

УДК 005.336.1:629.58  
Б 69

## ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ПРИВ'ЯЗНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА-РОБОТА ВІДНОСНО СУДНА-НОСІЯ

О. В. Блінцов, канд. техн. наук;  
Ж. Ю. Буруніна, канд. техн. наук;  
П. Г. Клименко, канд. техн. наук

*Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв*

**Анотація.** Запропоновано аналітичні залежності для визначення місця прив'язного підводного апарата-робота відносно його судна-носія із застосуванням гідролокатора кругового огляду — сонара підводного апарата. Ураховано основні природні поправки й приладові похибки магнітного компаса та сонара при обчисленні пеленга на підводний апарат і дистанції до нього від судна-носія.

**Ключові слова:** підводний апарат-робот, судно-носій, сонар, істинний курс, пеленг, дистанція.

**Аннотация.** Предложены аналитические зависимости для определения места привязного подводного аппарата-робота относительно его судна-носителя с применением гидролокатора кругового обзора — сонара подводного аппарата. Учтены основные поправки и приборные погрешности магнитного компаса и сонара при вычислении пеленга на подводный аппарат и дистанции до него от судна-носителя.

**Ключевые слова:** подводный аппарат-робот, судно-носитель, сонар, истинный курс, пеленг, дистанция.

**Abstract.** Analytic dependences for defining location of the tethered underwater robotic vehicle are offered relatively to its bearer ship using the underwater vehicle sonar. The main corrections and errors are considered of the magnetic compass and sonar when calculating bearing for the underwater vehicle and distance from it to the bearer ship.

**Keywords:** underwater robotic vehicle, bearer ship, sonar, true course, bearing, distance.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

При виконанні роботизованих підводних пошукових та дослідницьких робіт із застосуванням підводного апарата-робота (ПАР) однією з головних проблем є визначення його географічних координат під водою, оскільки це забезпечує керований процес підводного пошуку і дає змогу виконувати картографування виявлених підводних об'єктів. Автономні ПАР для обчислення своїх змінних географічних координат використовують технічні засоби інерційної навігації — безплатформні інерційні навігаційні прилади та системи [8]. Для прив'язних ПАР, які керуються по кабель-тросу (КТ) з борту спеціального судна-носія (СН), застосування такого навігаційного обладнання також можливе, однак призводить до суттєвого збільшення собівартості підводного апарата внаслідок високої ціни приладів інерційної навігації [1, 5].

Інший спосіб визначення місця прив'язних ПАР відносно СН — використання гідроакустичних приладів на борту ПАР, зокрема гідролокаторів кругового огляду (сонарів) [15]. При віддаленні ПАР від СН на дистанцію, яка не перевищує робочого радіуса сонара, можна визначити координати ПАР за параметрами гідроакустичного ехосигналу від СН на екрані сонара. Проте точність визначення місця ПАР відносно СН при цьому буде залежати від технічних характеристик сонара, глибини ПАР на момент виконання гідроакустичних вимірювань тощо.

Перспективним для визначення місця прив'язних ПАР відносно СН є також застосування гіпотези щодо залежності форми кабель-троса прив'язного ПАР тільки від довжини його попущеної частини при незмінних параметрах руху (швидкості потоку води, що набігає, взаємного положення корінного і ходового кінців КТ) [2]. Це дає змогу обчислювати відносні координати ПАР на базі вимірювань кутів корінного і ходового кінців кабель-троса підводного апарата.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання використання гідроакустичних методів для визначення параметрів просторового положення і руху підводних апаратів постійно розглядаються вітчизняними та зарубіжними науковцями й інженерами [9, 12, 14, 16]. При цьому головним напрямком досліджень було застосування та вдосконалення традиційних систем підводної гідроакустичної навігації, які використовують розміщені на СН системи з довгою, короткою і надкороткою базами [3, 6, 13]. Такі системи є високошвидкісними, громіздкими та складними у застосуванні, однак забезпечують достатню точність визначення координат ПАР відносно СН (5,0...0,5 м).

