

Ultragarsinio artimojo lauko charakteristikø slopinanèioje aplinkoje apskaièiavimo metodas

A.Lukoðevièius, R.Jurkonis

Kauno technologijos universitetas

Åvadas

Ultragarsiniø keitikliø spinduliuojami laukai laisvoje erdvėje modeliuojami jau seniai. Sukurti åvairūs ir åvairaus adekvatumo laipsnio ultragarsiniø laukø teoriniai modeliai [1, 2]. Bet dauguma modeliø yra supaprastinti, laikant, kad ultragarsinè energija spinduliuojama å neslopinanèià aplinkà, kurioje ultragarsinès bangos nepatiria energijos nuostoliø. Be to, modeliai, apytikriai åvertinantys slopinimà, netinka ultragarsiniam artimajam laukui apskaièiuoti. Ultragarsinès bangos slopinimo modeliai dažniausiai netenkina priepastingumo principo. Neatsipvelgiama tai, kad å artimojo lauko taðkà elementariosios ultragarsinès bangos ateina ið skirtingai nutolusio apertūros vietø ir yra skirtingai nuslopinotos. Kaip þinoma, aukðtesniøjø ultragarsiniø dažniø diapazone ultragarsinès bangos patiria dideliø nuostoliø: kuo dažnis aukðtesnis, tuo nuostoliai didesni. Tiek techninèje kontrolèje, tiek medicininèje diagnostikoje naudojami ultragarsiniai metodai, pagrãsti spinduliuojamø ultragarsiniø laukø sàveika su tyrinèjama aplinka. Pats ultragarsinis laukas ir jo pokyèiai tyrinèjamoje aplinkoje yra pirminès informacijos åaltinis. Taigi ultragarsiniø artimøjø laukø slopinanèioje aplinkoje modeliavimas yra aktuali ir dar neiðspræsta problema.

Teorinis modelis

Þinomi keli ultragarsiniø laukø slopinanèioje aplinkose teorinio modeliavimo artiniai. Tai - banginiø lygèiø sprendimo [2] bei apertūros impulsinès charakteristikos (AICH) [4] metodai.

Antrasis - AICH metodas naudojamas tiek stacionariojo, tiek pereinamojo darbo reþimø ultragarsiniam laukams modeliuoti [5]. Akustinio slègio pasiskirstymas erdvėje upraðomas virpamojo greièio potencialo iðvestine:

$$p(x, y, z, t) = -\rho \frac{\partial \varphi(x, y, z, t)}{\partial t}; \quad (1)$$

èia ρ - homogeninès aplinkos tankis; $\varphi(x, y, z, t)$ - virpamojo greièio potencialo pasiskirstymas erdvėje:

$$\varphi(x, y, z, t) = \iint_{\tau S} A(x, y, t) \cdot \frac{\delta(t - \tau - \frac{R}{c})}{2\pi R} dS d\tau; \quad (2)$$

èia $A(x, y, t)$ - spinduliuojanèios apertūros apertūrinè funkcija, kuri iðskaidoma å laikinà ir erdvinà komponentes: $A(x, y, t) = v(t)A'(x, y)$; $v(t)$ - virpamojo greièio signalas apertūroje; $A'(x, y)$ - virpamojo greièio signalo amplitudès pasiskirstymas apertūroje; $\delta(t - \tau - \frac{R}{c})$ - Dirako delta funkcija; S - integravimo pagal apertūros plotà kintamasis; τ - integravimo pagal laikà kintamasis; R - atstumas nuo apertūros elemento dS iki erdvès taðko $M(x, y, z)$; c - ultragarso greitis homogeninèje aplinkoje.

