

## Echospektriniai audinių įvertinimo metodai

**M. Žakauskas, A. Mačiulis, A. Kopustinskas**

*Taikomosios elektronikos katedra, Kauno technologijos universitetas,  
Studentų g. 50-327, LT-51368 Kaunas, Lietuva, tel. (8-37)371409, el.paštas akopus@ktu.lt*

**A. Paunksnis, S. Kurapkienė**

*Biomediciniųjų tyrimų institutas, Kauno medicinos universitetas,  
Eivenių g.4, LT-50009 Kaunas, Lietuva, tel. (8-37)338049, el.paštas apaun@medi.lt*

**D. Jegelevičius**

*Biomedicininės inžinerijos institutas, Kauno technologijos universitetas,  
Studentų g. 65-111, LT-51369 Kaunas, Lietuva, tel.(8-37)351206, el.paštas darjege@ktu.lt*

### Įvadas

Aktualus ultragarsinės medicininės diagnostikos uždavinys – audinių darinių mikrostruktūros identifikavimo, klasifikavimo bei morfologijos įvertinimo metodų kūrimas. Šiai sudėtingai problemai spręsti dedama nemaža pastangų, ir tai atsispindi gausiose publikacijose.

Šiuo metu plačiausiai taikoma vadinamoji kokybinė audinių vizualizacija. Ji pagrįsta generavimu A, B, M vaizdų, kuriuose vaizdo elemento (pikslio) ryškumas moduluojamas videosignalo amplitude, atitinkančia atsispindėjusių radijo dažnio bangų gaubtinę. Šitai monitoriuje atvaizduojama ir analizuojama tik dalis echosignale slypinčios vertingos informacijos. Be to, B echogramoje daroma skleistinės linijų interpoliacija, videosignalai vidurkinami ir dėl to papildomai prarandami audinių mikrostruktūros analizei naudingi duomenys.

Todėl aktualu sukurti metodus, kurie leistų efektyviau panaudoti radijo dažnio echosignale esančią informaciją apie audinius. Šių metodų taikymas yra žingsnis į naujų ir perspektyvių kiekybinės audinių vizualizacijos (kiekybinės parametrizacijos) sistemų kūrimą.

Pastaruoju metu daug dėmesio skiriama spektriniais tyrimų metodams, turintiems esminių pranašumų [1].

Tyrimo metu į audinius išsiunčiamos mažos trukmės – kelių periodų radijo dažnio (RD) ultragarso bangos. Akustinės bangos sklinda audiniais ir dėl sąveikos su jais keičia savo pagrindinius parametrus – amplitudę, dažnį bei fazę. Bangų parametru pasikeitimas tam tikru laipsniu atspindi audinių mikrostruktūrą – tokias jų charakteristikas, kaip audinių medžiagos tankio netolydumą, heterogeniškumą, darinių dydį, sklaidą, dalelių judesio (dinamikos) procesą. Bangų amplitudės slopinimo ir dažnio iškraipymo spektriniai duomenys naudojami audinių struktūros kokybiniam ar kiekybiniam įvertinimui.

Krūties auglio metastazės diagnostikos „in vitro“ galimybes nagrinėjamos [2].

Echospektriniai tyrimo metodai oftalmologijoje taikomi daugiau kaip 20 metų. Lietuvoje pirmą kartą jau

1986 metais buvo atlikti akies struktūros tyrimai [3]. Šiame straipsnyje aprašyta akių echospektrinių tyrimų metodika naudojant plačiajuostį 1–20 MHz keitiklį. Tyrimams naudotos žmonių ir gyvūnų akys. Gauti statistiškai patikimi rezultatai, iliustruojantys galimybę identifikuoti audinius.

Oftalmologiniai pjezoelektriniai keitikliai formuoja 5–50 MHz ultragarsinius impulsus, sklindančius akies audiniu greičiu, atvirkščiai proporcingu akies audinio tankiui ir elastingumui. Ultragarso impulsai slopinami akyje dėl audinių absorbcinių ir sklaidos savybių. Yra žinoma, kad slopinimo koeficientas tiesiogiai priklauso nuo signalo dažnio. Slopinimo koeficientui apskaičiuoti gali būti taikomi nulinių perėjimų, spektrinis ir koreliacinis metodai [4]. Spektriniu metodu vienas ultragarso slopinimo koeficientas gaunamas skaičiuojant skirtumą tarp dviejų signalų spektrų. Šie signalai gaunami analizuojamo audinio pradžioje ir pabaigoje.

