

УДК 681.883.41

С. Т. Барась, к. т. н., доц.;

А. П. Мартинюк

ЗМЕНШЕННЯ СИСТЕМАТИЧНОЇ ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СКЛАДОВИХ ВЕКТОРА ШВИДКОСТІ НОСІЯ ДОПЛЕРІВСЬКИМ ЛАГОМ

Розглянуто алгоритм компенсації впливу вертикальної складової вектора швидкості на роботу доплерівського лага, який зменшує похибки вимірювання горизонтальних складових вектора швидкості носія. Отримано аналітичні залежності для оцінювання цієї складової методичної похибки.

Вступ

Наукові дослідження океану, його дна, промислова розробка шельфу, а також глибинних районів океану, прокладення трубопроводів, виконання рятувальних робіт не можуть обійтися без використання глибоководних жилих і нежилых підводних апаратів (ПА).

Сучасні ПА оснащуються навігаційними комплексами, в яких інформація окремих підсистем інтегрується з метою підвищення надійності і точності навігації. Одним з важливих засобів навігації ПА є доплерівський лаг. З теорії побудови гідроакустичних доплерівських лагів відомо, що найбільший вплив на результат вимірювання горизонтальних складових швидкості носія (корабля, ПА) мають спільна дія хитами та вертикальних переміщень [1, 2]. Ці фактори викликають систематичну складову похибки. Випадкова складова похибки, як показано в [3], в основному визначається структурою луно-сигналів через флуктуації доплерівських зсувів. Щоб зменшити ступінь її впливу на результати вимірювань, їх ефективно згладжують шляхом використання процедури осереднення за достатньо тривалий проміжок часу [1, 4]. У цьому випадку нормовані значення випадкової складової похибки не перевищують 10 %, причому ця цифра суттєво залежить від умов плавання. Що стосується систематичної похибки, то вона може бути, очевидно, зменшена у даному випадку лише відповідною компенсацією дестабілізуючих факторів.

У статті наводиться алгоритм компенсації впливу вертикальних переміщень носія з метою суттєвого зменшення систематичної похибки вимірювання горизонтальних складових швидкості.

Постановка задачі

Гідроакустичний доплерівський лаг використовується для вимірювання поперечної та поздовжньої горизонтальних складових вектора швидкості носія. Вертикальні переміщення носія (приймально-випромінювальної антени лага) викликають додаткові доплерівські зсуви, що є причиною появи відповідної складової систематичної похибки вимірювання горизонтальних складових швидкості. Оскільки механізм впливу вертикальної складової швидкості на обидві горизонтальні складові однаковий, то розгляд алгоритму компенсації її впливу проведемо для поздовжньої горизонтальної складової вектора швидкості носія. Для простоти викладення матеріалу зробимо такі припущення:

- діаметрально-траверсна орієнтація променів характеристики спрямованості (ХС) антен;
- система лага є частотно-незалежною (в доплерівському розумінні) приймально-випромінювальною;
- час поширення сигналу менший чверті періоду хитами;
- вводиться в апаратуру лага інформація про кути хитами від зовнішніх сенсорів.

У більшості доплерівських вимірювачів, що використовують частотно-незалежні в доплерівському розумінні антени з янусними характеристиками спрямованості в припущенні діаметрально-траверсної орієнтації променів ХС для визначення поздовжньої горизонтальної складової вектора швидкості носія використовується така залежність [1]:

$$V = \frac{f_{\partial 13} c}{4f_B \cos \alpha}, \quad (1)$$

де $f_{\partial 13} = f_{\partial 1} - f_{\partial 3}$; $f_{\partial 1}$, $f_{\partial 3}$ — доплерівські частоти по променях у напрямі носа та корми відповідно; c — швидкість звуку; α — кут нахилу променя відносно горизонту; f_B — частота випромінюваного сигналу.