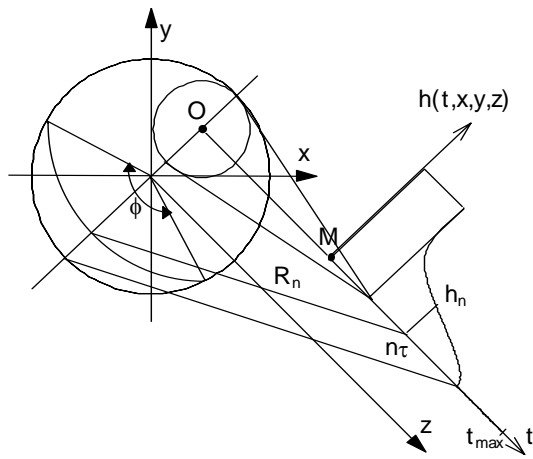
Dirako delta funkcijos integralas pagal apertūros plotà ir yra AICH:

$$h(x, y, z, t) = \int_S \frac{\delta(t - \tau - \frac{R}{c})}{2\pi R} dS. \quad (3)$$

Funkcija $h(t, x, y, z)$, arba AICH, yra sferiniø bangø, spinduliuojamø ið kiekvieno elementaraus åaltinio dS superpozicijos rezultatas homogeninès aplinkos taðke $M(x, y, z)$. Homogeninè slopinanti aplinka modifikuoja AICH priklausomai nuo elementariøjø sferiniø bangø sklidimo kelio ilgio. Todël slopinanèioje aplinkoje AICH $h_\alpha(t, x, y, z)$ galima apskaièiuoti pagal formulà [6]:

$$h_\alpha(x, y, z, t) = \iint_{\tau S} \frac{\delta(t - \tau - \frac{R}{c})}{2\pi R} \cdot g_\alpha(t - \tau, c\tau) dS d\tau; \quad (4)$$

èia $g_\alpha(t, c\tau)$ yra aplinkos sluoksniu akustinè impulsinè charakteristika, åvertinanti åios aplinkos slopinimà [8, 9].



1 pav. Apertūra ir jos impulsinė charakteristika (AICH) greičio potencialui laisvoje erdvėje nustatyti.

Integravimas (3) formulėje pagal apertūros plotą S pakeičiamas analitinės - diskretinės funkcijos, vadinamos ekvidistancinės linijos funkcija, skaičiavimā [7]. Dvimatis integravimas pakeičiamas ā kreiviniū integralū sumā. Integravimo kreivė laikomas ekvidistancinio apskritimo lankas, iūbrėpiamas iū taūko O apertūroje. Ąprastinis AICH formavimasis neslopinanēioje darbinēje erdvēje pailiustruotas 1 paveiksle. Ūiuo atveju AICH erdvės taūke M , ūymima kaip $h(t, x, y, z)$, formuojasi pagal apskritiminiū ekvidistanciniū linijū apertūroje lanko kampū ϕ [7]. Ekvidistancinės linijos yra ūpdari apskritimai arba apskritimū lankai. Taigi kiekvienu diskretiniu laiko momentu $n\tau$ funkcija $h(t, x, y, z)$ āgauna amplitudā h_n , proporcingā apskritimo lanko kampui ϕ .

Taigi AICH neslopinanēioje aplinkoje formuojasi kaip integralinē elementariū ōaltiniū, esanēiū ant ekvidistanciniū linijū apertūroje, suma. Kiekvienu laiko momentu AICH amplitudē proporcinga ekvidistancinės linijos lanko kampui. Kiekvienos ekvidistancinės linijos indēlā ā AICH galime traktuoti kaip tam tikros amplitudės delta impulsā, pasirodantā laiko momentu $t=R'/c$ (ēia R' - atstumas nuo tiriamojo taūko iki ekvidistancinės linijos apertūroje).

Norint āvertinanti slopinimā aplinkoje, reikia modifikuoti AICH apskaiēiavimo algoritmā pagal (4) formulā. Algoritmas modifikuojamas laikantis dekompozicijos principo. (4) formulē iū esmēs reiūkia vadinamājā D transformacijā [4].

