

UDK: 519.6:534.88

YONLAMA SONAR MA'LUMOTLARI BO'YICHA SUV TUBIDAGI OBYEKT KOORDINATALARINI ANIQLASHNING SONLI USULLARI

Islomov Diyorbek Zafar o'g'li

Iqtisodiyot va pedagogika universiteti, Qarshi, O'zbekiston

Annotatsiya. Maqolada yonlama sonar ma'lumotlari bo'yicha suv tubidagi nuqtaviy obyekt koordinatalarini aniqlashning sonli usullari ishlab chiqilgan va taqqoslangan. Qiya masofa chiziqli chastota modulyatsiyali (LFM) signalni moslashtirilgan filtrlash va korrelyatsiya cho'qqisini parabolik interpolyatsiya qilish orqali, bo'ylama koordinata esa aks-sado amplitudasining impulslar bo'yicha profili asosida uch usul — maksimal impuls, markaz (centroid) va Gauss–Nyuton usulidagi eng kichik kvadratlar — bilan baholandi. Monte-Karlo tajribasida (kirish SNR $-24 \dots 0$ dB) -12 dB va undan yuqorida aniqlash ehtimoli 1,00 ga teng bo'lib, qiya masofa xatoligi Kramer–Rao chegarasidan ± 9 % dan ko'p chetlashmadi (-16 dB dan yuqorida). 0 dB da bo'ylama koordinata RMSE: 6,7 sm (maksimal impuls), 1,0 sm (markaz), 0,9 sm (Gauss–Nyuton).

Kalit so'zlar: yonlama sonar, moslashtirilgan filtr, lokalizatsiya, Gauss–Nyuton usuli, Monte-Karlo, Kramer–Rao chegarasi.

Abstract. *Numerical methods for determining the coordinates of an underwater object from side-scan sonar data.* Numerical methods for estimating the coordinates of a point object on the seabed from side-scan sonar data are developed and compared. Slant range is estimated by matched filtering of a linear-FM signal with parabolic peak interpolation; the along-track coordinate is estimated from the ping-to-ping echo amplitude profile by three methods: peak ping, centroid and Gauss–Newton least squares. In a Monte Carlo study (input SNR -24 to 0 dB) the detection probability is 1.00 from -12

dB upward and the range error stays within $\pm 9\%$ of the Cramér–Rao bound above -16 dB. At 0 dB the along-track RMSE is 6.7 cm (peak ping), 1.0 cm (centroid) and 0.9 cm (Gauss–Newton).

Keywords: side-scan sonar, matched filter, localization, Gauss–Newton method, Monte Carlo, Cramér–Rao bound.

1. KIRISH

Yonlama sonar tasviri bo'yicha obyekt koordinatalari odatda operator tasvirda belgilagan nuqta orqali aniqlanadi; bu usul sub'ektiv va uning xatoligi noaniq [1, 2]. Avtomatik usullar signalni qayta ishlash (impuls siqish, aniqlash) va koordinatani baholash bosqichlariga bo'linadi [2, 3]. Statistik baholash nazariyasi [4] qiya masofa aniqligining nazariy quyi chegarasini beradi. Bo'ylama koordinata uchun esa vaziyat boshqacha: nur tor bo'lganda qiya masofaning impulsar bo'yicha o'zgarishi (nur kengligi σ_y doirasida $\approx 1,6$ mm) masofa bo'yicha ajratish qobiliyatidan ($3,7$ sm) kichik bo'ladi, shuning uchun bo'ylama koordinatani aks-sado amplitudasining impulsar bo'yicha profilidan baholashga to'g'ri keladi.

Maqolaning maqsadi — yonlama sonar ma'lumotlari bo'yicha obyekt koordinatalarini aniqlashning sonli usullarini ishlab chiqish va ularni statistik simulyatsiya yordamida aniqlik hamda shovqinbardoshlik bo'yicha taqqoslashdir.

