

DOI: 10.18372/2310-5461.40.13276

УДК 681.5

В. В. Штрибець

Державний університет інфраструктури та технологій
orcid.org/0000-0002-9723-4203
e-mail: schtribecv@ukr.net;

В. М. Василенко

Державний університет інфраструктури та технологій
orcid.org/0000-0002-8511-0772
e-mail: vasilenko37@ukr.net;

О. М. Вечурко

Державний університет інфраструктури та технологій
orcid.org/0000-0002-6639-9785
e-mail: vechurkoVM@gmail.com

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ПОТУЖНОСТІ ВИПАДКОВИХ СИГНАЛІВ МОРСЬКИХ НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ

Вступ

Призначенням морських навігаційних приладів є забезпечення надійного контролю за поточними значеннями параметрів, які характеризують режими маршруту засобу водного транспорту. Так, маршрут засобу у складних метеорологічних умовах і у ночі неможливий без приладів, які визначають і надають інформацію штурману про положення засобу водного транспорту на маршруті руху відносно горизонту, напрямку його руху тощо. При точних показах морських навігаційних приладів, надійній її роботі забезпечується безпека судноплавства [1–3].

До морських навігаційних приладів, які необхідні для забезпечення безпечного руху та вирішення навігаційних задач, як правило, належать:

- компаси різного призначення;
- гіроазимуту;
- автопрокладчики;
- лаги, лоти, ехолоти;
- секстант.

Такі прилади призначені [4]:

- для вимірювання окремих елементів руху судна;
- для визначення місця розташування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

У даний час правильне функціонування морських навігаційних приладів неможливе без аналізу випадкових процесів, що протікають у них під впливом зовнішніх і внутрішніх перешкод [5; 6].

При дослідженні та вимірюванні характеристик випадкових процесів використовується два

класичні підходи: спектральний (вимірювання оцінок спектральних характеристик, зокрема спектральній щільності потужності) і часовий (вимірювання оцінок кореляційних функцій). Кожен з вказаних підходів має свої переваги й недоліки, кожному з них віддається перевага при рішенні тих або інших конкретних завдань, а при окремих дослідженнях необхідне поєднання цих підходів. Тим більше, що можливість і доцільність поєднання спектрально-кореляційних методів аналізу випадкових сигналів забезпечується теоремою Вінера–Хінчіна [1]. Тому вже стало загальноприйнятим фактом, підтвердженим практикою, що спектрально-кореляційний аналіз є дієвим засобом витягання корисної інформації з експериментальних даних, який дозволяє проводити глибоку кількісну оцінку параметрів випадкових процесів.

Відомо, що методи вимірювання характеристик випадкових сигналів є складнішими, ніж методи вимірювання детермінованих (регулярних) сигналів (і процесів). Тому із самого початку й до теперішнього часу однією з основоположних вимог до методів вимірювання спектральних характеристик випадкових сигналів є їх вимірювання, як правило, у реальному часі й при найбільш простій апаратурній реалізації. Саме складність апаратурної реалізації методів спектрального аналізу та відсутність необхідної технічної бази довгий час стримували створення й застосування апаратури спектрального аналізу у морських навігаційних приладах.

Якісний стрибок у розвитку спектральних методів аналізу випадкових сигналів відбувся з ви-

користанням спочатку зовнішніх аналогових, а потім цифрових і персональних ЕОМ. Проте застосування зовнішніх ЕОМ було пов'язане з вирішенням ряду організаційно-технічних питань, таких, як запис, зберігання й введення у ЕОМ досліджуваних сигналів, взаємодія з обслуговуючим персоналом ЕОМ при постановці та вирішенні завдань, аналізі отриманих результатів. Порушувалося при цьому й одна з найважливіших вимог практичної реалізації — проведення спектрального аналізу у реальному часі.

Постановка завдання дослідження

Відома досить велика кількість різних методів розрахунку оцінок спектральної щільності потужності (СЩП) випадкових величин: усереднювання квадрата відфільтрованої реалізації, перетворення Фур'є оцінки кореляційної функції, усереднювання за діапазоном частот квадратів коефіцієнтів Фур'є реалізації випадкових величин [1–3].

Відомо, що визначення локальної оцінки СЩП випадкових величин у морських навігаційних приладах не використовується з причин складної технічної реалізації відомих методів розрахунку. У відомих морських навігаційних приладах визначається інтегральна (усереднена тим або іншим способом) оцінка СЩП випадкових величин. При цьому необхідно знайти відповідь на питання: який з використовуваних методів дозволяє отримати інтегральну оцінку СЩП з найменшою дисперсією (за фіксований час аналізу або вимірювання T), тобто є у вказаному сенсі оптимальним.

Мета статті — розробка моделі оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів морських навігаційних приладів, оптимальної за можливістю технічної реалізації та потрібної точності визначення навігаційних параметрів під час руху судна.

Модель оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів морських навігаційних приладів

Знайдемо спочатку загальний вигляд для будь-якої оцінки СЩП. Очевидно, що, маючи у своєму розпорядженні реалізацію випадкового процесу довжиною T , можна отримати оцінку (тим або іншим відомим способом) кореляційної функції $\hat{R}(\tau)$ тільки для часу $-\tau < T < \tau$. Оскільки $R(\tau)$ парна функція t , то досить розглянути лише інтервал $\tau > 0$. Будь-яка оцінка СЩП \hat{G} (локальна або інтегральна) випадкового сигналу представляє в загальному випадку лінійне перетворення від оцінки кореляційної функції $\hat{R}(\tau)$ цього сигналу.