У реальних умовах значення доплерівських частот по поздовжніх променях ХС достатньо точно описуються виразами [2]

$$f'_{\partial 1} = \frac{2f_B}{c} [V_X \cos(\alpha + \alpha_k) + V_Z \sin(\alpha + \alpha_k)]; \quad (2)$$

$$f'_{\partial 3} = -\frac{2f_B}{c} [V_X \cos(\alpha - \alpha_k) + V_Z \sin(\alpha - \alpha_k)], \quad (3)$$

де V_X — горизонтальна поздовжня складова вектора швидкості; V_Z — вертикальна складова вектора швидкості; α_k — поточне значення кута хитавиці.

За таких умов складова відносної систематичної похибки вимірювання поздовжньої горизонтальної складової вектора швидкості, якщо не вживаються спеціальні заходи компенсації хитавиці і вертикальної складової вектора швидкості, відповідно до [1, 4] описується такою залежністю:

$$\delta V_X = \frac{\Delta V_X}{V_X} = \frac{\alpha_k^2}{2} \pm \frac{V_Z}{V_X} \sin \alpha_k. \quad (4)$$

З (4) випливає, що за наявності V_Z і відсутності хитавиці система Янус дозволяє ефективно компенсувати вплив вертикальної складової, оскільки обидва члени наведеної залежності у цьому випадку перетворюються в нуль. Проте, за наявності хитавиці або статичних нахилів компенсації V_Z не відбувається і має місце певне значення складової систематичної похибки.

Формула (4) дає можливість оцінити похибки δV_X для різних значень величин, які входять у формулу. З точки зору практичного використання лага найцікавішими є залежності значення вказаної похибки від співвідношення значень вертикальної та горизонтальної складових V_Z/V_X для різних значень кутів хитавиці, а також від значення горизонтальної складової швидкості V_X для різних значень вертикальної складової швидкості V_Z та фіксованих значень кута хитавиці α_k . На рис. 1 і 2 показано графічні залежності, обчислені за формулою (4).

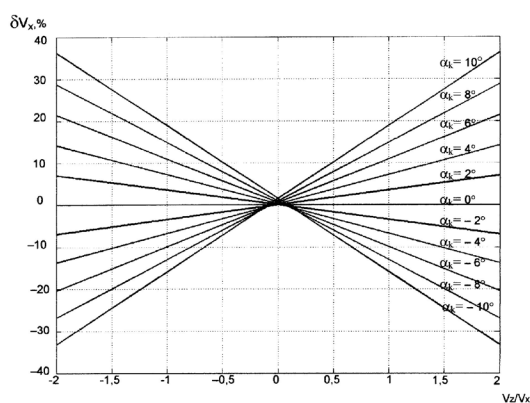


Рис. 1. Залежність відносної систематичної похибки вимірювання горизонтальної складової швидкості від співвідношення V_Z/V_X

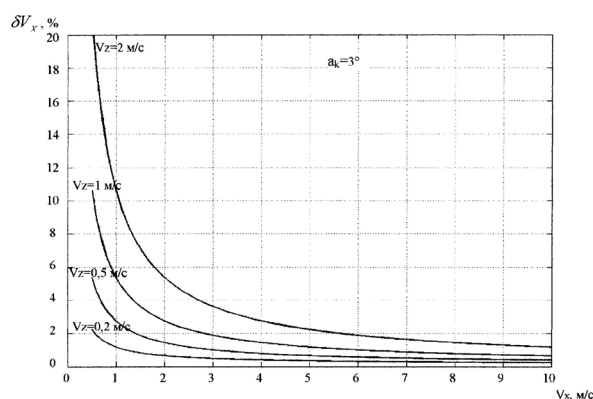


Рис. 2. Залежність відносної систематичної похибки вимірювання горизонтальної складової швидкості від її значення

З рисунків видно, що складова систематичної похибки, яка нами розглядається, є значною, отже вона суттєво погіршує найважливішу для лага тактичну характеристику, а саме — точність вимірювання горизонтальних складових вектора швидкості. Таким чином, для зменшення цієї складової систематичної похибки і, як результат, зменшення сумарної похибки вимірювання гори-

зонтальних складових швидкості, алгоритм роботи лага доцільно доповнити алгоритмом компенсації впливу вертикальної складової V_Z .