2. MATERIALLAR VA USULLAR

2.1. Signal modeli va qiya masofani baholash. Zondlovchi signal sifatida chiziqli chastota modulyatsiyali (LFM) impuls ishlatildi (kompleks bazaviy diapazon):

$$s(t) = \exp[j\pi(B/T)(t - T/2)^2], \quad 0 \leq t < T, \quad (1)$$

$$r[n] = a s(n/f_s - \tau) + w[n], \quad (2)$$

bu yerda $B = 20$ kHz, $T = 5$ ms, $f_s = 100$ kHz (impuls $N_s = 500$ ta nuqtadan iborat), $w[n]$ — dispersiyasi σ^2 bo'lgan kompleks oq Gauss shovqini; kirish SNR $\rho = a^2/\sigma^2$ (bitta nuqta uchun, impuls siqishdan oldin). Aks-sado moslashtirilgan filtr bilan (FFT orqali) qayta ishlanadi:

$$y[m] = \sum_n r[n] s^*[n - m], \quad (3)$$

uning yutug'i N_s (27 dB) ga teng. $|y[m]|$ cho'qqisining m indeksi atrofida parabolik interpolatsiya qilinadi:

$$\delta = (|y_{m-1}| - |y_{m+1}|) / [2(|y_{m-1}| - 2|y_m| + |y_{m+1}|)], \quad \hat{\tau} = (m + \delta)/f_s, \quad \hat{R} = c\hat{\tau}/2. \quad (4)$$

Baholash aniqligini taqqoslash uchun Kramer–Rao quyi chegarasi [4] hisoblandi: $\sigma_{\hat{\tau}}^2 \geq \sigma^2 / (2a^2 \sum |s'(t_n)|^2)$; $\sigma_R = c\sigma_{\hat{\tau}}/2$. Aniqlash muvaffaqiyatli deb hisoblandi, agar $|\hat{R} - R| \leq \delta R = c/(2B) = 3,7$ sm bo'lsa (qidiruv butun yozuv bo'ylab, 100 m gacha).

2.2. Bo'ylama koordinatani baholash. Tashuvchi $y_k = k\Delta y$ nuqtalarda impuls yuboradi, $\Delta y = vT_p = 0,203$ m ($v = 1,5$ m/s, $T_p = 0,135$ s). Obyekt (x_0, y_0) nuqtada, $h = 5$ m. Antenna ta'siri aks-sado amplitudasini Gauss shaklida o'zgartiradi:

$$A_k = A_0 \exp[-(y_k - y_0)^2 / (2\sigma_y^2)], \quad \sigma_y = R\theta_H / (2\sqrt{2 \ln 2}), \quad (5)$$

$\theta_H = 1,2^\circ$ da $\sigma_y = 0,359$ m. Moslashtirilgan filtr chiqishidagi amplituda $\hat{A}_k = |y|_{\max}/N_s$ bo'yicha y_0 uch usul bilan baholandi: **M1** — eng kuchli impuls o'rni; **M2** — markaz: $\hat{y} = \sum y_k \hat{A}_k^2 / \sum \hat{A}_k^2$; **M3** — $\sum (\hat{A}_k - A_k)^2 \rightarrow \min$, Gauss–Nyuton usuli [5] bilan:

$$\theta^{i+1} = \theta^i + \lambda(J^T J)^{-1} J^T r, \quad J_k = [g_k, A_0 g_k (y_k - y_0)/\sigma_y^2], \quad (6)$$

bu yerda $\theta = (A_0, y_0)$, g_k — Gauss funksiyasi, r — qoldiq vektori, λ qadam ko'paytuvchisi (kamaytirib boriladi); boshlang'ich yaqinlashish M2 dan olinadi. Ishlov oynasi — eng kuchli impulsdan $\pm 4\sigma_y$ doirasi. Yotiq koordinata $\hat{x} = \sqrt{(\hat{R}^2 - h^2)}$ bo'yicha hisoblandi: **X1** — eng kuchli impulsdan; **X3** — $\hat{A}_k \geq$

$0,5\hat{A}_{\max}$ bo'lgan impulsar bo'yicha amplituda kvadrati og'irliklari bilan o'rtachalash ($R_k \rightarrow \sqrt{(R_k^2 - (y_k - \hat{y})^2)}$) tuzatishi bilan).

2.3. Tajriba. Monte-Karlo: $x_0 = 40$ m, $y_0 \in [0, \Delta y)$ tekis taqsimlangan, kirish SNR -24 dan 0 dB gacha 4 dB qadam bilan (7 daraja); aniqlash uchun 400 , lokalizatsiya uchun 300 realizatsiya; lokalizatsiyada qidiruv strobi $\pm 1,5$ m. Xatolik ko'rsatkichi — ildiz ostidagi o'rtacha kvadratik xatolik (RMSE). Hisoblar Python (NumPy) da bajarildi.