Slopinanēiā aplinkā laikysime izotropine, homogenine, o jos daŋninā slopinimo funkcijā nulemia tik ultragarso absorbcija medŋiagoje.

Nagrinēdami slopinanēiā aplinkā, turime atsipvelgti ā tai, kad kiekvienas, aukūēiau minētas, elementarusis AICH diskretas jau nēra

delta impulsas. Esant slopinimui, kiekvienos ekvidistancinės linijos indēlis ā AICH atitinka R storio slopinanēio sluoksnio impulsinā charakteristikā. Taigi AICH pradŋioje yra artimesniūjū, o pabaigoje - tolimesniūjū ekvidistanciniū linijū sugeneruotū bangū superpozicijā. Grafinē diskretiniū AICH formavimosi laisvoje ir slopinanēioje aplinkose interpretacija, atitinkamai $h(t, x, y, z)$ ir $h_a(t, x, y, z)$, pateikta 2 paveiksle. Neslopinanēioje aplinkoje paelemenēiui sumuojamos delta impulsū sekos, o slopinanēioje - sluoksnio impulsinės charakteristikos. Abiem atvejais sumuojamū dēmenū amplitudiniai svoriai proporcingi lanko kampui ϕ .

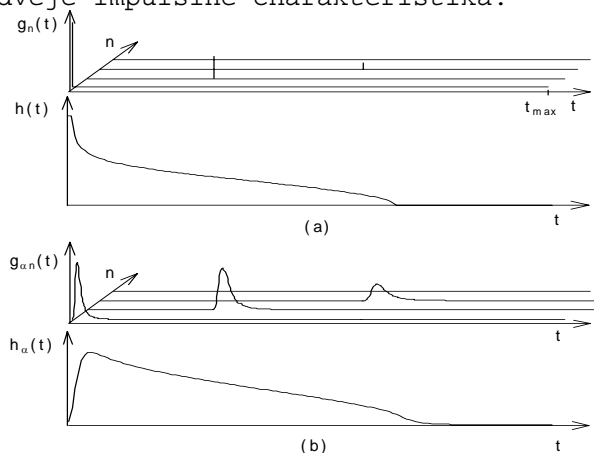
D transformacija, naudojama apskaiēiuojant AICH slopinanēioje aplinkoje pagal (4) formulā, iū esmēs yra Urisono integralinē transformacija. Nagrinējamuū atveju ji gali būti interpretuojama kaip nuosekliai kintanēio branduolio konvoliucija tarp sluoksnio impulsinės charakteristikos $g_a(t, R)$ ir AICH neslopinanēioje aplinkoje $h(t, x, y, z)$. Sutrumpintai (4) formulā galime ūpraūyti taip [4]:

$$h_a(t, x, y, z) = \frac{c}{\pi} \int_{\tau_1}^{\tau_2} g_a(t - \tau, c\tau) \cdot h(\tau, x, y, z) d\tau. \quad (6)$$

Skaimeninē ūpraūymo forma yra sumos pavidalo:

$$h_a(t, x, y, z) = \sum_{n=0}^{N-1} [g_{a_n}(t - n\tau, c\tau) \cdot h(n\tau, x, y, z)]; \quad (7)$$

ēia $\sum[*]$ - N sekū sumavimas paelemenēiui; $g_{a_n}(t, R)$ - izotropinės homogeninės aplinkos sluoksnio tarp n -tosios ekvidistancinės linijos ir taūko erdvēje impulsinē charakteristika.



2 pav. Grafinē AICH formavimosi laisvoje (a) ir slopinanēioje (b) aplinkose interpretacija.

