

Elektroakustinio matavimo kanalo parametrų parinkimas

L. Jakevičius, O. Tumšys, J. Butkus, G. Gudavičius

*Kauno technologijos universitetas
Srautų diagnostikos laboratorija*

Skysčių ir dujų srauto debito apskaitai dažnai taikomi akustiniai matavimo metodai, pagrįsti skersiniu tiriamosios aplinkos zondavimu. Tačiau tiriamosios aplinkos nevienalytiškumo ir srauto greičio pasiskirstymo sukelti refrakcijos reiškiniai riboja sritį, į kurią gali patekti siunčiančiojo elektroakustinio keitiklio spinduliuojami akustiniai signalai [1]. Tai būtina įvertinti konstruojant elektroakustinius matavimo kanalus ir parenkant juose akustinių keitiklių išdėstymą. Be to, siekiant akustinių signalų priėmimo patikimumo tam tikrame tiriamosios aplinkos parametrų dinaminiam diapazone, reikia optimaliai parinkti akustinių keitiklių parametrus ir akustinių signalų išspinduliavimo į tiriamą aplinką kampą α_0 . Jei tiriamoji aplinka juda mažu greičiu ir yra homogeniška, tai tuomet galima teigti, kad srauto profilis yra plokščias ir, atliekant skaičiavimus, naudoti išraišką:

$$\tau = \frac{l_0}{c \pm u \cdot \sin \alpha_0}; \quad (1)$$

čia l_0 ir l_0 atitinkamai akustinių signalų sklidimo tarp daviklių trukmė ir kelias, c ir u - akustinių signalų sklidimo ir srauto tekėjimo greičiai, α_0 - akustinių signalų išspinduliavimo į tiriamą aplinką kampas (kampas tarp statmens srautui ir akustinių signalų sklidimo krypties). Tačiau išraiškose, aprašančiose akustinių keitiklių orientaciją matavimo kanale, vietoj kampo α_0 patogiau naudoti kampą ψ , kurį sudaro tiesė NN, einanti per akustinių keitiklių centrus, ir akustinių signalų išspinduliavimo kryptis (1 pav.).

Iš 1 pav. matyti, kad

$$\sin \psi = \frac{u \cos \xi}{c} = M \cos \xi. \quad (2)$$

Iš čia

$$\psi = \arcsin(M \cos \xi). \quad (3)$$

Jeigu M (Macho skaičius) kinta intervale nuo M_1 iki M_2 , tuomet kampas ψ kis nuo

$$\psi_1 = \arcsin(M_1 \cos \xi) \quad (4)$$

iki

$$\psi_2 = \arcsin(M_2 \cos \xi). \quad (5)$$

Tačiau pakeisti elektroakustinių keitiklių spinduliavimo kryptį, kai pastarieji sumontuoti matavimo kanale, yra gana sunku. Šią problemą galima išspręsti parenkant pjezokeitiklių kryptingumo diagramos plotį ir jų montavimo vietą bei orientaciją elektroakustiniame matavimo kanale taip, kad pasiūsti akustiniai signalai pasiektų priimantįjį elektroakustinį keitiklį visame srauto greičio kitimo dinaminiam diapazone.

1 pav. Akustinio keitiklio kryptingumo diagramos parinkimas.

Tegu tiriamoji aplinka zonduojama nepertraukiamu signalu ir naudojami diskiniai elektroakustiniai keitikliai. Tuomet sukurtu akustinio lauko kryptingumo diagrama 0,707 lygyje aprašoma formule [2]:

$$v = 2 \arcsin \frac{162 \lambda}{\pi d}, \quad (6)$$

čia \square - pagrindinio kryptingumo diagramos lapelio plotis 0,707 lygyje; λ - spinduliuojamos akustinės bangos ilgis; d - pjezoelemento diametras.

Kad siunčiamas akustinis signalas pasiektų priimantįjį keitiklį, turi būti patenkinta sąlyga:

$$v = \psi_2 - \psi_1. \quad (7)$$

Į išraišką (7) įstačius formules (4) ir (5) gausime

$$\frac{2,29 \lambda}{\pi d} = \sqrt{1 - \sqrt{1 - \cos^2 \xi} (\Theta - \Omega)}; \quad (8)$$

čia $\Theta = M_2 \sqrt{1 - M_1^2 \cos^2 \xi}$, $\Omega = M_1 \sqrt{1 - M_2^2 \cos^2 \xi}$.