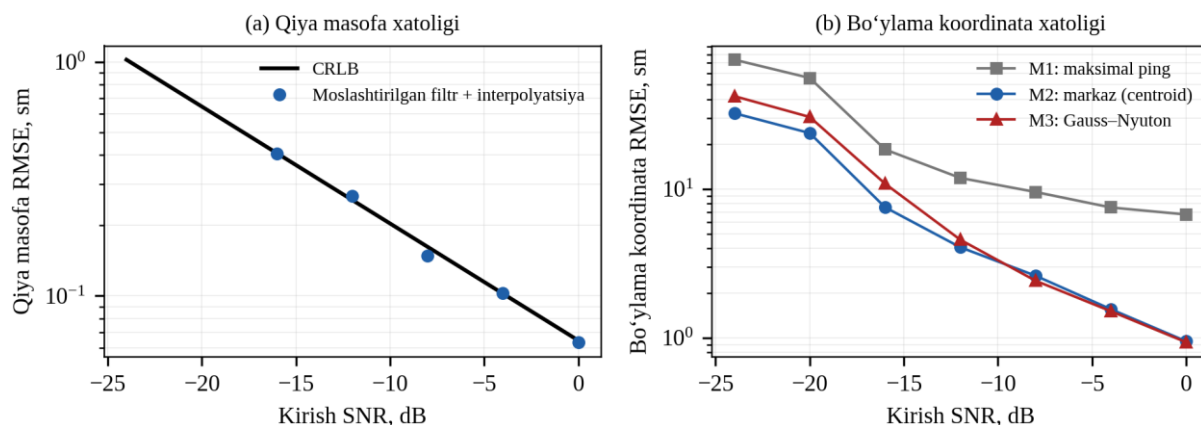
3. NATIJALAR

1-jadval va 1-rasmda natijalar keltirilgan. Aniqlash ehtimoli $P_d - 12$ dB va undan yuqorida $1,00$; -16 dB da $0,79$; -20 va -24 dB da $0,17$ va $0,03$ (bo'sag'a effekti). Qiya masofa RMSE si ≥ -16 dB da Kramer–Rao chegarasidan $\pm 9\%$ dan ko'p farq qilmadi; $P_d < 0,5$ bo'lganda RMSE faqat muvaffaqiyatli aniqlashlar bo'yicha hisoblanishi sababli (tanlanma siljishi) jadvalga kiritilmadi.

1-jadval. Aniqlash ehtimoli va koordinata xatoliliklari (RMSE)

SNR, dB	P_d	Qiya masofa, mm		Bo'ylama, sm			Yotiq, mm	
		RMSE	CRLB	M1	M2	M3	X1	X3
-24	$0,03$	—	—	$73,7$	$32,2$	$41,9$	834	269
-20	$0,17$	—	—	$55,6$	$23,7$	$30,4$	632	232
-16	$0,79$	$4,05$	$4,07$	$18,4$	$7,5$	$10,9$	177	187
-12	$1,00$	$2,67$	$2,57$	$11,9$	$4,1$	$4,6$	$2,7$	$62,5$
-8	$1,00$	$1,48$	$1,62$	$9,5$	$2,6$	$2,4$	$1,8$	$1,1$
-4	$1,00$	$1,03$	$1,02$	$7,5$	$1,6$	$1,5$	$1,1$	$0,6$

SNR, dB	P_d	Qiya masofa, mm		Bo'ylama, sm			Yotiq, mm	
		RMSE	CRLB	M1	M2	M3	X1	X3
0	1,00	0,63	0,65	6,7	1,0	0,9	0,7	0,4



1-rasm. Qiya masofa xatoligi va Kramer–Rao chegarasi (a); bo'ylama koordinata RMSE si (b)

Bo'ylama koordinata uchun M1 usuli impulslar orasidagi qadam bilan chegaralanadi: $\Delta y/\sqrt{12} = 5,9$ sm, 0 dB da RMSE 6,7 sm. M2 va M3 usullari 0 dB da 1,0 va 0,9 sm xatolik beradi, ya'ni M1 dan taxminan 7 marta aniq; -12 dB da farq 2,9 barobar (11,9 sm ga qarshi 4,1 sm). $SNR \geq -8$ dB da M2 va M3 farqi $\leq 8\%$ bo'lib, 300 realizatsiyada RMSE ning tanlanma xatoligi ($\approx 4\%$) bilan solishtirsa arziyas; -16 dB da esa M3 (10,9 sm) M2 (7,5 sm) dan yomon, chunki kuchli impulslar kam bo'lganda moslash beqaror bo'ladi.