Щодо використання бортових гідроакустичних засобів ПАР для визначення його місця відносно СН у сучасній науково-технічній літературі інформація вкрай обмежена. Відомі дослідження і публікації стосуються окремих питань визначення похибок

кутових координат підводних об'єктів при їх виявленні гідролокатором підводного апарата [11], визначення координат місця виявлених аномалій зовнішнього середовища та виявлення підводних плавців [4].

Це обумовлює актуальність задачі кількісної оцінки точності визначення координат ПАР відносно СН за допомогою бортового сонара підводного апарата.

**МЕТА РОБОТИ** — синтез аналітичних залежностей для визначення координат прив'язного підводного апарата-робота відносно його судна-носія за допомогою бортового сонара підводного апарата.

**ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ**

Розглянемо одноланковий прив'язний ПАР, який оснащено гідролокатором кругового огляду (сонаром) *S*. Аналіз виконаємо у плоскій постановці, коли система «СН–КТ–ПАР» розташована у діаметральній площині судна-носія і рухається з усталеною швидкістю відносно води *v*. При цьому ПАР рухається на глибині *h*<sub>ПАР</sub> та дистанції по горизонталі *l*<sub>СН</sub> від СН (рис. 1).

Керування ПАР виконується по кабель-тросу з поста енергетики і керування (ПЕК), що розташований на судні-носії. На рис. 1 літерами А і Б позначено точки закріплення відповідно корінного й ходового кінців КТ, а змінними  $\psi_A$  та  $\psi_B$  — кути нахилу КТ у відповідних точках закріплення.

Ширина променя сонара по вертикалі  $\alpha_s$  забезпечує виявлення підводної частини СН за умови, що дистанція до нього по прямій *l*<sub>с</sub> не більше, ніж робочий радіус сонара *r*<sub>с</sub>.

Вважаємо, що ПАР розташовано горизонтально у площині істинного горизонту спостерігача, а закріплення сонара на ПАР є стаціонарним і забезпечує огляд верхньої півсфери водного простору. Система координат сонара збігається зі зв'язаною системою координат ПАР  $\{0, x_{\text{ПАР}}, y_{\text{ПАР}}, z_{\text{ПАР}}\}$  [7].

Тоді після розгортки променя сонара на 360° на навігаційному моніторі ПАР матимемо візуальну інформацію (сонограму) та множину *M*<sub>ц</sub> цифрових навігаційних даних (цифрове «вікно»):

$$M_{\text{ц}} = \{K_{\text{ПАР}}; \Pi_{\text{СН}}; KK_{\text{СН}}; h_{\text{ПАР}}; l_s\}, \quad (1)$$

де *K*<sub>ПАР</sub> — компасний курс ПАР за його магнітним компасом;  $\Pi_{\text{СН}} = K_{\text{ПАР}} + KK_{\text{СН}}$  — компасний пеленг на СН за магнітним компасом ПАР; *KK*<sub>СН</sub> — курсовий кут на СН, отриманий на основі гідроакустичної відмітки СН на екрані сонара і відрахований від поздовжньої осі підводного апарата *x*<sub>ПАР</sub>.

Модель екранного кадру навігаційного монітора ПАР, на який зазвичай вносяться сонограма, кутові та лінійні параметри ПАР відносно СН, показана на рис. 2.

Очевидно, що для визначення істинних значень величин цифрового «вікна» (1) необхідно враховувати ряд природних поправок та приладових похибок, до яких віднесемо:

*d* — магнітне схилення у точці знаходження ПАР (визначається за магнітними картами з похибкою до 1/4° [11]);