Kaip matome iš formulės (8), atitinkamai parenkant akustinių signalų bangos ilgį λ ir pjezoelemento diametrą d , galime gauti tokią akustinio keitiklio kryptingumo diagramą, kad tiriamojoje aplinkoje, Macho skaičiui kintant intervale nuo M_1 iki M_2 , išspinduliuoti akustiniai signalai visada patektų į priimantįjį elektroakustinį keitiklį. Tačiau to nepakanka. Stabiliam akustinių signalų priėmimui, pjezokeitikliai matavimo kanale turi būti orientuoti atitinkamomis kryptimis. Kadangi elektroakustinio keitiklio kryptingumo diagrama turi apimti intervalą nuo kampo ψ_1 iki kampo ψ_2 (1 pav.), tai statmuo pjezoelemento darbiniam paviršiui turi eiti per šių kampų vidurį. Tokiu atveju jis su tiese NN sudarys kampą

$$\zeta = \frac{\psi_1 + \psi_2}{2}. \quad (9)$$

Į išraišką (9) įstatę formules (4) ir (5), gauname:

$$\zeta = \frac{1}{2} \arcsin[\cos \xi (\Omega + \Theta)]. \quad (10)$$

Jeigu naudojantis algoritmais (8) ir (10) bus parinktas elektroakustinių keitiklių kryptingumo diagramos plotis ir šių keitiklių orientacija matavimo kanale, tai, tiriant aplinkas, turinčias mažą nevienalytiškumą ir judančias mažais greičiais, siunčiami akustiniai signalai bus stabiliai

registruojami priimančiąjame elektroakustiniame keitiklyje.

Matavimų metu tenka susidurti su atvejais, kai tiriamojoje aplinkoje M kinta nuo 0 iki M_2 . Šiais atvejais algoritmai (8) ir (10) įgauna atitinkamas išraiškas:

$$\frac{2,29 \lambda}{\pi d} = \sqrt{1 - \sqrt{1 - M_2^2 \cos^2 \xi}} \quad (11)$$

ir

$$\zeta = \frac{1}{2} \arcsin(M_2 \cos \xi). \quad (12)$$

Tačiau šie algoritmai netinka elektroakustinio matavimo kanalo parametrų parinkimui, kai tiriamosios aplinkos judėjimo greičiai yra dideli arba kai ji yra nevienalytė. Tuomet akustinių signalų sklidimą pradeda įtakoti atsiradę refrakciniai reiškiniai. Akustinių signalų, sklindančių tokioje aplinkoje, trajektorijos pasidaro sudėtingos kreivės, pasikeičia priklausomybė tarp kampų α_0 ir ξ . To pasekoje formulė (2) tampa klaidinga ir, naudojantis algoritmais (8) ir (10) negalima apskaičiuoti elektroakustinio kanalo parametrų užtikrinančių stabilų akustinių signalų patekimą į priimantįjį elektroakustinį keitiklį. Šiuo atveju, norint nustatyti reikiamus akustinių signalų išspinduliuojimo kampus α_0 (arba ψ), kai tiriamosios aplinkos parametrai kinta tam tikrame dinaminiam diapazone, galima naudotis refrakcijos reiškinį įtaką įvertinančius algoritmus [3]:

$$y = \int_1^x \frac{u(x) K + c^2(x) \sin \alpha_0}{c(x) \sqrt{K^2 - c^2(x) \sin^2 \alpha_0}} dx; \quad (13)$$

čia $K = c_0 - (u(x) - u_0) \sin \alpha_0$, y - akustinių signalų poslinkis srauto kryptimi, $u(x)$ ir $c(x)$ - atitinkamai srauto ir akustinių signalų sklidimo greičių pasiskirstymo funkcijos tiriamame ruože.

1 lentelė. Akustinių signalų išspinduliuojimo kampo \square priklausomybė nuo srauto parametrų.

