STS). Realų OAE signalų atveju įgyvendinti ir palyginti sinchroninio ir pasverto vidurkinimo metodai. Tyrimas rodo, kad signalų įvertinimo rezultatams didelę įtaką turi ansamblio realizacijų skaičius, realizacijų vidurkis, ansamblio nehomogeniškumas dėl determinuotos dedamosios amplitudės varijavimo, o triukšmo pobūdžio (Gauso ar Laplaso) didelės įtakos rezultatams nepastebėta.

Reikšminiai žodžiai: otoakustinė emisija, sinchroninis vidurkinimas, signalo ir triukšmo santykis.

Įvadas

Otoakustinės emisijos signalas – tai vidinės ausies generuojami garsai, kurie leidžia neinvaziniu būdu vertinti sraigės būklę. OAE testas ypač naudingas kūdikių klausai patikrinti ir esant reikalui anksčiau paskirti gydymą.

Šių testų pagrindinė problema ta, kad jie dar nėra pakankamai tikslūs. Otoakustinės emisijos signalas užterštas įvairiais triukšmais, kurie trukdo patikimai išskirti naudingą užregistruoto signalo dedamąją. OAE signalui įvertinti ir atpažinti dažnai taikomas sinchroninis vidurkinimas (Manley *et al.* 2008; Marozas 2008). Sinchroninio vidurkinimo metu, didinant užregistruotų realizacijų skaičių, keliamas užregistruoto signalo ir triukšmo santykis. Šį santykį dar galima padidinti skaitmeniniu signalų apdorojimu (Marozas *et al.* 2006).

Pagrindinis darbo tikslas – išnagrinėti sinchroninio vidurkinimo ypatybes, įvertinti jo efektyvumą, privalumus ir trūkumus.

Metodas

Naudingiems signalams išgauti sinchroninis (koherentinis) vidurkinimas naudojamas tada, kai signalo ir triukšmo spektro dedamosios persidengia, tačiau yra galimybė užregistruoti laike sinchronizuotas signalo realizacijas. Sinchroninio vidurkinimo metodui tirti šiame darbe buvo naudojami sintetiniai ir realūs signalai. Sintetinių signalų atveju užregistruoto signalo realizacija modeliuojama adityviniu signalo modeliu:

$$y_k[n] = s[n] + t_k[n], \text{ kai } k = -1, n = -1 \dots N, \quad (1)$$

čia $s[n]$ – nekintančios determinuotos dedamosios diskrečioji seka; $t_k[n]$ – atsitiktinė užregistruoto signalo dedamoji (triukšmas); M – realizacijų skaičius ansamblyje; N – atskaitų skaičius realizacijoje.

Determinuota impulsų sukeltos otoakustinės emisijos (ISOAE) signalo dedamoji šiame darbe modeliuojama pasitelkus skirtingais dažniais moduluotų gama funkcijų superpoziciją (Tognola *et al.* 1998):

$$s[n] = \sum_{i=1}^N \gamma_i[n], \quad (2)$$

čia γ_i – moduluota gama funkcija, randama iš išraiškos:

$$\gamma_i[n] = \alpha \cdot n^3 \cdot e^{-2\pi\beta f_i \cdot n} \cdot \cos(2\pi f_i n). \quad (3)$$

Gaubtinės parametras α apskaičiuojamas remiantis formule:

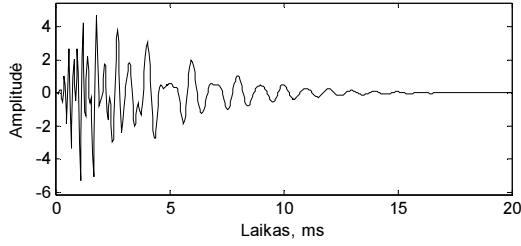
$$\alpha = (2\pi f_i)^{3.5}, \quad (4)$$

čia f_i – gama funkcijos moduliacijos dažnis.

Parinkus gama funkcijos moduliacijos dažnius lygius 1, 1,5, 2,2, 3,3, 5 Hz, sumodeliuota determinuota ISOAE signalo dedamoji, kuri pavaizduota 1 pav.