Ji apskaiēiuojama remiantis priēpastingumo principu. Taigi jā modeliuoti reikia fiziūkai realizuojama sistema. Laikome, kad slopinanēios aplinkos sluoksnio dispersinē funkcija

yra vienareikšmiškai susijusi su sluoksniu slopinimo funkcija per Hilberto transformaciją. Èia taikoma vienmaèio sluoksniu priepastinės impulsinės charakteristikos apskaièiavimo metodika jau naudota ir aptarta darbuose [8,9]. Impulsinė charakteristika, atitinkanti ultragarsinės bangos nueitąjį kelià R_n , uþraðoma taip:

$$g_{\alpha_n}(t, R_n) = AFT \left[e^{(-\alpha_n(f, R_n) + j\beta_n(f, R_n))} \right]; \quad (8)$$

èia $AFT[*]$ - atvirkðtinë Furjè transformacija.

Aplinkos sluoksniu, kurio storis R_n , kompleksinės perdavimo funkcijos realioji ir menamoji dalys yra tokios:

$$\alpha_n(f, R_n) = \alpha_0 \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^m \cdot R_n, \quad (9)$$

$$\beta_n(f, R_n) = HT[\alpha_n(f, R)]; \quad (10)$$

èia $HT[*]$ - Hilberto transformacija.

$$R_n = z + n \cdot c \tau; \quad (11)$$

èia z - koordinatë; c - ultragarso greitis aplinkoje (nedispersinë greièio dedamoji); τ - laiko diskretizavimo intervalas. Taigi R_n yra lygus tyrinëjamo taðko atstumui iki apertûros plius diskretiðkai didëjanti dedamoji $n c \tau$, t.y. atstumo prieaugis. Algoritmas reikalauja, kad laiko diskretizavimo intervalas τ visuose sekose: $h(t)$, $h_\alpha(t)$ ir $g_\alpha(t, R)$ bûtø tas pats ir lygus

$$\tau = \frac{t_{\max}}{N}, \quad \text{èia } t_{\max} - \text{skaièiuotinë}$$

realizacijø trukmë; N - atskaitø tose realizacijose skaièius. Skaièiuojant dþnines charakteristikas, maksimalusis dþnis yra $f_{\max} = \frac{N}{2t_{\max}}$.

$$f_{\max} = \frac{N}{2t_{\max}}.$$

Kaip matome, skaitmeninis laukø apskaièiavimo algoritmas vienareikšmiškai susieja laiko ir dþnio diskretizavimà, todël buvo imtasi áprastø priemoniø diskretiniø sekø spektro sanklotai iðvengti.

Naudojantis AICH slopinanèioje aplinkoje galima apskaièiuoti harmoniniu reþimu dirbanèios apertûros spinduliuojamà laukà [5]:

$$P_{har}^*(r, z, t) = -j\omega_0 \rho A e^{j(\omega_0 t + \varphi)} \cdot \theta(r, z, t); \quad (12)$$

$$\text{èia } \theta(r, z, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h_\alpha(r, z, \tau) \cdot e^{-j\omega_0 \tau} d\tau; \quad A \text{ ir } \varphi -$$

harmoninio virpamojo greièio apertûroje amplitudë ir fazë, ω_0 - harmoninio virpesio kampinis dþnis; ρ - homogeninės aplinkos tankis. Dþnio ω_0 harmoninio lauko amplitudþiø pasiskirstymas apskaièiuojamas taip:

$$P_{har}(r, z, t) = \left| P_{har}^*(r, z, t) \right|. \quad (13)$$

Kai apertûra spinduliuoja realøjá impulsiná virpamojo greièio signalà $v(t)$, spinduliuojamas laukas apskaièiuojamas pagal (2) formulà. Èia reikia pasinaudoti ir (4) formule, kad bûtø pakeistas ploto intergalas á aukðèiaiu aptartu būdu apskaièiuojamà AICH slopinanèioje aplinkoje $h_\alpha(x, y, z, t)$. Taip pertvarkius (2) formulà, gaunamas sukinio intergalas:

$$\varphi(x, y, z, t) = \int_{\tau} A(x, y, \tau) \cdot h_\alpha(x, y, z, t - \tau) d\tau, \quad (14)$$

arba, ávedus radialinà koordinatà r bei apertûrinà funkcijà laikant lygia vienetai $A'(x, y) = 1$, - sukiny:

$$\varphi_{sig}(r, z, t) = h_\alpha(r, z, t) \otimes v(t); \quad (14)$$

èia $v(t)$ - virpamojo greièio apertûroje signalas.