Spektrinės analizės metodas buvo panaudotas [5] įvertinant diabetinės kataraktos subrendimo įtaką ultragarso slopinimui. Ištirti lėšiuokai žmonių, sergančių diabetu. Studijos metu nustatyta, kad slopinimo koeficiento įvertinimas padeda objektyviau išreikšti diabetinės kataraktos drumstumo laipsnį ir leidžia objektyviau įvertinti kataraktos išsivystymo laipsnį.

Y. Sugata [6] tyrė galimybę diagnozuoti kataraktą matuojant ultragarsinio signalo slopinimo charakteristikas. Buvo nustatyta, kad ultragarso slopinimas akies lęšyje priklauso nuo ligos stadijos, o slopinimo koeficiento dydis gali būti papildomas kriterijus diagnozuojant kataraktą ir jos sunkumo laipsnį.

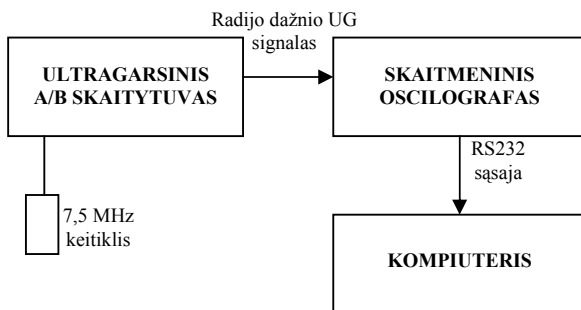
Nepaisant intensyvių pastangų, audinių ultragarsinės parametrizacijos uždaviniai dar nėra tinkamai išspręsti. Nėra aprobuotos metodikos audinių dariniams, tarp jų ir oftalmologiniams, įvertinti. Manoma, kad dėl sudėtingumo nėra pakankamai ištirta ultragarso bangų sąveika su audiniais, sunku su reikiamu patikimumu modeliuoti ultragarsinio keitiklio generuojamą akustinį lauką.

Kitas būdas audinių klasifikavimo uždaviniui spręsti – taikyti echografinių signalų bei ultragarsinių vaizdų analizės ir atpažinimo metodus. Šiuo atveju ieškoma tiriamojo audinio darinio būdingų požymių ir parametrų. Iš eksperimentinio tyrimo duomenų apskaičiuoti parametrai kaupiami klinikinių duomenų bazėse. Panaudojant apmokymo ir klasifikavimo algoritmus tiriamieji audiniai priskiriami vienai ar kitai klasei [7]. Šio metodo sėkmė daug priklauso nuo tinkamai parinktų požymių ir parametrų įvertinimo metodikos. Tikėtina, kad, didinant požymių skaičių, turi didėti ir klasifikavimo patikimumas.

Darbo tikslas – surasti oftalmologiniams audiniams klasifikuoti skirtus naujus parametrus, panaudojant radijo dažnio echosignalų analizę, leidžiančius padidinti audinių darinų mikrostruktūros identifikavimo patikimumą.

## Tyrimo metodika

Ultragarsinių (UG) radijo dažnio signalų registravimo bei apdorojimo sistema pavaizduota 1 pav.



1 pav. Radijo dažnio signalų registravimo bei apdorojimo sistema

Pirmiausia gaunamas įprastinis B vaizdas (2 pav.) ir pagal jį pasirenkama reikiama sritis. Ultragarsinis RD signalas gaunamas ultragarsinio skaitytuvo 7,5 MHz A sistema, signalą registruojant skaitmeniniu oscilografu Tektronix TDS 220, prijungtu prie ultragarsinio skaitytuvo RD išėjimo. Diskretizuoto signalo duomenys išsaugomi oscilografo atmintyje, iš kurios per RS232 sąsają perrašomi į kompiuterį. Pagrindiniai oscilografo parametrai yra šie:

- diskretizavimo dažnis iki 1 GHz (tyrimų metu naudota 250 MHz),
- amplitudės skiriamoji geba 8 bitai,
- signalo pralaidumo juosta 100 MHz.

Oscilografo ekrane gaunama radijo dažnio echograma parodyta 3 pav.