Atsitiktinėms signalo dedamosioms (triukšmui) modeliuoti buvo naudotas Gauso skirstinys (5). Sumodeliuoto Gauso triukšmo standartinė deviacija – $\sigma = 1$, o vidurkis – $\bar{x} = 0$.

$$p_v(t_k[n]) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}t_k^2[n]}. \quad (5)$$

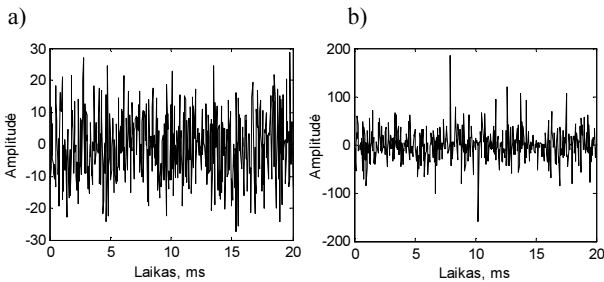


1 pav. Sumodeliuota determinuota ISOAE signalo dedamoji
Fig. 1. Simulated deterministic component of ISOAE signal

Iš determinuoto ISOAE ir Gauso triukšmo modelių suformuotas sintetinis užregistruoto ISOAE signalo ansamblis, kurio kiekvienos realizacijos STS apie -20 dB (žr. 2 pav., a). Impulsiniams trikdžiams modeliuoti gerai tinka Laplaso skirstinys, užrašomas formule:

$$p_v(t_k[n]) = \frac{1}{2} e^{-|t_k[n]|}. \quad (6)$$

Didesnių amplitudžių triukšmui išgauti parinkti parametrai $\sigma = 3$ ir $\bar{x} = 0$. Taip pat kaip ir Gauso triukšmo atveju, suformuotas sintetinis ISOAE signalas, kurio atskirų realizacijų STS ~ -20 dB (žr. 2 pav., b).



2 pav. Sintetinis ISOAE signalas, užterštas: Gauso triukšmu ($\sigma = 1$, $\bar{x} = 0$, STS ~ -20 dB) (a); Laplaso triukšmu ($\sigma = 3$, $\bar{x} = 0$, STS ~ -20 dB) (b)

Fig. 2. Synthetic IEOAE signal mixed with: Gaussian noise ($\sigma = 1$, $\bar{x} = 0$, SNR ~ -20 dB) (a); Laplacian noise ($\sigma = 3$, $\bar{x} = 0$, SNR ~ -20 dB) (b)

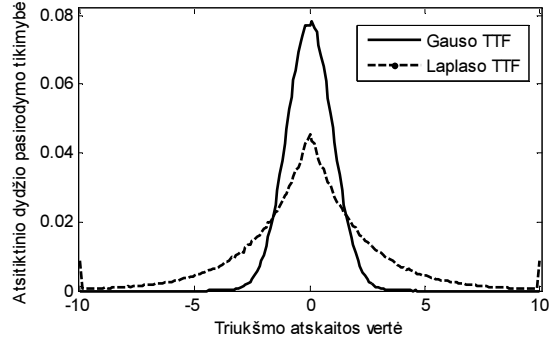
3 pav. pateiktos darbe naudojamų sumodeliuotų Gauso ir Laplaso skirstinių tikimybės tankio funkcijos (TTF).

Sintetinių signalų atveju signalo ir triukšmo galios yra žinomos, todėl STS skaičiuoti buvo naudojama formulė:

$$STS = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_s^2}{\sigma_t^2} \right). \quad (7)$$

Realių signalų atveju determinuota ir atsitiktinė signalo dedamosios yra nežinomos, todėl analitiškai signalo ir triukšmo dispersijų apskaičiuoti negalima, o reikia jas įvertinti. Triukšmo dispersija įvertinama iš kiekvienos ansamblio realizacijos atimant ansamblio vidurkį, kuris artėja link determinuotos signalo dedamosios vidurkio:

$$\sigma_{at}^2 = \frac{1}{N(M-1)} \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^N (y_k[n] - \bar{y}[n]). \quad (8)$$



3 pav. Gauso ($\sigma = 1$, $\bar{x} = 0$) ir Laplaso ($\sigma = 3$, $\bar{x} = 0$) skirstinių tikimybės tankio funkcijos

Fig. 3. Propability density functions of Gaussian ($\sigma = 1$, $\bar{x} = 0$) and Laplacian ($\sigma = 3$, $\bar{x} = 0$) distributions

