

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА РАДІОЕЛЕКТРОННЕ АПАРАТОБУДУВАННЯ

УДК 681.883.41

С. Т. Барась, к. т. н., доц.

## ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ УСЕРЕДНЕНОЇ ШВИДКОСТІ СУДНА В УМОВАХ ХИТАВИЦІ

### Вступ

Гідроакустичний доплерівський лаг є інформаційно-вимірювальною системою, в якій передбачається індикація результатів вимірювання. Особливості зору людини диктують певні вимоги до представлення на індикаторі цифрової та символічної інформації. Зокрема, темп оновлення індикатора повинен бути не надто високим, аби інформацію можна було зафіксувати, і не надто низьким, щоб відображена інформація була максимально наближена до реального масштабу часу. З принципу роботи лага [1] випливає, що інформація про величину складових швидкості судна поновлюється з кожним новим циклом випромінювання-прийому, причому період слідування цих циклів значно менший необхідного часу збереження інформації на індикаторі. Отже, стає очевидною необхідність процедури усереднення інформації, яка повинна передувати процедурі індикації. Таким чином, експлуатуючи доплерівський лаг в реальних умовах плавання, користуються результатами не одиничного вимірювання (за один цикл), а деяким середнім (усередненим) за певний проміжок часу значенням [2]. Це означає, що перед подачею на індикатор виконується операція визначення математичних очікувань на основі відповідних масивів одиничних значень складових швидкості.

### Постановка задачі

З огляду на вищенаведені міркування практичну цінність має величина похибки вимірювання швидкості, яка приведена до певного часового інтервалу, що має назву «тривалість інтервалу усереднення». Слід зазначити, що можливість і обґрунтованість процедури усереднення базуються на тому, що горизонтальні складові швидкості судна достатньо консервативні (практично незмінні на невеликих проміжках часу). Але за наявності хитавиці судна несталою виявляється похибка одиничного вимірювання, яка є залежною від фази хитавиці. Про це свідчать результати аналізу математичної моделі похибок вимірювання горизонтальних складових, яка з урахуванням [3] має для поздовжньої складової такий вигляд:

$$\sigma_{V_x} = \frac{1}{2f_0 \left(1 + \frac{F_{\partial 1}}{2f_0}\right) \left(1 + \frac{F_{\partial 3}}{2f_0}\right)} \sqrt{A^2 \sigma_{F_{\partial 1}}^2 + B^2 \sigma_{F_{\partial 3}}^2 + C^2 \sigma_{\psi}^2 + D^2 \sigma_c^2}, \quad (1)$$

де

$$A = df_0 \cos \psi - \frac{cd \sin \psi (f_0 + F_{\partial 3})}{\sqrt{(2df_0)^2 - c^2}} - \frac{1}{2f_0 \left(1 + \frac{F_{\partial 1}}{2f_0}\right)} \left[ df_0 (F_{\partial 1} - F_{\partial 3}) \cos \psi - \frac{cd \sin \psi [f_0 (F_{\partial 1} + F_{\partial 3}) + F_{\partial 1} F_{\partial 3}]}{\sqrt{(2df_0)^2 - c^2}} \right]; \quad (2)$$

$$B = df_0 \cos \psi + \frac{cd \sin \psi (f_0 + F_{\partial 1})}{\sqrt{(2df_0)^2 - c^2}} + \frac{1}{2f_0 \left(1 + \frac{F_{\partial 3}}{2f_0}\right)} \left[ df_0 (F_{\partial 1} - F_{\partial 3}) \cos \psi - \frac{cd \sin \psi \left[ f_0 (F_{\partial 1} + F_{\partial 3}) + F_{\partial 1} F_{\partial 3} \right]}{\sqrt{(2df_0)^2 - c^2}} \right]; \quad (3)$$

$$C = df_0 (F_{\partial 1} - F_{\partial 3}) \sin \psi + \frac{cd \cos \psi \left[ f_0 (F_{\partial 1} + F_{\partial 3}) + F_{\partial 1} F_{\partial 3} \right]}{\sqrt{(2df_0)^2 - c^2}}; \quad (4)$$

$$D = \frac{d \sin \psi \left[ f_0 (F_{\partial 1} + F_{\partial 3}) + F_{\partial 1} F_{\partial 3} \right] \left[ \sqrt{(2df_0)^2 - c^2} + \frac{c^2}{\sqrt{(2df_0)^2 - c^2}} \right]}{(2df_0)^2 - c^2}. \quad (5)$$

В наведених формулах (1)—(5):  $f_0$  — робоча частота лага;  $F_{\partial 1} = f_1 - f_0$  — доплерівське зміщення частоти сигналу, прийнятого по першому променю «янусної» характеристики спрямованості (ХС);  $F_{\partial 3} = f_3 - f_0$  — доплерівське зміщення частоти сигналу, прийнятого по третьому променю «янусної» ХС;  $\psi$  — кут кильової хитавиці (позитивне значення кута — при нахилі носа судна вниз);  $c$  — швидкість звуку у воді;  $d$  — відстань між елементами випромінювальної антени, на які надходять сигнали з генераторного пристрою зі зсувом фази  $180^\circ$ ;  $\sigma_{F_{\partial 1}}$ ,  $\sigma_{F_{\partial 3}}$ ,  $\sigma_\psi$ ,  $\sigma_c$  — середньоквадратичні відхилення доплерівських частот по першому та третьому променях ХС, кута хитавиці та швидкості звуку відповідно.