Apertûros spinduliuojamas signalas $v(t)$ sumodeliuotas keitiklio ekvivalenèiøjø keturpoliø metodu. Gautasis virpamojo greièio apertûroje signalas $v(t)$ panaudotas visuose signalinio lauko amplitudþiø pasiskirstymo skaièiavimuose. Á virpamojo greièio amplitudæ ir fazës pasiskirstymà apertûroje neatsiþvelgiama. Laikoma, kad $v(t)$ viroje apertûroje turi toká pavidalà, kaip parodyta 3 paveiksle.

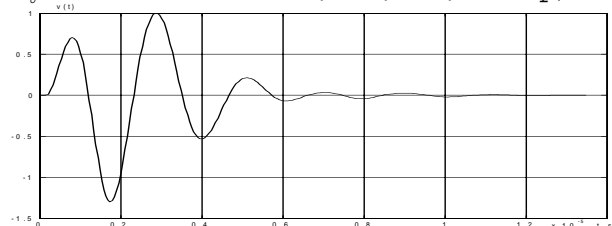
Ðiuo reþimu spinduliuojamà ultragarsiná laukà vadinsime impulsiniu signaliniu lauku, o jo pasiskirstymà erdvėje vizualizuosime kaip maksimaliø akustinio signalo amplitudþiø pasiskirstymà tyrinëjamuose erdvës taðkuose:

$$\varphi_{sig_{\max}}(r, z) = \text{MAX}[\varphi_{sig}(r, z, t)]. \quad (15)$$

Rezultatai

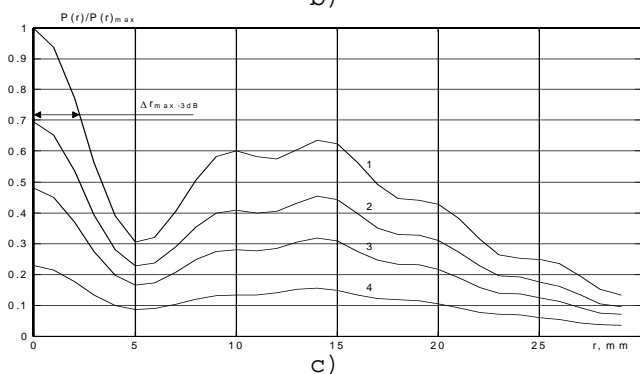
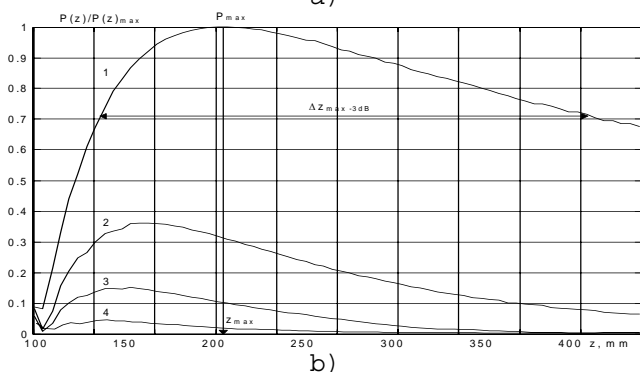
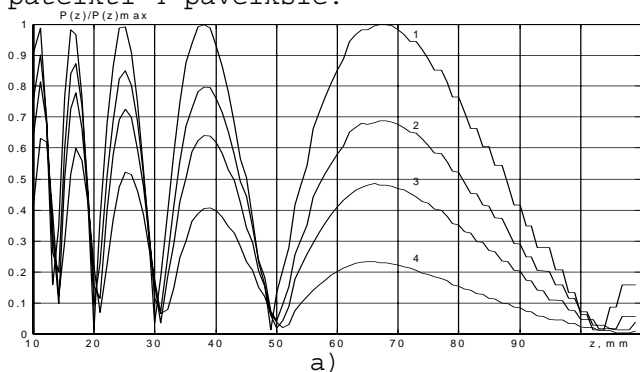
Vaizdumo dëlei teoriniai modeliai panaudoti 50 mm skersmens apskritajai apertûrai, spinduliuojanèiai á slopinanèià aplinkà 0.5 MHz harmoniná signalà.