Алгоритм компенсації

Очевидно, компенсувати вплив вертикальної складової V_Z на результат вимірювання горизонтальних складових швидкості можна лише за умови, коли відомі або визначені її поточні значення. Найдоцільніше поточні значення V_Z вимірювати безпосередньо засобами лага. Аналіз формул (2) і (3) показує, що члени з V_X характеризуються протилежними знаками, а члени з V_Z — однаковими. Саме тому різницева частота $(f'_{\partial 1} - f'_{\partial 3})$ використовується у лагах для визначення горизонтальної складової швидкості (у нашому випадку V_X). З тих же міркувань цілком логічно було б сумарну частоту $(f'_{\partial 1} + f'_{\partial 3})$ використати для визначення поточних значень вертикальної складової V_Z . Тому задеклароване вище доповнення алгоритму роботи лага полягає в реалізації процедури визначення V_Z з подальшим його урахуванням під час визначення горизонтальних складових вектора швидкості. Перейдемо до математичного обґрунтування наведеного алгоритму.

Знайдемо сумарну частоту $(f'_{\partial 1} + f'_{\partial 3})$ шляхом додавання (2) і (3), виконаємо певні спрощення, отримаємо

$$F_{\partial X \Sigma} = f'_{\partial 1} + f'_{\partial 3} = -\frac{4V_X f_B}{c} \sin \alpha \sin \alpha_k + \frac{4V_Z f_B}{c} \sin \alpha \cos \alpha_k. \quad (5)$$

Після нескладних перетворень (5) отримаємо вираз для вертикальної складової швидкості

$$V_Z = \frac{c F_{\partial X \Sigma}}{4 f_B \sin \alpha \cos \alpha_k} + V_X \frac{\sin \alpha_k}{\cos \alpha_k}. \quad (6)$$

Знайдемо різницеву частоту $(f'_{\partial 1} - f'_{\partial 3})$ по горизонтальній координаті V_X з використанням (2) і (3)

$$F_{\partial X \Delta} = f'_{\partial 1} - f'_{\partial 3} = \frac{4V_X f_B}{c} \cos \alpha \cos \alpha_k + \frac{4V_Z f_B}{c} \sin \alpha \cos \alpha_k. \quad (7)$$

Розв'язавши систему рівнянь (6) і (7), отримаємо остаточний вираз для розрахунку значень горизонтальної складової вектора швидкості

$$V_{X \text{ роз}} = \frac{1}{4 f_B} \left(\frac{c}{\cos \alpha} F_{\partial X \Delta} \cos \alpha_k - \frac{c}{\sin \alpha} F_{\partial X \Sigma} \sin \alpha_k \right). \quad (8)$$

Як видно з формули (8), для розрахунку значень горизонтальної складової вектора швидкості V_X потрібні різницева та сумарна частоти по обох променях ХС, значення частоти випроміненого сигналу f_B та поточні кути хитавиці α_k . Отримана формула, крім цього, повністю ілюструє уточнення алгоритму роботи доплерівського лага. Воно полягає у тому, що обчислювальним пристроєм лага визначається додатково сумарна частота по обох променях $F_{\partial X \Sigma}$ і з традиційно визначеною різницевою частотою $F_{\partial X \Delta}$ за формулою (8) розраховується значення горизонтальної складової вектора швидкості. При цьому значення частоти f_B та кутів α_k вважаються, очевидно, відомими.

З'ясуємо тепер, якою мірою наведене вище удосконалення алгоритму сприяє компенсації впливу V_Z , тобто зменшує систематичну похибку вимірювання горизонтальної складової вектора швидкості.

Аналіз систематичної похибки вимірювання

Систематична похибка випромінювання V_X для даного алгоритму визначатиметься в основному тільки невідповідністю відношення $c/\sin \alpha$ від дійсних поточних значень швидкості звуку і кута нахилу променя ХС. Це відношення, як видно з (8), входить у формулу для розрахунку горизонтальної складової вектора швидкості.