Для подальшого розгляду зазначимо, що складові  $\sigma_{F_{\partial 1}}$ ,  $\sigma_{F_{\partial 3}}$ ,  $\sigma_\psi$ ,  $\sigma_c$  сумарної похибки  $\sigma_{V_x}$  вимірювання горизонтальної поздовжньої складової швидкості є сталими протягом інтервалу усереднення. Величинами, які об'єктивно змінюються на цьому інтервалі і впливають на сумарну похибку  $\sigma_{V_x}$ , є кут хитавиці  $\psi$  та вертикальна складова швидкості (обидві вони впливають на доплерівські зсуви в сигналах обох променів ХС). Кількісний аналіз моделі (1) показав, що в результаті спільної дії цих обох факторів сумарна похибка змінюється від максимального значення (якщо  $\psi = \psi_m$ ) до мінімального (якщо  $\psi = 0$ ). Слід зазначити, що вертикальна складова швидкості, яка обумовлена тією ж хитавицею, є найбільшою при нульових кутах і найменшою при максимальних нахилах судна. Отже, за наявності хитавиці похибка одиничного вимірювання горизонтальної складової швидкості виявляється величиною змінною і залежною від конкретного кута хитавиці, при якому здійснювалося дане вимірювання. Таким чином, необхідно визначити середнє значення похибки вимірювання швидкості за період хитавиці, що дозволить знайти дуже важливий тактико-технічний параметр лага — похибку вимірювання усередненої швидкості.

### Визначення похибки

Аналіз моделі похибки (1)—(5) дає підставу виконати апроксимацію функції (1) від аргументу — миттєвого значення кута хитавиці — у вигляді неперервної квадратичної параболи. При цьому також враховується, що похибка  $\sigma_{V_x}$  від знаку кута хитавиці не залежить.

Отже

$$\sigma_{V_x} = \sigma_{V_0} + s\psi^2, \quad (6)$$

де  $\sigma_{V_0}$  — середньоквадратична похибка вимірювання горизонтальної складової швидкості для:  $\psi = 0$ , максимальної вертикальної складової швидкості, що має місце в заданих умовах, априорі відомих величин похибок  $\sigma_{F_{\partial 1}}$ ,  $\sigma_{F_{\partial 3}}$ ,  $\sigma_\psi$ ,  $\sigma_c$ ;  $s$  — інтегральний коефіцієнт, який залежить від низки аргументів (всіх дестабілізуювальних факторів, які впливають на похибку вимірювання швидко-

сті, за винятком кута хитавиці).

Прийемо, що хитавиця відбувається за синусоїдним законом, і визначимо середню похибку за період хитавиці  $T_k$ :

$$\overline{\sigma_{V_x}} = \frac{2}{T_k} \int_0^{\frac{T_k}{2}} \left( \sigma_{V_0} + s\psi_m^2 \sin^2 \frac{2\pi}{T_k} t \right) dt = \sigma_{V_0} + \frac{s\psi_m^2}{2}. \quad (7)$$

Враховуючи, що згідно з (6)  $\sigma_{V_{x \max}} = \sigma_{V_0} + s\psi_m^2$ , отримаємо

$$\overline{\sigma_{V_x}} = \frac{\sigma_{V_0} + \sigma_{V_{x \max}}}{2}. \quad (8)$$

Вираз (8) визначає середню за період хитавиці похибку одиничного вимірювання горизонтальної складової швидкості. Ця похибка, як видно з (8), дорівнює півсумі похибок при нульовому та максимальному значеннях кута хитавиці. З урахуванням використання для функцій  $\sigma_{V_x}$  та хитавиці  $\psi$  певних наближених апроксимувальних функцій, а також фактичного складнішого механізму впливу вертикальної складової, ніж прийнятого для отримання моделі (1), слід розглядати отриману середню похибку (8) як дещо наближену, орієнтовну. З формули (8) видно, що в умовах статичного диференту судна середня похибка є просто похибкою одиничного вимірювання (оскільки  $\sigma_{V_0} = \sigma_{V_{x \max}}$ ), що відповідає дійсності.