Ansamblio vidurkio įverčio galia randama vidurkinant į ansamblių įtraukiamų realizacijų skaičių:

$$\sigma_{av}^2 = \frac{1}{NM} \sum_{k=1}^M \sum_{n=1}^N y_k^2[n]. \quad (9)$$

Prisiminę, kad adityvinio signalo modelio atveju triukšmo ir ansamblio vidurkio įverčio galios atitinka sąryšį:

$$\sigma_{av}^2 = \sigma_s^2 + \sigma_{at}^2. \quad (10)$$

Galime apskaičiuoti STS realiems signalams:

$$STS = 10 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{av}^2 - \sigma_{at}^2}{\sigma_{at}^2} \right). \quad (11)$$

Teoriškai triukšmo galia ansamblio vidurkyje turėtų sumažėti M kartų:

$$\sigma_{at}^2 = \frac{\sigma_t^2}{M}, \quad (12)$$

čia σ_t^2 – ansamblio realizacijos vidutinė triukšmo dispersija, kuri randama iš išraiškos:

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M E(t_k^2[n]). \quad (13)$$

Iš (12) lygybės galima parodyti, kad sinchroninio vidurkinimo metu triukšmo lygis ansamblio vidurkyje mažėja \sqrt{M} kartų.

Kai varijuoja signalo determinuotos dedamosios amplitudė, tikslinga prislopinti tas realizacijas, kurių determinuotos dedamosios lygis yra žemas, t. y. triukšmo lygis jose aukštas. Tuo tikslu naudojamas pasverto vidurkinimo metodas, kurio pagalba ansamblio nehomogeniškumas kompensuojamas kiekvieną signalo realizaciją padauginant iš atitinkamo koeficiento:

$$\hat{s}_w = Yw, \quad (14)$$

čia w – realizacijų svorio koeficientų vektorius.

Svorių koeficientų vektorius elementai randami remiantis išraiška:

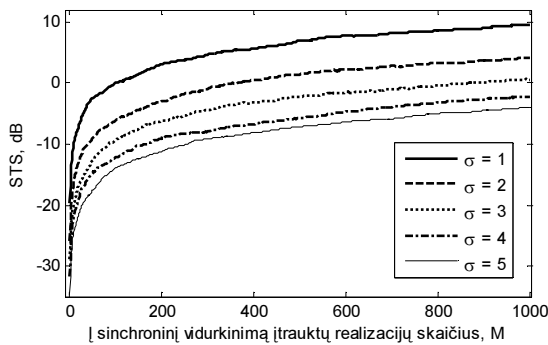
$$\mathbf{w} = \frac{1}{\sum_{j=1}^M \frac{1}{\sigma_j^2}} \begin{bmatrix} \sigma_1^2 \\ \sigma_2^2 \\ \dots \\ \sigma_M^2 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Norint įgyvendinti pasverto vidurkinimo metodą praktiškai, reikia įvertinti signalo realizacijų ansamblio Y triukšmo dispersijas.

Rezultatai

Sintetiniai ISOAE signalai

Sumodeliuoti 512 atskaitų, 1 000 realizacijų Gauso ir Laplaso triukšmais užteršti ISOAE signalo realizacijų ansambliai. 4 pav. pavaizduota pagal Gauso dėsnį pasiskirsčiusio sintetinio triukšmo ansamblio standartinės deviacijos (σ) įtaka STS, priklausomai nuo i sinchroninį vidurkinimą įtrauktų realizacijų skaičiaus M . Parametras σ buvo keičiamas nuo 1 iki 5.

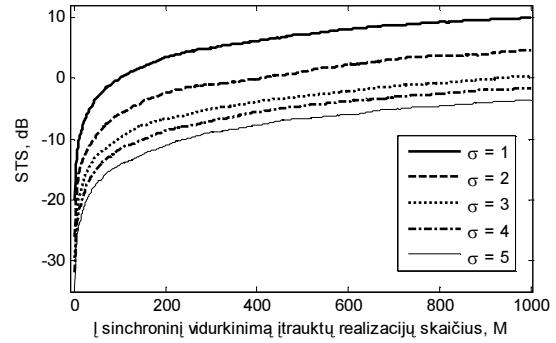


4 pav. Užteršto Gauso triukšmu ISOAE signalo STS priklausomybė nuo M , keičiant triukšmo standartinę deviaciją σ
Fig. 4. SNR as the function of M and standard deviation of Gaussian noise

Analogiškai patikrinta ir pagal Laplaso dėsnį pasiskirsčiusio sintetinio triukšmo ansamblio standartinės deviacijos įtaka STS. Rezultatų kreivės pavaizduotos 5 pav.