Yotiq koordinata uchun eng yaxshi natijani ≥ -8 dB da X3 beradi (0 dB da 0,4 mm, X1 da 0,7 mm); -12 dB da esa X1 afzal (2,7 mm ga qarshi 62,5 mm), chunki kuchsiz impulsning strobida shovqin cho'qqisi tanlanadi. Impuslarni bo'sag'asiz o'rtachalash (X2) 0 dB da 7,8 mm xatolik berdi, ya'ni X1 dan 11 marta yomon. -16 dB va undan past SNR da barcha yotiq koordinata baholari ishonchsiz.

4. MUHOKAMA

Natijalar bo'ylama va yotiq koordinatalar aniqligi bir-biridan keskin farq qilishini tasdiqlaydi: ≥ -4 dB da yotiq xatolik ≈ 1 mm, bo'ylama xatolik esa $\approx 1,5$ sm. Demak, sonli usul tanlash asosan bo'ylama koordinataga ta'sir qiladi. Markaz usuli (M2) Gauss–Nyuton (M3) bilan deyarli bir xil aniqlik beradi, nur kengligini bilishni talab qilmaydi va past SNR da barqarorroq; M3 ning afzalligi amplituda modeli to'g'ri bo'lgandagina namoyon bo'lishi mumkin, nur shakli Gauss shaklidan farq qilganda uning ta'siri esa bu ishda tekshirilmadi. Shu sababli amalda M2 ni boshlang'ich yaqinlashish yoki zaxira usul sifatida saqlash maqsadga muvofiq.

Cheklovlar: ma'lumotlar sintetik; shovqin oq Gauss, obyekt nuqtaviy, tub tekis, navigatsiya aniq deb olingan, nur kengligi ma'lum. Haqiqiy yozuvlarda tub reverberatsiyasi, tashuvchining burilish va siljish xatoliklari hamda nur shaklining nomukammalligi qo'shimcha xatolik beradi; qiya masofa xatoligi esa tovush tezligi noaniqligi tufayli bu yerda hisoblangan qiymatlardan ancha katta bo'lishi mumkin (10 m/s noaniqlik 50 m da 0,34 m beradi). Shuning uchun taqdim etilgan xatoliklar usullarning o'zaro nisbiy solishtirmasi sifatida va quyi baho sifatida talqin qilinishi kerak. Keyingi qadam — usullarni tajriba yozuvlarida sinash va teskari masala sifatida regulyarizatsiya [6] bilan umumlashtirish.

5. XULOSA

(1) LFM signalni moslashtirilgan filtrlash va parabolik interpolyatsiya qiya masofani Kramer–Rao chegarasiga yaqin (≥ -16 dB da $\pm 9\%$) aniqlik bilan beradi; -12 dB dan yuqorida aniqlash ehtimoli 1,00. (2) Bo'ylama koordinatani amplituda profili bo'yicha baholash (markaz va Gauss–Nyuton) maksimal impuls usuliga nisbatan 0 dB da ≈ 7 marta aniq (1,0 va 0,9 sm ga qarshi 6,7 sm); ikkala usul ≥ -8 dB da ekvivalent. (3) Yotiq koordinatani ≥ -8 dB da kuchli impulslar bo'yicha o'rtachalash, undan past SNR da eng kuchli

impulsdan hisoblash ma'qul. (4) Natijalar sintetik ma'lumotlarda olingan va tajriba ma'lumotlarida tasdiqlanishi lozim.

ADABIYOTLAR

1. 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.
2. Blondel P. The Handbook of Sidescan Sonar. – Berlin, Heidelberg: Springer-Praxis, 2009.
3. Burguera A., Oliver G. High-resolution underwater mapping using side-scan sonar // PLoS ONE. – 2016. – Vol. 11, No. 1. – e0146396.
4. Kay S.M. Fundamentals of Statistical Signal Processing, Vol. I: Estimation Theory. – Upper Saddle River: Prentice Hall, 1993.
5. Nocedal J., Wright S.J. Numerical Optimization. 2nd ed. – New York: Springer, 2006.
6. Tikhonov A.N., Arsenin V.Ya. Solutions of Ill-Posed Problems. – Washington: Winston, 1977.