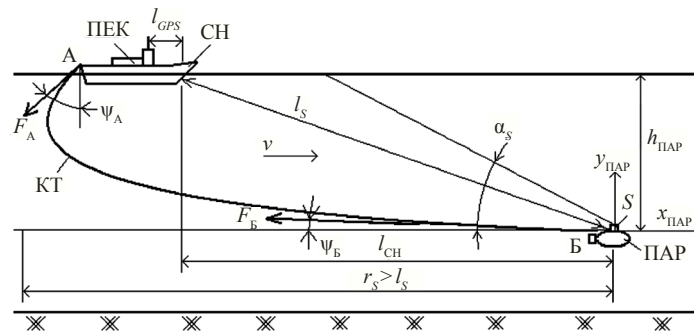


Рис. 1. Основна розрахункова схема для визначення координат підводного апарата-робота відносно судна-носія

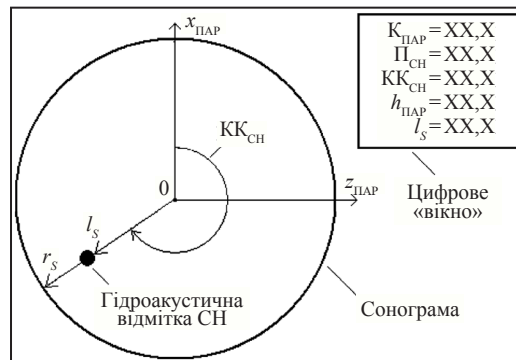


Рис. 2. Модель екранного кадру навігаційного монітора підводного апарата-робота

$\delta$  — девіацію магнітного компаса ПАР (визначається експериментально для кожного ПАР);

$\Delta K_{ПАР}$  — приладову похибку визначення курсу магнітним компасом ПАР (указується у технічних характеристиках компаса і складає  $1...3^\circ$ );

$\Delta K_{СН}$  — приладову похибку визначення курсового кута на СН на основі гідроакустичної відмітки сонара (задається технічними характеристиками сонара і лежить у межах  $0,5...2,0^\circ$ );

$\Delta П_{СН}$  — приладову похибку визначення компасного пеленга на СН (обчислюється як функція приладових похибок визначення курсового кута  $\Delta K_{СН}$  і компасного пеленга  $\Delta П_{СН}$ );

$\Delta h_{ПАР}$  — приладова похибка сенсора глибини ПАР (лежить у межах  $0,01...0,10$  м і залежить від типу сенсора);

$\Delta l_S$  — похибку сонара при визначенні дистанції до СН, яка визначається технічними характеристиками сонара і лежить у межах  $(0,1...1,0)l_S$ .

Таким чином, первинні вимірювання напрямів ПАР у площині істинного горизонту спостерігача виконуються на базі магнітного компаса. Діаграма компасних напрямків ПАР має вигляд, показаний на рис. 3.

Тоді істинні значення курсу ПАР  $IK_{ПАР}$ , істинного пеленга на СН  $IP_{СН}$  та зворотного істинного пеленга  $IZP_{СН}$ , який дорівнює істинному пеленгу на ПАР з борту СН  $IP_{ПАР}$ , відраховані від північної частини істинного меридіана спостерігача, визначаємо за залежностями

$$IK_{ПАР} = K_{ПАР} + \Delta K_{ПАР} + d + \delta; \quad (2)$$

$$IP_{СН} = IK_{ПАР} + KK_{СН} + \Delta KK_{СН}; \quad (3)$$

$$IZP_{СН} = IP_{ПАР} = IP_{СН} \pm 180^\circ. \quad (4)$$

Реальні значення лінійних складових цифрового «вікна» сонара, позначені індексом «R», розрахуємо за формулами

$$KK_{СН R} = KK_{СН} + \Delta KK_{СН}; \quad (5)$$

$$h_{ПАР R} = h_{ПАР} + \Delta h_{ПАР}; \quad (6)$$

$$l_{SR} = l_S + \Delta l_S. \quad (7)$$

Реальну дистанцію по горизонталі  $l_R$  від ПАР до СН можна обчислити наступним чином:

$$l_{СН R} = \sqrt{l_{SR}^2 - h_{ПАР R}^2} + l_{GPS}, \quad (8)$$

де  $l_{GPS}$  — дистанція по горизонталі від носової частини СН до місця установлення суднової навігаційної системи (зазвичай, антени супутникової навігації *GPS*).