Для частотно-незалежних в доплерівському розумінні антен відношення $c/\cos \alpha$ є константою, при цьому з [2, 3] відомо, що

$$\alpha = \arccos\left(\frac{c}{2f_B d}\right), \quad (9)$$

де d — відстань між елементами випромінювальної антени, на які надходять сигнали з генераторного пристрою зі зсувом фази 180° .

Відстань d вибирається, виходячи з такого співвідношення:

$$d = \frac{c_0}{2f_B \cos \alpha_0}, \quad (10)$$

де α_0 — значення кута нахилу ХС для робочої частоти f_B і швидкості звуку c_0 .

Відносну систематичну похибку, що виникає в результаті застосування формули (8), визначимо як

$$\delta V_X = \frac{V_{X\text{роз}} - V_X}{V_X} = \frac{V_{X\text{роз}}}{V_X} - 1. \quad (11)$$

З урахуванням (5), (7), (9), певних підстановок і перетворень вираз (8) можна подати у вигляді:

$$V_{X\text{роз}} = V_X \left\{ \cos^2 \alpha_k + \frac{V_Z}{V_X} \sin \alpha_k \cos \alpha_k - \frac{\sin \left[\arccos \left(\frac{c}{c_0} \cos \alpha_0 \right) \right]}{-\frac{c_0}{c} \frac{1}{\sin \alpha_0}} \left(-\sin^2 \alpha_k + \frac{V_Z}{V_X} \cos \alpha_k \sin \alpha_k \right) \right\}. \quad (12)$$

Позначивши

$$K = \frac{c_0}{c} \sin \left[\arccos \left(\frac{c}{c_0} \cos \alpha_0 \right) \right]$$

та виконавши низку перетворень, отримаємо залежність для оцінювання відносної систематичної похибки вимірювання горизонтальної складової вектора швидкості за умови реалізації вищенаведеного алгоритму компенсації впливу вертикальної складової швидкості

$$\delta V_X = \sin \alpha_k (1 - K) \left(\frac{V_Z}{V_X} \cos \alpha_k - \sin \alpha_k \right). \quad (13)$$

Графічні залежності відносної систематичної похибки, обчисленої за формулою (13), показані на рис. 3. Ці залежності побудовані в аналогічній рис. 1 системі координат, що дозволяє легко помітити суттєве зменшення похибки за умови виконання розрахунків обчислювальним пристроєм лага за формулою (8), тобто за умови компенсації впливу вертикальної складової V_Z .

Формула для параметра K , який впливає на похибку δV_X (13), показує його залежність від співвідношення c_0/c , яке, в свою чергу, визначає кут нахилу променя ХС. Тому наведемо графічні залежності похибки δV_X від значення швидкості звуку у воді для незмінного відношення V_Z/V_X . Необхідно зазначити, що океан є неоднорідною структурою, де швидкість звуку c в кожному шарі має своє значення, але кут нахилу променя α залежить тільки від швидкості звуку в місці роз-

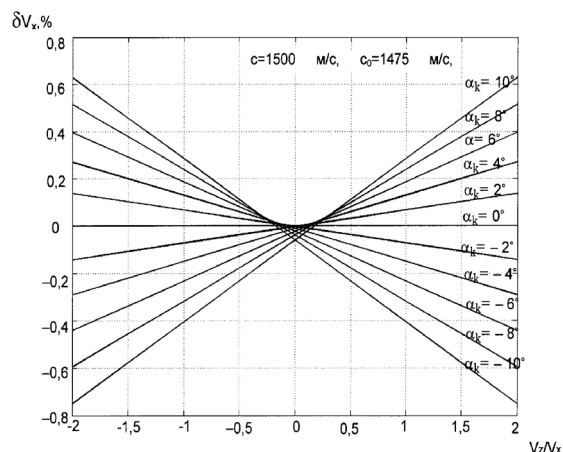


Рис. 3. Залежність відносної систематичної похибки вимірювання горизонтальної складової швидкості після компенсації впливу вертикальної складової V_Z

ташування антен [4]. Залежність похибки δV_X (тобто за умови реалізації запропонованого алгоритму) від невідповідності дійсного значення швидкості звуку в середовищі від закладеного в апаратуру показана на рис. 4.