$M_{vid.}$	C_{max}/C_{vid} (kai $\xi=30^\circ$)					
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0.0	30.0 -30.0	28.0 -28.0	26.2 -26.2	24.6 -24.6	23.1 -23.1	21.9 -21.9
0.1	24.0 -37.4	22.4 -32.7	21.0 -32.4	19.8 -30.3	18.7 -28.5	17.6 -26.9
0.2	18.7 -47.5	17.5 -43.7	16.4 -40.5	15.5 -37.8	14.6 -35.4	13.8 -33.2
0.3	13.8 -63.6	13.0 -57.3	12.2 -53.4	11.5 -48.3	10.9 -44.8	10.3 -41.9
0.4	9.1 -	8.6 -	8.1 -79.2	7.6 -67.4	7.2 -60.6	6.8 -55.5
0.5	4.2 -	4.0 -	3.8 -	3.6 -	3.3 -	3.2 -

$M_{vid.}$	C_{max}/C_{vid} (kai $\xi=45^\circ$)					
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0.0	45.0 -45.0	41.5 -41.5	38.4 -38.4	35.8 -35.8	33.5 -33.5	31.4 -31.4
0.1	37.9 -54.8	35.2 -50.0	32.7 -45.9	30.6 -42.5	28.7 -39.6	27.0 -37.0
0.2	32.3	30.1	28.1	26.3	24.7	23.4

	-71.9	-63.2	-57.0	-52.0	-47.9	-44.4
0.3	27.7	25.8	24.2	22.7	21.4	20.2
	-	-	-82.3	-68.6	-61.1	-55.6
0.4	23.6	22.1	20.7	19.4	18.3	17.4
	-	-	-	-	-	-81.6
0.5	19.9	18.6	17.5	16.5	15.6	14.7
	-	-	-	-	-	-

M _{vid.}	C _{max} /C _{vid} (kai ξ=60°)					
	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0.0	60.0	54.0	49.1	45.0	42.0	38.7
	-60.0	-54.0	-49.1	-45.0	-42.0	-38.7
0.1	50.8	46.3	42.5	39.3	36.5	34.1
	-77.3	-66.1	-58.7	-53.0	-48.4	-44.6
0.2	44.2	40.6	37.5	34.8	32.5	30.4
	-	-	-77.7	-65.9	-58.5	-53.0
0.3	39.1	36.1	33.5	31.2	29.2	27.4
	-	-	-	-	-81.0	-67.3
0.4	35.0	32.4	30.1	28.1	26.4	24.8
	-	-	-	-	-	-
0.5	31.6	29.3	27.3	25.5	24.0	22.6
	-	-	-	-	-	-

Kokie turi būti akustinių signalų išspinduliavimo kampai α_0 , esant įvairiems tiriamosios aplinkos srauto ir joje sklindančių akustinių signalų greičių paraboliniams pasiskirstymams $u(x)$ ir $c(x)$, turbulentinio tekėjimo atveju [4], kad siunčiami akustiniai signalai patektų į priimančiąjį elektroakustinį keitiklį, pateikta 1 lentelėje. Šie rezultatai gauti, naudojantis algoritmu (13), ir apskaičiuoti tais atvejais, kai kampas ξ tarp tiesės NN, einančios per elektroakustinių keitiklių centrus, ir statmens tiriamosios aplinkos srauto kryptiai yra 30^0 , 45^0 , 60^0 . Lentelės langelių viršuje surašyta kampų α_0 reikšmės, kai akustiniai signalai sklinda tiriamosios aplinkos srauto kryptimi, o apačioje - kampų α_0 reikšmės, kai signalai turi sklisti prieš srauto kryptį. Brūkšneliai rodo, kad prie duotų tiriamosios aplinkos parametrų pasiūsti akustiniai signalai negali pasiekti priimančio elektroakustinio keitiklio.

Matome, kad, nepriklausomai nuo tiriamosios aplinkos parametrų erdvinio pasiskirstymo, akustiniams signalams, sklindantiems srauto kryptimi, visuomet galima surasti kampą α_0 , kuriuo juos išspinduliuavus, jie pasieks priimančiąjį elektroakustinį keitiklį. Visiškai kitą vaizdą gauname dėl akustinių signalų, sklindančių tiriamojoje aplinkoje prieš srautą. Prie tam tikrų srauto greičio reikšmių tampa $\alpha_0 > 90$. Esant tokioms sąlygoms pasiūstas akustinis signalas negali pasiekti priimančio elektroakustinio keitiklio.