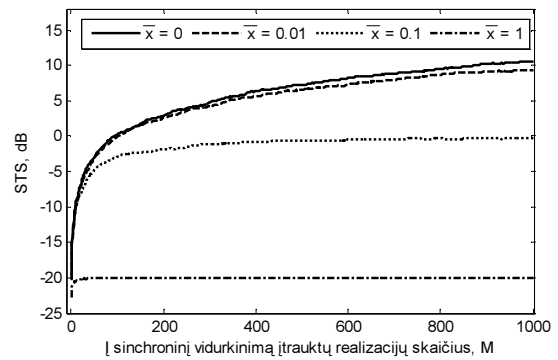
Pastebėta, kad modeliuojant triukšmus, pasiskirsčiusius pagal Gauso ir Laplaso dėsnius, standartinės deviacijos įtaka STS lygiui yra artima. Vidurkio įtaka modeliuojant Gauso triukšmą pateikta 6 pav. Gautos kreivės, esant atitinkamiems vidurkiams: $\bar{x} = 0$, $\bar{x} = 0,01$, $\bar{x} = 0,1$ ir $\bar{x} = 1$.

7 pav. palygintos STS priklausomybės, kai galios σ_s^2 ir σ_t^2 iš anksto žinomos, ir kai jos buvo įvertintos pagal (8) ir (9) formules. Naudotas tas pats sintetinis triukšmu užterštas signalas.



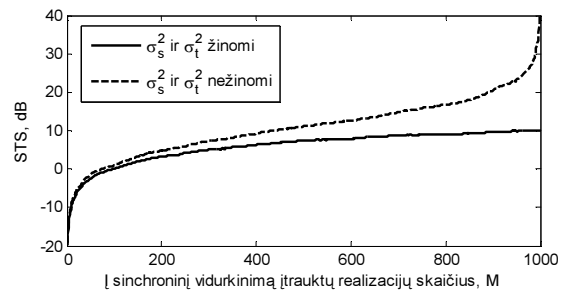
5 pav. Užteršto Laplaso triukšmu ISOAE signalo STS priklausomybė nuo M , keičiant triukšmo pasiskirstymo standartinę deviaciją σ

Fig. 5. SNR as the function of M and standard deviation of Laplacian noise



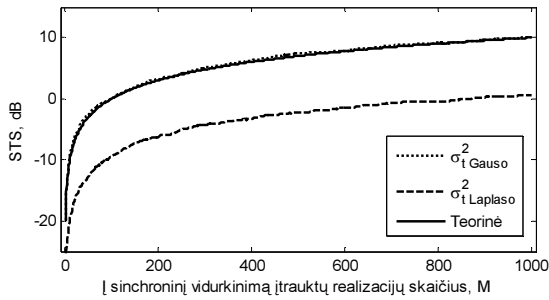
6 pav. ISOAE signalo, užteršto Gauso triukšmu STS priklausomybės nuo M , keičiant triukšmo skirstinio vidurkį \bar{x}
Fig. 6. SNR as the function of M and the mean of Gaussian noise

8 pav. parodytos STS priklausomybės nuo M , kai ISOAE signalas buvo užterštas Gauso ir Laplaso triukšmais. Priminsime, kad sumodeliuoto Gauso triukšmo standartinė deviacija $\sigma = 1$, o Laplaso triukšmo – $\sigma = 3$. Gautos priklausomybės gali būti palygintos ir su teorine kreive, apskaičiuota remiantis (12) išraiška.

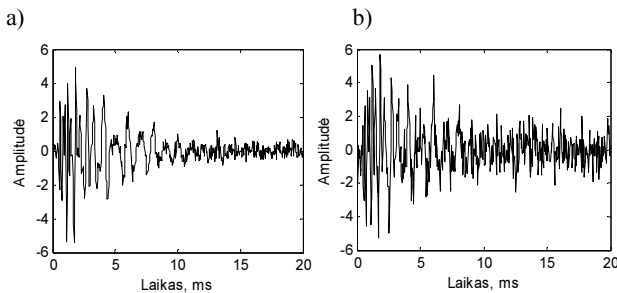


7 pav. STS priklausomybės nuo M , kai triukšmo ir signalo galios žinomos ir kai σ_s^2 bei σ_t^2 vertės iš anksto nežinomos (gaunamos įvertinimo būdu)

Fig. 7. SNR as the function of M when variances σ_s^2 and σ_t^2 were known and estimated from the data



8 pav. Į sinchroninį vidurkinimą įtrauktų realizacijų skaičiaus įtaka STS lygiui
Fig. 8. The comparison of synchronous averagers performances in case of Gaussian and Laplacian noise



9 pav. Sinchroninio vidurkinimo metu iš triukšmo išskirtas ($M=1000$) ISOAE signalas: iš Gauso (a); iš Laplaso triukšmo (b)
Fig. 9. Example of estimated IEOAE signal: from Gaussian noise (a); from Laplacian noise (b)

9 pav. pateiktas pagal Gauso (a) ir Laplaso (b) dėsnį pasiskirsčiusiu triukšmu užteršto ISOAE signalo sinchroninio vidurkinimo rezultatas, suvidurkinus 1000 realizacijų ansamblį.

