



UDK: 534.88:519.6

YONLAMA SONAR YORDAMIDA SUV TUBIDAGI OBYEKTЛАRNI LOKALIZATSIYA QILISHNING MATEMATIK MODELИ

Islomov Diyorbek Zafar o'g'li

Iqtisodiyot va pedagogika universiteti, Qarshi, O'zbekiston

Annotatsiya. Maqolada yonlama skanerlovchi sonar yordamida suv tubidagi obyektlarni lokalizatsiya qilishning matematik modeli keltirilgan. Model qiya va yotiq masofalar orasidagi geometrik bog'lanishni, gidroakustik tenglamani, ajratish qobiliyatini, xatoliklarning tarqalishini hamda akustik soya bo'yicha obyekt balandligini baholashni birlashtiradi. 100 va 400 kHz tizimlar uchun sonli hisoblar chastotani oshirish masofa bo'yicha ajratish qobiliyatini 3,7 sm dan 1,2 sm gacha yaxshilashini, ammo shovqin bilan chegaralangan aniqlash masofasini taxminan 2,4 marta qisqartirishini ko'rsatdi. 50 m yotiq masofada signal parametrlaridan kelib chiqadigan koordinata xatoligi 1–2 sm bo'lsa, tovush tezligidagi 10 m/s noaniqlik yolg'iz o'zi 0,34 m xatolik beradi; eng katta cheklov — bo'ylama ajratish qobiliyati (50 m da 1,05 m). **Kalit so'zlar:** yonlama sonar, lokalizatsiya, matematik model, gidroakustik tenglama, xatoliklar tarqalishi, akustik soya.

Abstract. *Mathematical model of localization of underwater objects with a side-scan sonar.* The paper presents a mathematical model for localizing objects on the seabed with a side-scan sonar. The model combines slant-range/ground-range geometry, the sonar equation, resolution relations, first-order error propagation and a shadow-based height estimate. Numerical calculations for 100 kHz and 400 kHz systems show that increasing the frequency improves range resolution from 3.7 to 1.2 cm but shortens the noise-limited detection range by a factor of about 2.4. At 50 m ground range the



position error due to signal parameters is 1–2 cm, whereas a 10 m/s sound-speed uncertainty alone gives 0.34 m; the along-track resolution (1.05 m at 50 m) is the dominant limitation. **Keywords:** side-scan sonar, localization, mathematical model, sonar equation, error propagation, acoustic shadow.

1. KIRISH

Suv ostidagi obyektlarni qidirish va aniqlash gidrografiya, suv osti inshootlarini nazorat qilish va qidiruv-qutqaruv ishlarida dolzarb masaladir. Elektromagnit to'liqlar suvda tez so'nganligi sababli bu masalada asosiy axborot tashuvchi akustik signal hisoblanadi [1, 2]. Yonlama skanerlovchi sonar (side-scan sonar) tubni harakat yo'nalishiga ko'ndalang nurlantirib, obyektning aks-sadosini va uning ortidagi akustik soyani qayd etadi hamda tub tasvirini hosil qiladi [3, 4].

Amaliyotda obyekt koordinatasini aniqlash ko'pincha tasvirni talqin qilishga tayanadi, koordinata xatoligining manbalari (vaqtni o'lchash, balandlik, tovush tezligi, nur kengligi) esa odatda alohida ko'rib chiqiladi [3–5]. Ushbu ishning maqsadi — obyektни lokalizatsiya qilishning yaxlit matematik modelini qurish: geometrik munosabatlar, gidroakustik tenglama va xatoliklar tarqalishini bitta tizimga birlashtirish hamda modelni sonli hisoblar bilan baholash. Vazifalar: (1) koordinatalarni qiya masofadan hisoblash modelini yozish; (2) aks-sado sathi va maksimal aniqlash masofasini baholash; (3) koordinata va soya bo'yicha balandlik xatoligini tahlil qilish.