2 pav. Ryšys tarp akustinių signalų išspinduliavimo kampo ir jų nunešimo, esant paraboliniam srauto profiliui. $c_{max}/c_{vid}=1.0$; M_{vid}: 1 - 0; 2 - 0,1; 3 - 0,2; 4 - 0,3; 5 - 0,4; 6 - 0,5.

Konstruojant elektroakustinius matavimo kanalus nepakanka apsiriboti kampo ξ reikšmėmis 30^0 , 45^0 ir 60^0 . Jį reikia parinkti taip, kad tiriamojo srauto parametrms kintant duotame dinaminiame diapazone būtų užtikrinamas ne tik stabilus akustinių signalų priėmimas, bet ir kuo didesnis santykis $\Delta t/\Delta v$. Todėl plačiau apžvelkime priklausomybę tarp tiriamosios aplinkos parametrų, kampo α_0 , akustinių signalų poslinkio y išilgai srauto krypties ir signalų sklidimo trukmės τ . Pirmiausia ištyrėme priklausomybę tarp poslinkio y ir kampo α_0 , esant įvairioms Macho skaičiaus M reikšmėms ir vienalytei aplinkai (2 pav.). Matome, kad, didinant kampą α_0 teigiamų reikšmių pusėn, akustiniai signalai vis labiau nunešami srauto kryptimi (ištininė linija). Kuo didesnės kampo α_0 reikšmės, tuo šis poslinkis auga sparčiau, kol pasiekia ribą, kai akustiniai signalai pradeda sklisti išilgai srauto krypties. Kuo didesnis M , tuo greičiau pasiekiamas ši kampo α_0 riba. Jeigu kampas α_0 didinamas toliau, tai akustiniai signalai apgręžiami ir grįžta prie sienelės, nuo kurios jie buvo išspinduliuoti (punktyrinė linija). Tuo tarpu akustinių signalų sklidimas prieš srauto kryptį (2 pav.) yra apribotas ir, didėjant M , sparčiai mažėja.

3 pav. Ryšys tarp akustinių signalų išspinduliavimo kampo ir jų nunešimo, esant paraboliniam srauto profiliui. M_{vid}=0,1; c_{max}/c_{vid} : 1 - 1,0; 2 - 1,1; 3 - 1,2; 4 - 1,3; 5 - 1,4; 6 - 1,5.

Atsiradus aplinkos nevienalytiškumui vaizdas pasikeičia iš esmės (3 pav.). Kai akustiniai signalai sklinda srauto kryptimi, tai didėjant aplinkos nevienalytiškumui, mažėja kampo α_0 reikšmė, prie kurios įvyksta akustinio signalo persilenkimas (brėžinyje atitinka trūkio taškai). Tuo tarpu, akustiniams signalams sklindant prieš srautą ir didėjant aplinkos nevienalytiškumui, signalo poslinkis y išilgai srauto krypties didėja, kol pasiekiamas persilenkimo taškas. Tuomet akustinis signalas apgręžiamas ir grįžta prie sienelės, nuo kurios jis buvo išspinduliuotas. Kuo didesnis aplinkos nevienalytiškumas, tuo prie mažesnių kampo α_0 modulio reikšmių pasiekiamas akustinio signalo persilenkimo taškas.

Naudodamiesi brėžiniais (2 ir 3 pav.), kuriuose įvertinta tiriamos aplinkos srauto ir nevienalytiškumo ypatumai, galime optimaliai parinkti elektroakustinių keitiklių išdėstymą matavimo kanale.

4 pav. Ryšys tarp akustinių signalų išspinduliuojamo kampo ir jų sklaidimo trukmės, esant paraboliniam srauto profiliui. $c_{\max}/c_{\text{vid}}=1.0$; $M_{\text{vid}}: 1 - 0; 2 - 0,1; 3 - 0,2; 4 - 0,3; 5 - 0,4; 6 - 0,5$.

Išnagrinėjime kaip nuo akustinių signalų išspinduliuojamo kampo α_0 priklauso akustinių signalų sklaidimo trukmė τ (4 pav.). Kampo α_0 reikšmėms artėjant prie nulio, akustinio signalo sklaidimo trukmė beveik nekinta, keičiantis kampo α_0 dydžiui ir tiriamos aplinkos srauto greičiui.