Вважаючи, що одиничні вимірювання незалежні, тривалість інтервалу усереднення більша за півперіод хитавиці, а час поширення сигналу до дна і в зворотному напрямку значно менший за період хитавиці, можна отримати формулу для розрахунку похибки визначення усередненої швидкості, отриманої за  $N$  циклів випромінювання—прийому:

$$\sigma_{V_{cp}} \approx \frac{\overline{\sigma_{V_x}}}{\sqrt{N}}. \quad (9)$$

Кількість циклів випромінювання—прийому  $N$  протягом інтервалу усереднення  $T_0$  можна визначити таким чином:

$$N = \frac{T_0}{T}, \quad (10)$$

де  $T$  — період випромінювання імпульсного сигналу, який залежить від глибини моря, кута нахилу променів ХС, а також інтервалу часу, який необхідний цифровому обчислювальному пристрою лага для виконання обчислювальних процедур після прийому луно-сигналу.

Реально для глибин до 2000 м виконується таке співвідношення:

$$T \approx 1,5t_R = \frac{3H}{c \sin \alpha_0}, \quad (11)$$

де  $t_R$  — час поширення сигналу до дна і в зворотному напрямку;  $H$  — глибина акваторії;  $\alpha_0$  — кут нахилу променів ХС за відсутності хитавиці, відрахований від горизонталі.

Підставивши (11) і (10) у (9), отримаємо остаточний вираз для похибки визначення усередненої швидкості під час роботи лага з часовою діаграмою, що базується на виконанні співвідношення (11):

$$\sigma_{V_{cp}} \approx \overline{\sigma_{V_x}} \sqrt{\frac{3H}{cT_0 \sin \alpha_0}}. \quad (12)$$

Для більш точних розрахунків, в тому числі і для всього діапазону робочих глибин, необхідно користуватися формулою (9) з урахуванням співвідношення (10).

### Висновки

Формула (12) дає можливість визначати середньоквадратичну похибку вимірювання усередненої горизонтальної (поздовжньої) складової швидкості судна і, фактично, характеризує потенціальну точність доплерівського лага. Зрозуміло (і це видно з формули (12)), що в першу чергу ця

похибка залежить від похибки одиничного вимірювання  $\overline{\sigma_{V_x}}$ , яка визначається групою співвідношень (1)—(5) для нульового і максимального кутів хитавиці і остаточно виразом (8). Крім цього, на сумарну похибку вимірювання усередненої складової швидкості впливають такі фактори, як глибина акваторії  $H$ , швидкість звуку  $c$ , кут нахилу променів ХС антени  $\alpha_0$  (ці фактори визначають період імпульсного випромінювання  $T$ ), а також тривалість інтервалу усереднення  $T_0$ . Очевидно, що формула (12) справедлива також для поперечної складової швидкості, якщо замість похибки  $\overline{\sigma_{V_x}}$  підставити похибку  $\overline{\sigma_{V_y}}$ , визначену для поперечної складової  $V_y$  з урахуванням кута бортової хитавиці.

На практиці може виникнути необхідність визначення похибки вимірювання горизонтальних складових на інтервалі усереднення, тривалість якого менша або значно менша періоду хитавиці ( $T_0 < T_k$ ). В цьому випадку за середню похибку одиничного вимірювання  $\overline{\sigma_{V_x}}$  ( $\overline{\sigma_{V_y}}$ ) повинна бути прийнята похибка, яка визначена для деякого середнього значення кута хитавиці в межах встановленого інтервалу усереднення, очевидно, з урахуванням фази хитавиці.

Похибка усередненої швидкості, безумовно, менша від похибки одиничного вимірювання. Це означає, що квадратний корінь у формулі (12) не повинен бути більшим за одиницю. А таке можливе лише за умови узгоджених значень, в першу чергу, глибини і тривалості інтервалу усереднення [4]. Зазначимо, що ця вимога забезпечується алгоритмом роботи лага — не дозволяється усереднення інформації за такий інтервал часу, який є меншим, ніж час поширення сигналу до дна і в зворотному напрямку.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Виноградов К. А., Кошкарев В. Н., Осюхин Б. А., Хребтов А. А. Абсолютные и относительные лаги. Справочник. — Л.: Судостроение, 1990. — 264 с.
2. Корякин Ю. А., Смирнов С. А., Яковлев Г. В. Гидроакустика на рубеже столетий. Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. — СПб.: Наука, 2003. — 615 с.
3. Барась С. Т. Аналіз джерел похибки вимірювання складових вектора швидкості судна // Вісник ВПІ. — 2000. — № 2. — С. 81 — 85.
4. Виноградов К. А., Сковородников А. В. Современное состояние и перспективы развития отечественных и зарубежных измерителей скорости и глубины под килем. Аналитический обзор сост. — СПб.: Гос.НИИГИ МО РФ, 1998. — 34 с.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Надійшла до редакції 23.03.04.  
Рекомендована до друку 13.04.04.

**Барась Святослав Тадіонович** — доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури.

Вінницький національний технічний університет