2. MATERIALLAR VA USULLAR

2.1. Geometrik model. Sonar tashuvchisi tubdan h balandlikda, v tezlik bilan y o'qi bo'ylab harakatlanadi; tub tekis deb olinadi. Obyektning koordinatalari (x, y) , bunda x — harakat chizig'idan yotiq masofa. Impuls yuborilgandan aks-sado qaytguncha o'tgan vaqt τ bo'lsa, qiya (R) va yotiq masofalar quyidagicha topiladi:



$$R = c\tau / 2, \quad (1)$$

$$x = \sqrt{(R^2 - h^2)}, \quad (2)$$

bu yerda c — suvdagi tovush tezligi. Bo'ylama koordinata k -impuls vaqtidagi tashuvchi o'rni $y_k = vt_k$ bilan nur kengligi doirasida aniqlanadi: $|y - y_k| \lesssim R\theta_H / 2$, bunda θ_H — gorizonta1 nur kengligi (rad). Obyekt qaysi borta ekanligi chap yoki o'ng kanaldan ma'lum bo'ladi.

2.2. Xatoliklar tarqalishi. Qiya masofa xatoligi vaqtini o'lchash va tovush tezligi noaniqligidan iborat. Birinchi tartibli yaqinlashishda:

$$\sigma_R^2 = (c\sigma_\tau / 2)^2 + (R\sigma_c / c)^2, \quad (3)$$

$$\sigma_x^2 = (R / x)^2 \sigma_R^2 + (h / x)^2 \sigma_h^2, \quad (4)$$

bu yerda σ_h — balandlikni o'lchash xatoligi. Masofa bo'yicha ajratish qobiliyati $\delta R = c / (2B)$, bo'ylama ajratish qobiliyati esa $\delta y = R\theta_H$ (B — signal kengligi).

2.3. Gidroakustik tenglama. Aks-sadoning shovqinga nisbati (dB) [1]:

$$SNR = SL - 2TL + TS - (NS + 10 \lg B) + DI, \quad (5)$$

$$TL = 20 \lg R + \alpha R \cdot 10^{-3}, \quad (6)$$

bu yerda SL — manba sathi, TL — bir yo'nalishdagi yo'qotish (sferik tarqalish va yutilish), TS — obyektning aks ettirish ko'rsatkichi, NS — shovqin spektral zichligi, DI — qabul antenasining yo'nalganlik ko'rsatkichi. Yutilish koeffitsienti α (dB/km) Torp formulasi bilan hisoblandi [1, 7] (f — kHz):

$$\alpha = 0,11f^2/(1+f^2) + 44f^2/(4100+f^2) + 2,75 \cdot 10^{-4}f^2 + 0,003. \quad (7)$$

Shovqin sifatida termik shovqin olindi: $NS = -15 + 20 \lg f$ dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ [1]; $DI = 10 \lg(41253 / (\theta_H\theta_V))$, burchaklar gradusda. Maksimal aniqlash masofasi $R_{\max}$ $SNR(R_{\max}) = DT$ tenglamasining ildizi sifatida Brent usuli bilan topildi ($DT = 10$ dB — aniqlash bo'sag'asi).



2.4. Soya bo'yicha balandlik. H balandlikdagi obyekt ortida uzunligi s bo'lgan akustik soya hosil bo'ladi. Nurning obyekt yuqori nuqtasidan o'tishi shartidan o'xshash uchburchaklar orqali $s = xH / (h - H)$, ya'ni

$$H = hs / (x + s) \quad (8)$$

kelib chiqadi; σ_H xatoligi (4) ga o'xshash tarzda xususiy hosilalar orqali baholanadi.

2.5. Hisoblash tajribasi. Ikki tizim ko'rib chiqildi: 100 kHz (S1) va 400 kHz (S2). Umumiy parametrlar: $c = 1480$ m/s, $h = 5$ m, $SL = 200$ dB re 1 μ Pa·1 m, $\theta_V = 50^\circ$, $\sigma_h = 0,10$ m, $\sigma_c = 10$ m/s, $TS = -10, -20$ va -30 dB. SL va TS qiymatlari modelni sinash uchun qabul qilingan taxminiy qiymatlar bo'lib, dala o'lchovlari bilan tasdiqlanishi lozim. Hisoblar Python (NumPy, SciPy) da bajarildi.

3. NATIJALAR

1-jadvalda tizimlarning parametrlari va hisoblangan ko'rsatkichlari keltirilgan. 400 kHz tizimda masofa bo'yicha ajratish qobiliyati 3,7 sm dan 1,2 sm gacha yaxshilanadi, biroq yutilish 34,1 dan 87,0 dB/km gacha oshgani sababli maksimal aniqlash masofasi taxminan 2,4 marta ($TS = -20$ dB da 391 m dan 165 m gacha) qisqaradi.