Описаний спосіб може застосовуватися у випадку, коли ширина променя сонара по вертикалі  $\alpha_S$  достатня для виявлення СН, що здебільшого можливе для малих глибин занурення ПАР. При роботі на великих

глибинах знаходження СН променем сонара можливе при його нахилі на кут  $\beta_S$ , величина якого у загальному випадку невідома. Це вимагає використання методу сканування підводного простору променем сонара, що призводить до значних втрат часу на операцію пошуку кута  $\beta_S$ . Для підвищення швидкодії процедури визначення величини  $\beta_S$  пропонується знаходити місце ПАР відносно СН шляхом обчислення просторової форми КТ та розрахунку координат його ходового кінця [2].

Підхід, запропонований у статті [2], розроблено на основі математичної моделі КТ. Точність розрахунку координат ПАР при цьому залежить від того, наскільки умови роботи прив'язної системи «СН–КТ–ПАР» відрізняються від ідеалізованих умов моделювання КТ (похибка зазвичай не перевищує  $10...15\%$ ). Цього цілком достатньо для попереднього визначення координат ПАР та визначення кута  $\beta_S$  для попереднього орієнтування променя сонара у напрямку СН. Для роботи такої системи в склад сенсорів ПАР необхідно включити сенсори кутів корінного та ходового кінців КТ.

Під впливом потоку води, що набігає зі швидкістю  $v$ , на корінному та ходовому кінцях КТ утворюються вектори сили натягу відповідно  $F_A$  і  $F_B$ . Кут  $\psi_A$  утворюється між вектором сили натягу на корінному кінці КТ  $F_A$  та вертикаллю, кут  $\psi_B$  утворюється аналогічно вектором сили натягу на ходовому кінці КТ  $F_B$  і горизонталлю. Згідно зі статтею [2] координати ПАР відносно СН отримуються у форматі декартових координат  $\{0, x_{ПАР}, y_{ПАР}, z_{ПАР}\}$  з похибкою  $10...15\%$ . Після їх визначення кут для плоскої постановки задачі розраховується за елементарним тригонометричним співвідношенням

$$\beta_S = \arctg \frac{y_{ПАР}}{x_{ПАР}}. \quad (9)$$

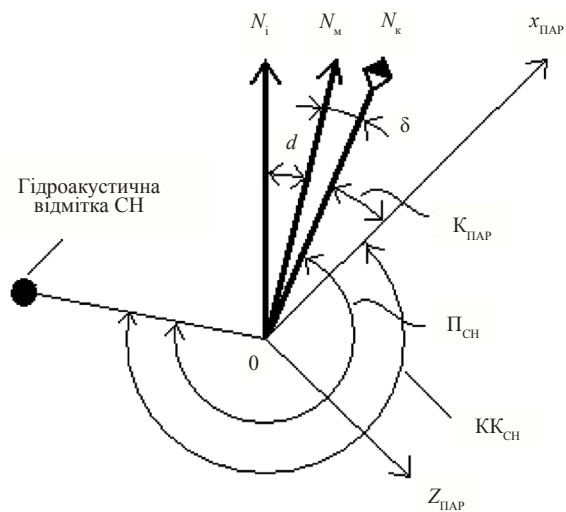


Рис. 3. Діаграма компасних напрямків підводного апарату-робота (за магнітним компасом):  $N_i, N_m, N_k$  — відповідно північна частина істинного, магнітного та компасного меридіанів спостерігача, що знаходиться на ПАР

Знайдене значення кута  $\beta_s$  використовуємо для нахилу сонара з гарантованим потраплянням корпусу СН у кут  $\alpha S$  пошукового променя сонара.

Таким чином, рівняння (2)–(8) дають змогу обчислювати кутові напрямки й віддалення ПАР від СН та їх зворотні величини з урахуванням природних магнітних поправок і приладових похибок, що забезпечує визначення місця ПАР відносно його СН з одночасною оцінкою точності обчислень. Обчислення орієнтовних координат ПАР відносно СН на базі застосування інформації про кути нахилу КТ на корінному і ходовому кінцях дає змогу оперативно (без скануючого пошуку) з використанням

залежності (9) встановлювати сонар у положення, яке гарантовано забезпечує гідроакустичний пошук СН незалежно від його взаємного розташування з ПАР.