## Spektriniai parametrai

Laikant, kad sistema tiesinė, vienmačio A skaitymo atveju echosignalas aprašomas dvių funkcijų sąsūka:

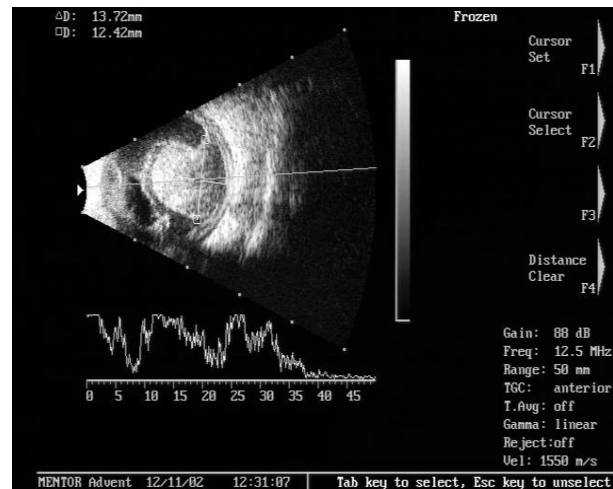
$$U(t) = h(t) * a(t) = \int h(x) \cdot a(t-x) dx; \quad (1)$$

čia  $h(t)$  – audinių impulsinė charakteristika, atspindinti tokias audinių akustines-mechanines savybes, kaip tankis, atšvaitų dydis, sklaida ir pan.;  $a(t)$  – zondojuančiojo impulso laiko funkcija;  $t$  – laikas.

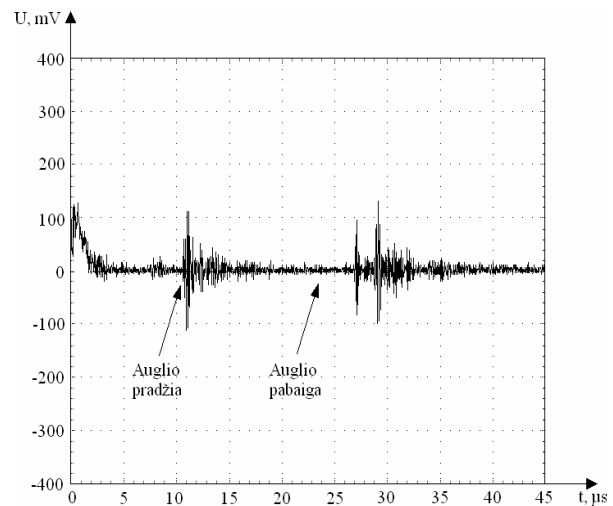
Diskretizuoto radijo dažnio echosignalų amplitudės pasiskirstymas skaitymo linijoje  $Z$  lygus sumai signalų nuo kiekvieno diskretinio linijos taško  $Z_n$ :

$$U(n) = \sum_{m=0}^{M-1} g_n(t_m) \cdot \delta(Z - Z_n); \quad (2)$$

čia  $g_n$  – echosignalas nuo skaitymo linijos taško  $Z_n$ ;  $n = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – atskaitų skaičius linijoje;  $t_m = \Delta t \cdot m$ ;  $M$  – siunčiamo signalo atskaitų skaičius;  $\Delta t$  – diskretizavimo periodas;  $\delta(Z - Z_n)$  – delta funkcija, lygi vienetui tik kai  $Z = Z_n$ .



2 pav. Ultragarsiniu A/B skaitytuvu gaunamas vaizdas



3 pav. Išmatuota auglio radijo dažnio echograma

Signalų (2) galios spektrinis tankis apskaičiuotas panaudojus diskretinę Furjė transformaciją, skaičiavimo duomenys pateikti 4 paveiksle.

Matyti, kad sveiko ir akies auglio audinių signalų spektrinio tankio skirstiniai skiriasi. Vienas iš galimų klasifikavimo parametrų gali būti spektro plotis:

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min}; \quad (3)$$

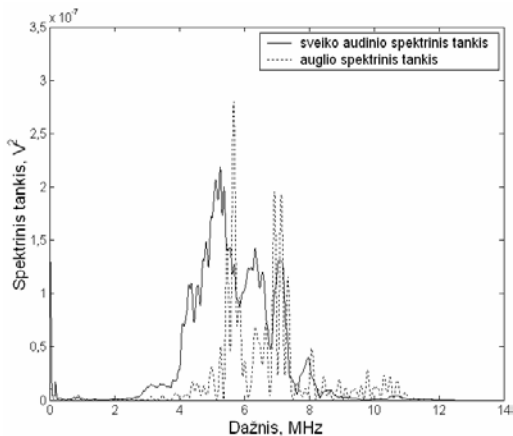
čia  $f_{\max}$  – maksimalus spektro dažnis, apskaičiuojamas iš sąlygos, kad visų spektro dedamųjų dažnių, mažesnių už jį,

galių suma sudaro 95 % viso spektro galios;  $f_{min}$  – minimalus spektro dažnis, apskaičiuojamas laikant, kad jis apima tik 5 % viso spektro galios. Šie spektro dažniai surandami iš tokių lygčių:

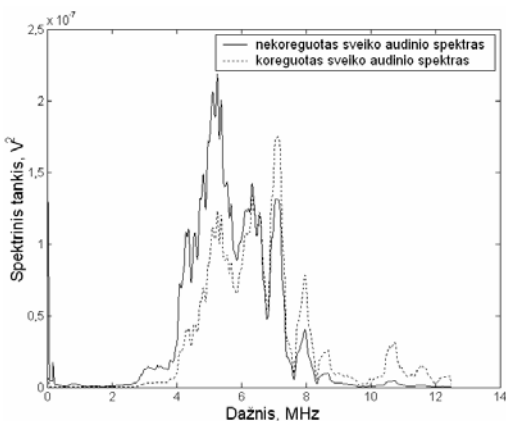
$$\int_0^{f_{max}} S(f) \cdot df = 0,95 \cdot \int_0^{\infty} S(f) \cdot df; \quad (4)$$

$$\int_0^{f_{min}} S(f) \cdot df = 0,05 \cdot \int_0^{\infty} S(f) \cdot df; \quad (5)$$

čia  $S(f)$  – signalo galios spektrinio tankio vertė esant dažniui  $f$ .



4 pav. Sveiko (ištisinė linija) ir akies auglio (punktyrinė linija) ausinių radijo dažnio signalų spektrinių tankių funkcijų palyginimas



5 pav. Sveiko ausinio (ištisinė linija) ir koreguoto sveiko ausinio (punktyrinė linija) radijo dažnio signalų spektrinių tankių funkcijų palyginimas

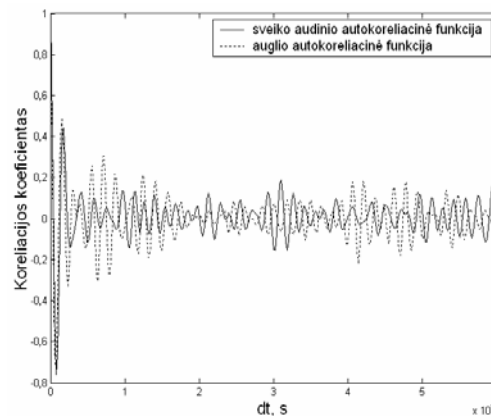
Radijo dažnio echosignalas nuo sveiko ausinio paprastai registruojamas ne tuo pačiu atstumu nuo keitiklio kaip echosignalas nuo auglio. Siekiant kompensuoti ausinių slopinimo dažninės charakteristikos dispersijos įtaką, daroma signalo nuo sveiko ausinio spektro korekcija. Pakoreguotas echosignalas spektrinis tankis

$$S_{kor}(f) = H(f) \cdot S(f); \quad (6)$$

$$H(f) = 10^{0,1 \cdot a_0 \cdot l \cdot f^b}; \quad (7)$$

čia  $H(f)$  – signalo slopinimo korekcijos dažninė charakteristika;  $f$  – dažnis MHz; koeficientai  $a_0 = (0,7 \dots 1,1)$  dB/MHz·cm,  $b = 0,8 \dots 2$ ; bangų nueito kelio ilgis  $l = 2d$ ,  $d$  – atstumas tarp dviejų taškų. Skaičiavimuose laikoma, kad  $a_0 = 1$ ,  $b = 0,8$ , atstumas  $d$  parinktas individualiai kiekvienai echogramai (1,5–3 cm).

Iš 5 paveikslu matyti, kad po korekcijos padidėjo aukštesniųjų dažnio dedamųjų įtaka. (1) matyti, kad nuo ausinių atsispindėjusio echosignalu  $U(t)$  spektras praklauso nuo į ausinius siunčiamo signalo  $a(t)$  spektro. Siekiant sumažinti bangų generavimo grandies (keitiklio) siunčiamo impulso parametru įtaką galutiniams rezultatams, tikslinga kalibruoti matavimo sistemą. Tam reikia sukurti specialias priemones atraminiam spektrui formuoti.