1-jadval. Sonar tizimlari parametrlari va hisoblangan ko'rsatkichlar

Ko'rsatkich	S1 (100 kHz)	S2 (400 kHz)
Signal kengligi B , kHz	20	60
Gorizontal nur kengligi θ_H , °	1,2	0,5
Yutilish α , dB/km	34,1	87,0

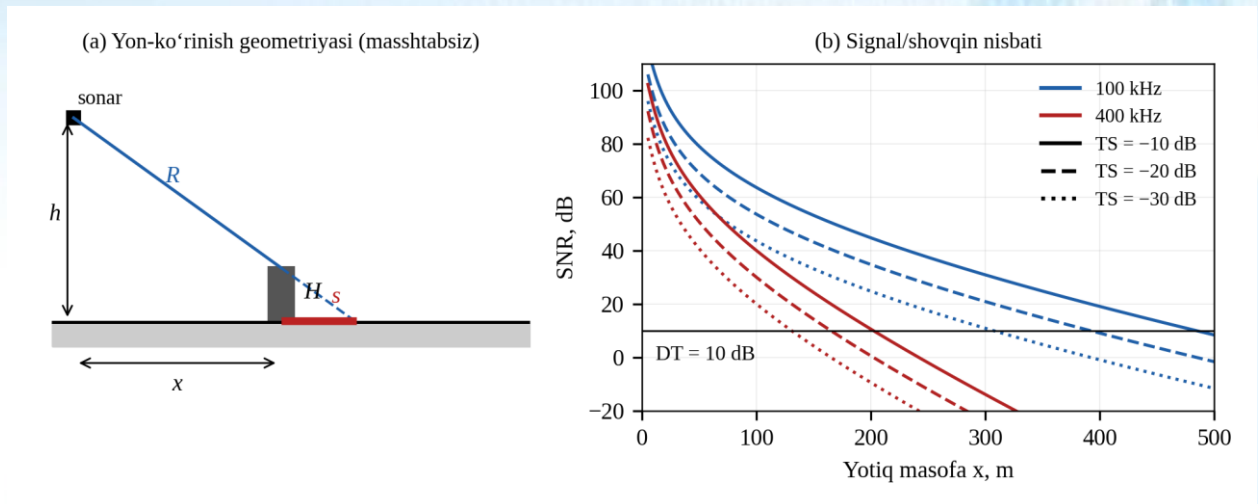


Ko'rsatkich	S1 (100 kHz)	S2 (400 kHz)
Termik shovqin NS , dB re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$	25,0	37,0
Yo'nalganlik ko'rsatkichi DI , dB	28,4	32,2
Masofa bo'yicha ajratish δR , sm	3,7	1,2
$R_{\max}$, m ($TS = -10 / -20 /$ -30 dB)	484 / 391 / 307	202 / 165 / 131

2-jadval turli yotiq masofalarda SNR, koordinata xatoligi va bo'ylama ajratish qobiliyatini ko'rsatadi (1-rasm, b — SNR ning masofaga bog'liqligi). Yotiq koordinata xatoligi σ_x 50 m da 1,1–1,5 sm ni tashkil etadi va masofa ortishi bilan kamayadi, chunki $R/x \rightarrow 1$, $h/x \rightarrow 0$. Aksincha, bo'ylama ajratish qobiliyati δy masofaga proporsional o'sadi: 100 kHz tizimda 50 m da 1,05 m, 100 m da 2,10 m.

2-jadval. Koordinata xatoligi va ajratish qobiliyati ($TS = -20$ dB; S1 / S2)

x , m	R , m	SNR, dB	σ_x , sm	δy , m
10	11,18	97,7 / 83,5	5,1 / 5,0	0,23 / 0,10
25	25,50	82,4 / 66,7	2,3 / 2,0	0,53 / 0,22
50	50,25	68,9 / 50,6	1,5 / 1,1	1,05 / 0,44
100	100,12	53,5 / 29,9	1,2 / 0,6	2,10 / 0,87



1-rasm. Yon-ko'rinish geometriyasi (a) va SNR ning yotiq masofaga bog'liqligi (b)