Aplinkos slopinimo dþninë funkcija $\alpha(f, R)$ parinkta artima þmogaus minkðtøjø audiniø slopinimo funkcijai, bûtent: koeficientas $\alpha_0 = 10 \text{ Np/m}$, kai $f_0 = 1 \text{ MHz}$; ir laipsnio rodiklis $m = 1, 2$. Norint iðryðkinti slopinimo átakà akustinio lauko amplitudþiø pasiskirstymui, slopinimo koeficientas α_0 buvo keièiamas: 0; 10; 20; 40 Np/m.



3 pav. Virpamojo greižio signalas apertūroje. Pjezoelementas iš PZT keramikos; elektromechaninio ryšio koeficientas $k_t=0,43$; darbinis dažnis $f_0=0,5\text{MHz}$; normuotasis dempferio akustinis impedansas $k_i=0,3$; normuotasis akustinio suderinančiojo ketvirčio bangos sluoksnio akustinis impedansas $k_s=0,14$; lygiagretusis koreguojan-tysis induktyvumas $L_k=22\mu\text{H}$

Ultragarsinio spindulio išilginiai ir skersiniai amplitudiniai profiliai pateikti 4 paveiksle.



4 pav. Harmoniniu reþimu dirbanþios apskritosios apertūros spindulio amplitudiniai profiliai: a) išilgai spindulio artimajame lauke, b) išilgai spindulio tolimalajame lauke ir c) skerspjūvyje ties $z=70\text{mm}$, kai aplinkos slopinimo koeficientas α_0 : 1) - 0; 2) - 10; 3) - 20 ir 4) - 40 Np/m

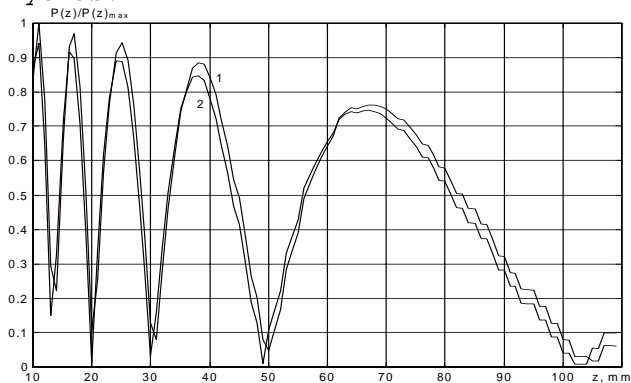
Rezultatai gauti pasiūlytuoju D transformacijos metodu, palyginti su paprastu vienmaëiu slopinimo ávertinimu, t.y. ávedant daugiklá

$$K(z) = e^{-\alpha_0 \left(\frac{0,5}{1}\right)^{1,2} z}$$

Kai slopinimo

koeficientas $\alpha_0=10$ Np/m, gauname 5 paveiksle parodytà rezultatà. Galime teigti, kad pasiūlytasis trimatis slopinimo ávertinimas duoda ryðkesnà efektà tik artimojo lauko zonoje, o

tolimojo lauko zonoje efektas nėra toks ryðkus.