Atsiminus 2 pav. pavaizduotus triukšmais užterštus ISOAE signalus, 9 pav. matome, kad po sinchroninio vidurkinimo gauti ISOAE signalai artimi sumodeliuotai OEA signalo dedamajai, pavaizduotai 1 pav.

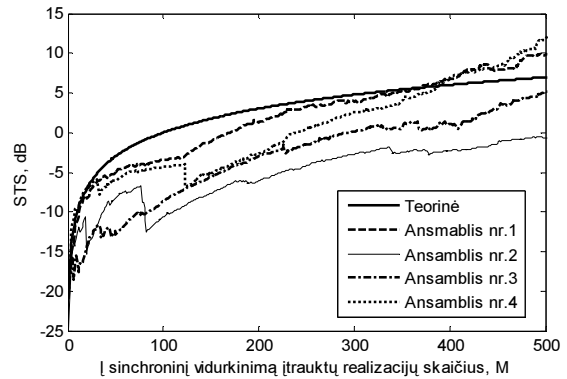
Realūs ISOAE signalai

Tirti 7 realių ISOAE signalų, skirtingo realizacijų skaičiaus ir ilgio, ansambliai. Iš jų pasirinkti 4, kurių STS priklausomybės nuo į sinchroninį vidurkinimą įtrauktų realizacijų skaičiaus pateiktos 10 pav. Storesne linija pažymėta teorinė kreivė.

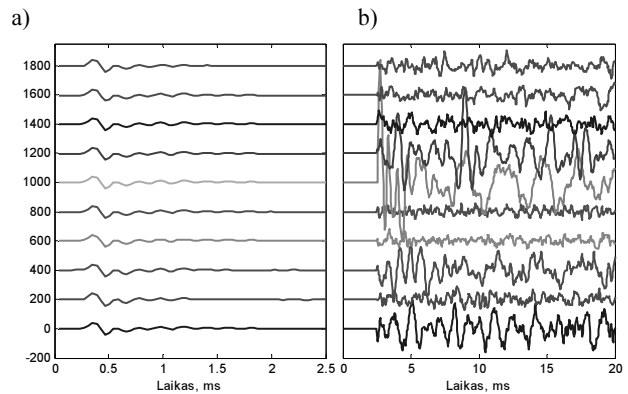
11 pav. parodytos reakcijos į stimulus, kurių realizacijos iš ansamblio parinktos atsitiktinai. Kairėje pusėje pateikti stimulus, o dešinėje – ausies sraigės reakcijos į stimulus.

Atsižvelgiant į tai, kad varijuoja signalo determinuotos dedamosios amplitudė (žr. 11 pav.), ansamblio nehomogeniškumui kompensuoti pritaikytas pasverto vidurkinimo metodas. 12 pav. palyginta sinchroninio ir pasverto vidurkinimo metodų įtaka realaus ISOAE signalo STS priklausomybei nuo į vidurkinimą įtrauktų realizacijų skaičiaus.

Matome, kad pasverto vidurkinimo metodas leido gauti tolygesnę STS priklausomybės nuo M charakteristiką.

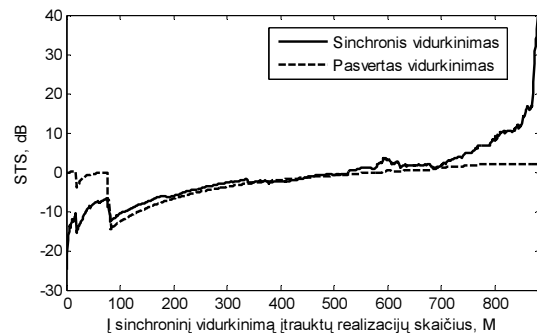


10 pav. Atskirų ISOAE ansamblių STS priklausomybės nuo į sinchroninį vidurkinimą įtrauktų realizacijų skaičiaus
Fig. 10. SNR as the function of averaging size M in case of several real IEOAE ensembles



11 pav. ISOAE ansamblio realizacijų pavyzdžiai: akustiniai stimulusai (a); reakcijos į stimulus (b)
Fig. 11. Examples of IEOAE ensemble realizations: acoustic stimulus (a); response to stimulus (b)

Reikia atkreipti dėmesį, kad reakcijų realizacijose matyti impulsinių trikdžių, kinta triukšmo galia ir ISOAE signalo amplitudė.