6 pav. Sveikų (ištisinė linija) ir akies auglio (trūki linija) ausinių radijo dažnio signalų autokoreliacinių funkcijų palyginimas

Tikimasi, kad radijo dažnio echosignale esančią informaciją apie ausinio mikrostruktūros įtaką signalo pobūdžiui gali atskleisti ir signalo autokoreliacinių funkcijų tyrimai. Autokoreliacinė funkcija gauta koreliuojant signalą su tuo pačiu pavėlintu signalu. Iš matavimo grafiku, pateiktų 6 paveiksle, matyti, kad autokoreliacinės funkcijos forma priklauso nuo ausinio tipo. Funkcijai įvertinti panaudota jos efektinė vertė.

### Eksperimento rezultatų aptarimas

Eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikti lentelėje. Duomenų bazę sudarė 22 auslių ir 22 sveikų ausinių radioechogramos. Skaičiavimai parodė, kad sveikų ausinių ir auslių ausinių spektriniai tankiai ir autokoreliacinės funkcijos gana smarkiai skiriasi. Auslių ausinių vidutinis spektro dažnis padidėja, matyt, dėl to, kad atsiranda mikrodariniai ir pagal Reilio (Reylayght) dėsnį aukštesnio dažnio bangų atspindžio intensyvumas didėja.

Iš skaičiavimų matyti, kad atskirai nei radijo dažnio signalų spektro plotis, nei autokoreliacinės funkcijos efektinė vertė nėra patikimi klasifikavimo parametrai (1 lentelė). Tačiau klasifikavimui naudojant šiuos parametrus kartu su kitais parametrais galima tikėtis gerų rezultatų, kadangi šių parametru tarpusavio koreliacija sveikam

audiniui siekia -0,57, sveikam audiniui su koreguotu spektru – -0,54, augliui – -0,6.

**1 lentelė.** Spekto pločio ir autokoreliacinės funkcijos efektinės vertės pasiskirstymas

	Spekto plotis, MHz		Autokoreliacinės funkcijos efektinė vertė	
	Vidurkis	Vidutinis kvadratinis nuokrypis	Vidurkis	Vidutinis kvadratinis nuokrypis
Augliai	6,49	±1,93	0,114	±0,014
Sveiki audiniai	4,96	±1,57	0,13	±0,015
Sveiki audiniai (koreguoti)	5,09	±1,09	0,13	±0,015

Įvairios audinių struktūros nevienodai keičia sklindančių akustinių bangų parametrus. Audinių struktūras siūloma skirstyti į determinuotas ir stochastines.

Determinuotoms struktūroms būdingi staigūs akustinės varžos pokyčiai, duodantys didelį atspindžio koeficientą. Stochastinės struktūros turi daug atsitiktinai išsidėsčiusių smulkių atspindinčių dalelių. Determinuotoms struktūroms svarbiausia yra audinio storis arba periodiškumas. Manoma, kad stochastiniams audiniams svarbūs spektrinis tankis koordinatinių pradžioje  $S_0$  (kai  $f=0$ ) ir spektrinio tankio dažninės charakteristikos statusas  $m$ . Papildomas parametras gali būti spektrinio tankio vidurkis.

Manoma, kad spekto statusas mažėja, didėjant efektyviam atspindinčių dalelių dydžiui, tuo tarpu spektrinis tankis koordinatinių pradžioje didėja, didėjant atspindinčių dalelių dydžiui, koncentracijai ir akustiniams impedansui. Spektrinio tankio vidurkis:

$$S_C = S_0 + m \cdot f_c ; \quad (8)$$

čia  $f_c$  – centrinis dažnis.

Pasiūlytus echospektrinius parametrus (vidutinis dažnis, spekto plotis ir autokoreliacinės funkcijos efektinė vertė) galima panaudoti audinių identifikavimo klasifikatoriuje.