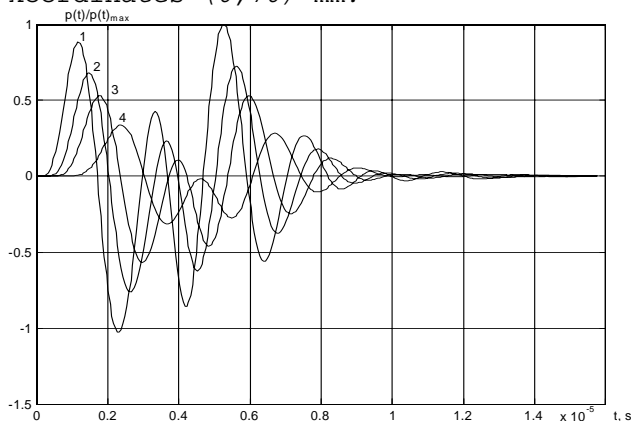


5 pav. Harmoniniu reþimu dirbanþios apskritosios apertūros spindulio amplitudiniai išilginiai profiliai: 1 - apskaiëiuotas pasiūlytuoju D transformacijos metodu, 2 - apskaiëiuotas vienmaëiu slopinimo ávertinimo artëjimu

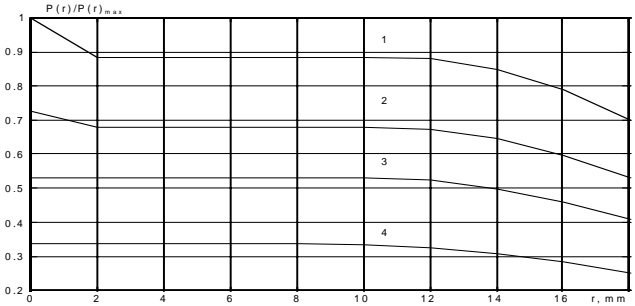
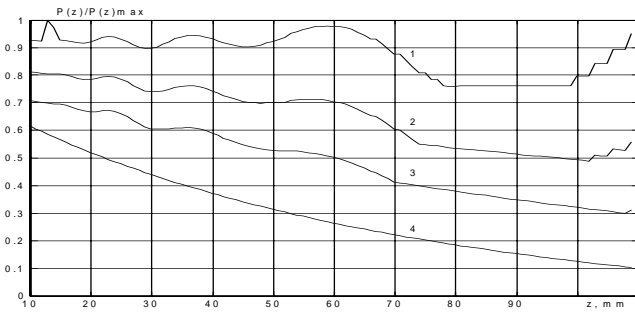
Lentelë. Harmoniniu reþimu dirbanþios apskritosios apertūros ultragarsinio spindulio parametrai

Parametras	Slopinimas, α_0 , Np/m			
	0	10	20	40
P_{max}	1	0.36	0.15	0.03
Z_{max}	1	0.81	0.77	0.67
$\Delta z_{max -3dB}$	1	0.41	0.29	0.13
$\Delta r_{max -3dB}$	1	0.75	0.75	2

Tai, kad modeliuojamas signalinis laukas atitinka priebastingumo principà, matyti iš 5 paveiksle pateiktø keturiø signalinio lauko realizacijø erdvës taðke, kurio koordinatës (0,70) mm.



6 pav. Akustiniai signalai slopinanþios aplinkos taðke (0,70) mm, kai aplinkos slopinimo koeficientas α_0 : 1 - 0; 2 - 10; 3 - 20 ir 4 - 40 Np/m



7 pav. Impulsinio signalinio lauko amplitudþio iðilginiai (a) ir skersiniai ties $z=70\text{mm}$ (b) profiliai, kai aplinkos slopinimo koeficientas α_0 : 1 - 0; 2 - 10; 3) - 20 ir 4 - 40 Np/m