5 pav. Elektroakustinio matavimo kanalo parametrų parinkimo diagrama.

Tačiau, kampui α_0 didėjant tiek į teigiamų, tiek į neigiamų reikšmių pusę, akustinių signalų sklaidimo trukmė vis labiau pradeda priklausyti nuo kampo α_0 dydžio. Tai būtina įvertinti, konstruojant elektroakustinius matavimo kanalus. Tačiau, naudojantis atskirais $\tau=\tau(\alpha_0)$ ir $y=y(\alpha_0)$ grafikais, sunku nustatyti konstruojamo matavimo kanalo parametrus, įgalinančius optimaliai parinkti priimamo signalo amplitudę ir skiriamąją gebą. Tai galima pasiekti šiuos grafikus sujungiant į vieną, kaip parodyta 5 pav. Jis gautas, apskaičiavus akustinių signalų sklaidimo trukmės τ priklausomybės nuo akustinių signalų poslinkio y išilgai srauto krypties kreives, esant įvairioms M reikšmėms ir skirtingiems tiriamos aplinkos nevienalytiškumo laipsniams. Vėliau grafike atvaizduojamos α_0 priklausomybės nuo akustinių signalų sklaidimo trukmės τ kreivės. Naudojantis šiuo grafiku galima optimaliai parinkti elektroakustinių keitiklių montavimo vietas matavimo kanale. Tai leidžia, srauto greičiui ir aplinkos nevienalytiškumui kintant tam tikruose diapazonuose, stabiliai priimti akustinius signalus ir pasiekti pasirinktą skiriamąją gebą.

Iš gautų rezultatų matome, kad, konstruojant elektroakustinius matavimo kanalus, būtina įvertinti tiriamosios aplinkos parametrų kitimo dinaminį diapazoną ir atitinkamai parinkti elektroakustinių keitiklių išdėstymą, jų orientaciją ir kryptingumo diagramas. Šios priemonės įgalina pasiekti stabilų akustinių signalų patekimą į priimančią keitiklį. Tais atvejais, kai naudojamas dvipusis tiriamosios aplinkos zondavimas, panaudojant siūlomą metodiką galima nustatyti ar matavimus atlikti tinka vienkanalė matavimo sistema, ar reikia naudoti daugiakanalę.

Literatūros sąrašas

1. **P.-B. Milius, L. Jakevičius.** Akustinių signalų sklaidimo sluoksniuotoje judančioje aplinkoje matematinis skaičiavimas // Ultragaras, 1992.- Nr. 24.- P. 19-29 (rusų k.).
2. **I. P. Goliamina.** Ultragaras. Mažoji enciklopedija. Maskva, 1979.- 400 p (rusų k.).
3. **P.-B. Milius, L. Jakevičius.** Akustinių bangų sklaidimo judančiose aplinkose parametrų įvertinimo teorinis modelis // Ultragaras, 1991.- Nr. 23.- P. 47-56 (rusų k.).
4. **P.-B. Milius, J. Motiejūnas, L. Jakevičius.** Akustinių signalų trajektorijų judančiose aplinkose analizė // Ultragaras, 1990.- Nr. 22.- P. 61-68 (rusų k.).

L. Jakevičius, O. Tumšys, J. Butkus, G. Gudavičius

Optimization of the parameters of electroacoustical measuring channel

Summary

It is shown that when constructing electroacoustical measuring channels it is necessary to choose the parameters of the transducers and places of their arrangement so, that acoustical communication was stable.

The algorithms (8) and (10) for determination places of arrangement of an electroacoustical transducers and their orientation are proposed. These algorithms can be used for the case when the media is proximity homogeneous and its velocity of movement is small. When the media is unhomogeneous or the velocity of its movement is large, the phenomenon of refraction occur. Therefore the path of propagation of acoustical signals is changed and places of arrangement of transducers and their orientation in the measuring channel can be calculated by the algorithm (13). It is show the influence of the angle α_0 of radiation of acoustical signal on the shift of them along the flow axis (fig. 2 and 3) and on the time of their propagation in the media under control (fig. 4). The diagram for selection of parameters of the electroacoustical measuring channel is presented (fig. 5).

DOI: 10.5755/j01.u.26.1.7831