Висновки

Отже, використання для розрахунку значень позовжньої горизонтальної складової вектора швидкості носія формули (8) (замість формули (1), яка використовувалася традиційно), тобто реалізація алгоритму компенсації впливу вертикальної складової швидкості, дозволяє суттєво зменшити систематичну похибку вимірювання горизонтальних складових вектора швидкості носія. Цей висновок базується на аналізі залежностей (4) та (13), проілюстрованому графічними залежностями відносно похибки. Враховуючи стратегічне призначення гідроакустичних доплерівських лагів, можна стверджувати, що компенсація впливу вертикальної складової V_Z на доплерівські зсуви частот дає можливість підвищити достовірність обчислення навігаційних параметрів носія.

Графічні залежності (рис. 4), показують існування систематичної похибки, обумовленої несталістю швидкості звуку у воді. Слід зазначити, що за умови використання відповідного сенсора і наявності в зв'язку з цим поточної інформації про швидкість звуку в місці розташування антени, а також з урахуванням виразів (9) та (10), введення поправки на швидкість звуку у воді у другий член виразу (8) дозволить зменшити похибку δV_X до нехтовно малих значень у всьому діапазоні змін швидкості звуку у воді.

Значення вертикальної складової швидкості і, відповідно, її вплив на похибку вимірювання горизонтальних складових вектора швидкості залежать від типу об'єкта (носія) та умов його експлуатації. Особливо важливою є компенсація впливу вертикальної складової при навігації ПА, оскільки в траєкторії руху ПА присутні всі три компоненти вектора швидкості, причому за значенням вони часто є співставними. Вертикальні переміщення приймально-випромінюючої антени мають місце також на надводних судах, причому вони спостерігаються, як правило, за наявності бортової або кільової хитавиці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Судовые измерители скорости / А. А. Хребтов, В. Н. Кошкарев, Б. А. Осюхин и др.: Справочник. — Л.: Судостроение, 1978. — 286 с.
2. Абсолютные и относительные лаги / К. А. Виноградов, В. Н. Кошкарев, Б. А. Осюхин, А. А. Хребтов: Справочник. — Л.: Судостроение, 1990. — 264 с.
3. Барась С. Т. Аналіз джерел похибки вимірювання складових вектора швидкості судна // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2000. — № 2. — С. 81—85.
4. Гидроакустические навигационные средства / В. И. Бородин, Г. Е. Смирнов, Н. А. Толстякова, Г. В. Яковлев. — Л.: Судостроение, 1983. — 262 с.

Рекомендована кафедрою проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури

Надійшла до редакції 13.09.07
Рекомендована до друку 13.11.07

Барась Святослав Тадіонович — доцент кафедри проектування комп'ютерної та телекомунікаційної апаратури, Вінницький національний технічний університет;

Мартинюк Анатолій Петрович — головний конструктор АТ НДІ «RIF-ACVAAPARAT»
Республіка Молдова, м. Белць

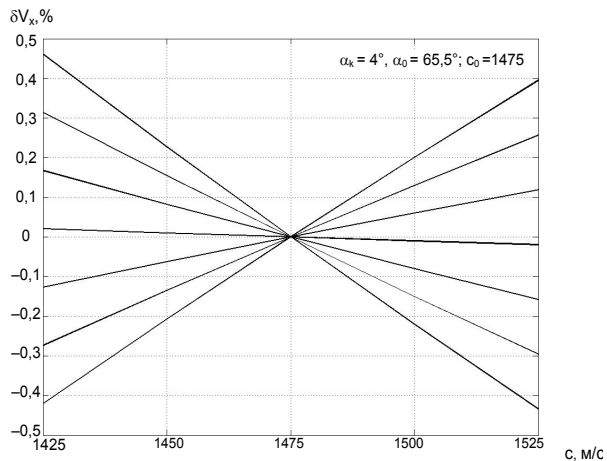


Рис. 4. Залежність відносної похибки вимірювання горизонтальної складової швидкості носія від швидкості звуку