Iðvados

Pasiûlytas slopinimo aplinkoje ávertinimo metodas. Slopinimas ávertinamas naudojantis laipsnine daþnine slopinimo funkcija. Metodà galima taikyti tiek harmoniná, tiek impulsiná signalà spinduliuojanèios apertûros laukams modeliuoti. Rezultatø analizè parodè, kad pasiûlytasis metodas taikytinas artimajam laukui apskaièiuoti, nes tik èia verta ávertinti daþninà slopinimo priklausomybà sudètingu trimaèiu bûdu. Metodas palyginti imlus maðininio laiko iðtekliø, o skaièiavimø trukmè padidèja iki 30 kartø. Impulsinio signalinio lauko analizè rodo, kad tenkinamas prieþastingumo principas. Apertûrai spinduliuojant impulsiná akustinà signalà, interferenciniai reiðkiniai artimajame lauke slopsta, o esant didesniajam slopinimui aplinkoje iðvis pranyksta.

Literatûra

1. Archer-Hall J.A. and Gee D. A single integral computer method for axisymmetric transducers with various boundary conditions. NDT International, June, pp.95-101. 1980.
2. Deville M., Giraud O. and Guyomar D. Modal analysis of transient diffraction in absorbing media. Application to focusing. IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, vol.2, pp.683-687. 1985.
3. Ènneáááááááá áeóndè-ánèíáí ñèy, ñíçááááááááí óeüððàçáeíáíé èíeüoááíé ðáçáðèíé.// Áeáíeíáe- Á., Áae-þíáí Á., Èeéioýáe-þí Á., Ìeéáðeáí Ý. Ultragarsas.-1992. No.24.- P.30-44.
4. Èeéioýáe-þí Á.È., Áñáðeáñ Á.È., Áaeíáeóneáñ È.Ñ Áíaeèç íòí-ðòðáíðáááíí-áðáááííüò íðáíáðàçáíáíeé á èçíáðeðáeüíí èáíaeá ñ çáðóðáíeáí.// Ðáeíýeáeððííeèá: Oáçenü ðáííóáeèeáííeíe èííóáðáíeèe "Ðàçáeðeá ðáðíe-áñèeð íáeé á ðáííóáeèeá, íóðe è ñíñíáü èñneááááááéy èð ðàçeüðáðáíá", 1987.- P.6-7.
5. Reibold R., Kapys R. Radiation of a rectangular strip-like focussing transducer. Ultrasonics, vol.30, pp.49-55. 1992.
6. Jensen J.A., Gandhi D., O'Brien W.D. Ultrasound fields in an attenuating medium. IEEE Ultrasonic Symposium Proceedings, vol.2, pp.943-946, 1993.
7. Èeéioýáe-þí Á., Áaeíáeóneáñ K. Áíaeèç íòí-ðòðáíðáááííüò ðáðáeðáðeðeèe øeðíeííeííüò óeüððàçáeíáíüò èçíáðeðáeüííüò ððáeðáíá.//Ultragarsas.-1987.- No.19.-P.88-97.
8. Lukoðevièius A., Jurkonis R. Simulation of Ultrasonic Echoscropy of Eye.// Elektronika ir elektrotechnika,.- 1995.-No.4.-P.43-48.
9. Kuc R. Modeling acoustic attenuation of soft tissue twith minimum-phase filter. Ultrasonic Imaging, vol.6, pp.24-36. 1984

A.Lukoðevièius, R.Jurkonis

Ultrasonic near field in lossy media: method of simulation

Summary

Transient ultrasonic field generated by finite aperture is strongly influenced by frequency dependent attenuation of media. The method of near field simulation in such a lossy media is presented. Significant differences between attenuation of ultrasonic waves which came to a particular field point from particular points of aperture, because of the near ultrasonic field (Fresnel zone). Urison type integral transformation was used in transient field calculations. Digital algorithm was developed and field distributions were compared in two cases: when causal model of frequency dependent attenuation in the media was concerned and when attenuation was neglected. Examples of calculations presented had shown that transient near field is distorted by higher degree to comper with continuous wave field in the media with same losses.