12 pav. Ansamblio ISOAE signalų STS priklausomybės nuo M , sinchroninio ir pasverto vidurkinimo metodų atvejais
Fig. 12. SNR as the function of M in case of synchronous averaging and weighted synchronous averaging methods

Diskusija ir išvados

Bandymai su modeliuotais sintetiniais ISOAE signalais rodo, kad ISOAE signalo STS lygiui didelę įtaką turi triukšmo vidurkis ir standartinė deviacija. Modeliuojant triukšmą, nustatytas ne nuliui lygus vidurkis gali atspindėti bazinės linijos variavimą arba dėl įvairių priežasčių atsiradusią nuolatinę dedamąją (pvz., dėl blogai sukalibruotos aparatūros). Standartinės deviacijos dydis nusako impulsinių trikdžių pasirodymo tikimybę. Standartinės deviacijos įtaka STS lygiui Gauso ir Laplaso pasiskirstymų atvejais yra panaši, tačiau Gauso triukšmo atveju, stebimas tolygesnis impulsinių šuolių pasiskirstymas nei Laplaso triukšmo atveju.

Vizualiai nagrinėti realūs ISOAE signalai pasižymi skirtingu triukšmo lygiu, bazinės linijos variavimu, impulsiniais trikdžiais ir naudingo signalo amplitudžių skirtumais. Ištyrus keletą atsitiktinių realizacijų, galima teigti, kad triukšmas pasiskirstęs pagal Gauso dėsnį.

Šalinant triukšmus realiuose signaluose, tikslinga naudoti pasverto vidurkinimo metodą, kuris leidžia išvengti staigaus STS priklausomybės nuo M augimo, kai į vidurkinimą įtraukiamų realizacijų skaičius artėja prie ansamblių sudarančio realizacijų skaičiaus.

Nepaisant trūkumo, kad, norint atlikti sinchroninį vidurkinimą, reikia sukaupti tam tikro dydžio ansamblių, ši filtravimo būdą būtų galima pritaikyti išgaunant informaciją tokiais atvejais, kai dominanti signalo dedamoji yra ženkliai užgožta triukšmų ir yra galimybė užregistruotas realizacijas sinchronizuoti laike.

Literatūra

- Manley, G. A.; Fay, R. R. 2008. *Active Processes and Otoacoustic Emissions in Hearing*. Springer. 484 p.
- Marozas, V.; Jegelevičius, D. 2008. *Biomedicinių signalų skaitmeninis apdorojimas*. Nomporelis. 195 p.
- Marozas, V.; Janušauskas, A.; Lukoševičius, A.; Sornmo, L. 2006. Multiscale Detection of Transient Evoked Otoacoustic Emissions, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 53(8): 1586–1593. ISSN 0018-9294.
- Tognola, G.; Grandori, F.; Ravazzani, P. 1998. Wavelet Analysis of Click-Evoked Otoacoustic Emissions, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 45(6): 686–697. doi:10.1109/10.678603

ESTIMATION OF OTOACOUSTIC EMISSION SIGNALS BY USING SYNCHRONOUS AVERAGING METHOD

L. Sankauskas, A. Petrėnas, V. Marozas

Abstract

The study presents the investigation results of synchronous averaging method and its application in estimation of impulse evoked otoacoustic emission signals (IEOAE). The method was analyzed using synthetic and real signals. Synthetic signals were modeled as the mixtures of deterministic component with noise realizations. Two types of noise were used: normal (Gaussian) and transient impulses dominated (Laplacian). Signal to noise ratio was used as the signal quality measure after processing. In order to account varying amplitude of deterministic component in the realizations weighted averaging method was investigated. Results show that the performance of synchronous averaging method is very similar in case of both types of noise Gaussian and Laplacian. Weighted averaging method helps to cope with varying deterministic component or noise level in case of non-homogenous ensembles as is the case in IEOAE signal.

Keywords: otoacoustic emissions, time synchronous averaging, signal to noise ratio.