Tovush tezligidagi $\sigma_c = 10$ m/s ($\approx 0,68$ %) noaniqlik $x = 25, 50$ va 100 m da mos ravishda $0,18, 0,34$ va $0,68$ m xatolik beradi, ya'ni signal parametrlari belgilaydigan xatolikdan taxminan 8–110 marta katta. Nurning egilishi ta'siri esa kichik: tezlik gradienti $0,5 \text{ s}^{-1}$ bo'lganda egrilik radiusi $\rho \approx c/g \approx 3$ km, 50 m uzunlikdagi yoy va vatar farqi $\approx 6 \cdot 10^{-4}$ m. Soya bo'yicha balandlik: $x = 50$ m, $H = 0,5$ m da (8) ga ko'ra $s = 5,56$ m; $\sigma_s = 0,10$ m, $\sigma_x = 0,05$ m va $\sigma_h = 0,10$ m bo'lganda $\sigma_H \approx 1,3$ sm, asosiy hissani balandlik ($1,0$ sm) va soya uzunligi ($0,8$ sm) xatoliklari qo'shadi.

4. MUHOKAMA

Hisoblar uchta xulosaga olib keladi. Birinchidan, koordinataning eng zaif tashkil etuvchisi — bo'ylama koordinata: uning noaniqligi nur kengligi va masofa bilan belgilanadi va yotiq koordinata xatoligidan ikki tartibga yaqin katta. Uni kamaytirish uchun nurni toraytirish (yuqori chastota, uzunroq antenna) yoki aks-sado amplitudasining impulslar bo'yicha o'zgarishidan foydalanuvchi sonli usullar zarur; bunday usullar keyingi ishning mavzusidir. Ikkinchidan, chastotani tanlash masofa va aniqlik orasidagi kelishuv masalasidir. Uchinchidan, tovush tezligi noaniqligi ko'pincha apparat xatoligidan katta,



shuning uchun tezlik profilini o'lchash yoki ma'lum o'rindagi mo'ljallanib bo'yicha kalibrlash tavsiya etiladi.

Model cheklovlari: tub tekis, obyekt nuqtaviy, shovqin faqat termik deb olingan; tub reverberatsiyasi, ko'p yo'lli tarqalish va tashuvchi harakatining beqarorligi hisobga olinmagan, shu sababli $R_{\max}$ qiymatlari yuqori baho hisoblanadi. Torp formulasi dengiz suvi uchun mo'ljallangan, chuchuk suvda esa yutilish kichikroq [2, 6], bu esa aniqlash masofasini oshiradi. Natijalarning aniq qiymatlari SL va TS farazlariga bog'liq, shu sababli modelni dala ma'lumotlari bilan tekshirish keyingi bosqich hisoblanadi.

5. XULOSA

(1) (1)–(8) munosabatlardan iborat yaxlit matematik model qurildi: u koordinatani qiya masofadan hisoblashni, aks-sado sathini, ajratish qobiliyatini, xatoliklar tarqalishini va soya bo'yicha balandlikni qamrab oladi. (2) Taxminiy parametrlar uchun 100 kHz tizimda $R_{\max} = 307\text{--}484$ m, 400 kHz tizimda 131–202 m; masofa bo'yicha ajratish 3,7 sm dan 1,2 sm gacha yaxshilanadi. (3) 50 m da yotiq koordinata xatoligi 1–2 sm, ammo tovush tezligidagi 10 m/s noaniqlik 0,34 m beradi, bo'ylama ajratish qobiliyati esa 1,05 m (100 kHz). (4) Keyingi ishda bo'ylama koordinatani aniqlashning sonli usullari ishlab chiqiladi va tajriba ma'lumotlarida sinab ko'riladi.

ADABIYOTLAR

1. Urlick R.J. Principles of Underwater Sound. 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 1983.
2. Lurton X. An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications. 2nd ed. – Berlin, Heidelberg: Springer, 2010.
3. Fish J.P., Carr H.A. Sound Underwater Images: A Guide to the Generation and Interpretation of Side Scan Sonar Data. – Orleans, MA: Lower Cape Publishing, 1990.



4. Blondel P. The Handbook of Sidescan Sonar. – Berlin, Heidelberg: Springer-Praxis, 2009.
5. Burguera A., Oliver G. High-resolution underwater mapping using side-scan sonar // PLoS ONE. – 2016. – Vol. 11, No. 1. – e0146396.
6. Brekhovskikh L.M., Lysanov Yu.P. Fundamentals of Ocean Acoustics. 3rd ed. – New York: Springer, 2003.
7. Thorp W.H. Analytic description of the low-frequency attenuation coefficient // J. Acoust. Soc. Am. – 1967. – Vol. 42, No. 1. – P. 270.