## Literatūra

1. **Lizzi F.L., Feleppa E.J., Kaiser Alam S., Deng Ch.X.** Ultrasonic spectrum analysis for tissue evaluation // Pattern Recognition Letters. – 2003. – No. 24. – P. 637–658.
2. **Tateishi T., Machi J., Feleppa E. J., Oishi R., Jucha J., Yanagihara E., Mccarthy L. J., Noritomi T., Shirouzu K.** In vitro diagnosis of axillary lymph node metastases in breast cancer by spectrum analysis of radio frequency echo signals // Ultrasound in Medicine & Biology. – 1998. – Vol.24, No.8. – P. 1151–1159.
3. **Паункснис А., Лукошявичюс А., Дакартавичене Э.** Применение ультразвуковой спектрометрии для исследования структурных параметров глаз // Достижения биомеханики в медицине. Тезисы докладов международной конференции. – Рига, 1986. – С. 297–303.
4. **Lövström B.** Ultrasonic Attenuation - A Comparison of Three Estimation Methods // Acta Ophthalmol. – 2002. – Vol.3, No.4. – P. 1–8.
5. **Paunksnis A., Kurapkienė S., Mačiulis A., Raitelaitienė R., Jurkonis R., Lukoševičius A.** Estimation of ultrasound attenuation coefficient of human diabetic cataract // Ultragaršas. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr.1. – P.37–40
6. **Sugata Y., Murakaami K., Masayasu I., Yamamoto Y.** An application of ultrasonic tissue characterization to the diagnosis of cataract // Acta Ophthalmol. – 1992. – Vol.70, Suppl. 204. – P. 35–39.
7. **Žakauskas M., Mačiulis A., Kopustinskas A., Paunksnis A., Krivaitienė D.** Evaluation parameters and technique for classification of intraocular tumours // Ultragaršas. – Kaunas: Technologija, 2003. – Nr.4. – P. 48–52.

Pateikta spaudai 2004 04 09

**M. Žakauskas, A. Mačiulis, A. Kopustinskas, A. Paunksnis, S. Kurapkienė, D. Jegelevičius.** Echospektriniai audinių įvertinimo metodai // Elektronika ir elektrotechnika. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 7(56). – P. 70–73.

Vienas svarbiausių medicininės diagnostikos uždavinių – audinių struktūros bei morfologijos įvertinimo metodų kūrimas. Labiausiai paplitęs vizualizacijos metodas yra ultragaršinė vizualizacija. Šiuo metu plačiausiai taikoma kokybinė audinių vizualizacija, naudojant A, B, M vaizdus. Tačiau, taikant įprastus metodus, prarandama dalis echosignale slypinčios vertingos informacijos. Echospektriniai metodai leistų efektyviau panaudoti informaciją, esančią radijo dažnio echosignale. Straipsnyje pateikiama ultragaršinių radiodažnių signalų registravimo metodika, aprašomi galimi echospektriniai parametrai ir jų panaudojimo galimybės. Il. 6, bibl. 7 (lietuvių kalba; santraukos lietuvių, anglų ir rusų k.).

**M. Žakauskas, A. Mačiulis, A. Kopustinskas, A. Paunksnis, S. Kurapkienė, D. Jegelevičius.** Echospectral Methods of Tissue Evaluation // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas: Technologija, 2004. – Nr. 7(56). – P. 70–73.

Development techniques of estimation structure of tissues is one of the main task in medical diagnostics. At present time for this purpose is widely using qualitative ultrasound imaging technique, based on the evaluation of the A, B, M scans. In this case significant part of valuable information, existing in echosignal is inaccessible. New technique for registration, experimental investigation ultrasound radiofrequency signals from tissue are presented in this paper. Echospectral methods allow to get additional information about tissue structure. It is shown mean spectral frequency is higher for tumour tissue. Il. 6, bibl. 7 (in Lithuanian; summaries in Lithuanian, English, Russian).

**М. Жакаускас, А. Мачюлис, А. Копустинскас, А. Паункснис, С. Курапкене, Д. Иегелевичюс.** Эхоспектральные методы для оценки тканей // Электроника и электротехника. – Каунас: Технология, 2004. – № 7(56). – С. 70–73.

Одной из важнейших целей медицинской диагностики является создание методов для оценки структуры ткани и морфологии. Чаще всего используется ультразвуковая визуализация. В настоящее время чаще всего используется качественная визуализация тканей. Используя обычные методы исчезает часть полезной информации, находящейся в эхосигнале. Эхоспектральные методы позволяют эффективнее использовать информацию, находящуюся в радиочастотном эхосигнале. Здесь описывается методика регистрации радиочастотных ультразвуковых эхосигналов, возможные эхоспектральные параметры и возможности их использования. Ил. 6, библи. 7 (на литовском языке; рефераты на литовском, английском и русском яз.).

DOI: 10.5755/j02.eie.10885