### ВИСНОВКИ

Отримано аналітичні залежності для визначення координат прив'язного ПАР відносно його судноносія за допомогою бортового сонара підводного апарата. При обчисленні пеленга на підводний апарат і дистанції до нього від судноносія враховано основні природні поправки та приладові похибки магнітного компаса й сонара.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Блинцов, В. С.** Привязные подводные системы [Текст] / В. С. Блинцов. — К. : Наукова думка, 1998. — 232 с.
- [2] **Блінцов, О. В.** Керування прив'язним підводним апаратом за даними про форму його кабель-троса в умовах невизначеності [Текст] / О. В. Блінцов // Зб. наук. пр. НУК. — Миколаїв : НУК, 2008. — № 6 (423). — С. 136–143.
- [3] **Борисов, А. А.** Разработка методов повышения точности гидроакустических систем подводной навигации [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Борисов. — Таганрог : ГОУВПО «Таганрогский государственный радиотехнический университет», 2006.
- [4] **Клыпін, Д. Н.** Система определения координат и контроля состояния подводных пловцов [Текст] / Д. Н. Клыпін, А. Н. Лепетаев // Ползуновский вестник. — 2010. — № 2. — С. 176–181.
- [5] **Коваленко, В. В.** Малогабаритная инерциальная система [Текст] : учеб. пособие / В. В. Коваленко, А. Н. Лысов. — Челябинск : ЮФГУ, 2010. — 53 с.
- [6] **Колчеданцев, А. С.** Гидроакустические станции [Текст] / А. С. Колчеданцев. — Л. : Судостроение, 1982. — 248 с.
- [7] **Лукомский, Ю. А.** Навигация и управление движением судов [Текст] : учебник / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. — С. Пб. : Элмор, 2002. — 360 с.
- [8] **Матвеев, В. В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем [Текст] / В. В. Матвеев, В. Я. Распопов. — С. Пб. : ГНЦ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. — 300 с.
- [9] **Милн, П. Х.** Гидроакустические системы позиционирования [Текст] / П. Х. Милн ; перевод с англ. В. К. Комлева. — Л. : Судостроение, 1989. — 232 с.
- [10] **Морской энциклопедический справочник [Текст] : в 2 т. Т. 1 / под ред. Н. Н. Исанина. — Л. : Судостроение, 1987. — 512 с.**
- [11] **Нгуен, Ча Лам.** Смещение оценок угловых координат в гидролокаторе подводного аппарата [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ча Лам Нгуен. — С. Пб. : Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, 2004.
- [12] **Принципы освещения подводной обстановки с применением гидроакустических средств [Текст] / Ю. Шамарин, А. Антосик, А. Шамарин, И. Фалеев // Арсенал—XXI. — 2005. — № 1–4. — С. 57–63.**
- [13] **Римский-Корсаков, Н. А.** Технология исследования дна акваторий и подводных объектов гидролокационными методами [Текст] : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Н. А. Римский-Корсаков. — М. : ИО РАН, 2011.
- [14] **Свердлин, Г. М.** Прикладная гидроакустика [Текст] / Г. М. Свердлин. — Л. : Судостроение, 1990. — 320 с.
- [15] **Li, Qihu.** Digital Sonar Design in Underwater Acoustics. Principles and Applications [Text] / Qihu Li. — Berlin : Springer, 2012. — 600 p.
- [16] **Xavier, Lurton.** An Introduction to Underwater Acoustics [Text] / Lurton Xavier. — Berlin : Springer, 2002. — 347 p.

© О. В. Блінцов, Ж. Ю. Буруніна, П. Г. Клименко

Надійшла до редколегії 20.01.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. *О. О. Мочалов*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 2, 2012