Тому загальний вид оцінки СЩП:

$$\hat{G}(\omega_0, \Delta\omega) = \hat{G} = \int_0^T H(\tau) \hat{R}(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де $H(\tau)$ — перетворююча функція; ω_0 — частота аналізу; $\Delta\omega$ — полоса усереднення.

Перетворююча функція $H(\tau)$ залежить від частоти аналізу ω_0 при локальній оцінці СПМ і від величин ω_0 , $\Delta\omega$ при інтегральній оцінці СПМ, а її вигляд (форма) визначають математичне очікування та дисперсію оцінки СПМ \hat{G} . Разом з тим при фіксованій функції $H(\tau)$ дисперсія оцінки СПМ \hat{G} залежатиме від вибраної оцінки кореляційної функції $\hat{R}(\tau)$. Для знаходження узагальненої математичної моделі оптимальної оцінки СПМ випадкового процесу обробки навігаційної інформації $x(t)$ скористаємося статистичною теорією прийняття рішень [3].

Позначимо сумісну багатовимірну функцію розподілу величин $x(t)$ і $\hat{R}(\tau)$ через $W[\{x(t)\}; \{\hat{R}(\tau)\}]$. З погляду статистичної теорії рішень функція $\hat{R}(\tau)$ не відома й є випадковою величиною, апіорна дисперсія якої велика. Причому, апіорна функція розподілу $W[\{\hat{R}(\tau)\}]$ має велику дисперсію. У результаті вимірювання величин $\{x(t)\}$ функція розподілу величин перетворюється на умовну функцію розподілу:

$$W\left[\frac{\{\hat{R}(\tau)\}}{\{x(t)\}}\right] = \frac{W\left[\left\{\frac{x(t)}{\hat{R}(\tau)}\right\} W[\{\hat{R}(\tau)\}]\right]}{W[\{x(t)\}]} \quad (2)$$

Ширина умовної (апостеріорної) функції розподілу вужче, ніж апіорної, і чим вона вужче, тим точніше можна на підставі досвіду, тобто вимірювання послідовності $\{x(t)\}$, визначити оцінку кореляційної функції $\hat{R}(\tau)$. Різні апостеріорні оцінки $\hat{R}(\tau)$, а значить, й оцінки СЩП \hat{G} мають, при даній послідовності $\{x(t)\}$, різну ймовірність і дисперсію. З погляду статистичної теорії рішень оптимальною є та оцінка \hat{G} (або $\hat{R}(\tau)$), яка має найбільшу ймовірність або найменшу дисперсію. Якщо умовна функція розподілу $W[\{R(\tau)\}/\{x(t)\}]$ достатньо вузька (це необхідно для того, щоб вимірювання було достатньо точним), то оцінки за максимумом імовірності (оцінка Байеса) і за мінімумом дисперсії збігаються. При цьому оцінка за максимумом імовірності збігається з оцінкою за максимумом правдоподібності. У той же час оцінка за мінімумом дисперсії виявляється більш складною, а, отже, й більш трудомісткою.

Таким чином, згідно статистичної теорії прийняття рішень, оптимальної буде та оцінка кореляційної функції $\hat{R}(\tau)$ (а, отже, і визначена по ній з виразу (1) оцінка СЩП \hat{G}), яка забезпечує максимум функції правдоподібності $W[\{x(t)\}/\{R(\tau)\}]$.

Знайдемо цю оцінку у припущенні, що досліджуваний випадковий процес відноситься до класу гаусовських, що справедливо для більшості реальних випадкових процесів, які протікають при визначенні навігаційних параметрів літака. Позначимо для спрощення записів $x(t_i) \equiv x_i$; $R(t_i - t_j) \equiv R_{ij}$. Тоді

$$W[x_i / R_{ij}] = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \left| \text{Det} R_{ij}^{-1} \right|^{1/2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N R_{ij}^{-1} x_i x_j \right\}, \quad (3)$$

де R_{ij}^{-1} — матриця, зворотна кореляційній матриці R_{ij} ; N — об'єм вибірки, за яким визначається оцінка кореляційної функції;

$$\text{Det} R_{ij}^{-1} = \begin{vmatrix} R^{-1}(0) & R^{-1}(1) & R^{-1}(2) & \dots \\ R^{-1}(1) & R^{-1}(0) & R^{-1}(1) & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R^{-1}(N-1) & R^{-1}(N-2) & \dots & R^{-1}(0) \end{vmatrix}.$$

У формулі (3) використовується зворотна матриця R_{ij}^{-1} , а не матриця R_{ij} , оскільки матриця R_{ij}^{-1} простіше для розрахунків, тому що вона практично залежить від різниці індексів $R_{ij}^{-1} = R_{ij}^{-1}(|i-j|)$. Виходячи з цього, позначимо $R_{i,i+k} \equiv R(k)$; $R_{i,i+k}^{-1} \equiv R^{-1}(k)$. Значення коефіцієнтів матриці $R^{-1}(k)$, що забезпечують максимум функції правдоподібності (3), можуть бути визначені з умови: $\frac{\partial W}{\partial R^{-1}(k)} = 0$.

Перетворимо вираз (3) таким чином:

$$\sum_{i,j=1}^N R^{-1}(|i-j|) x_i x_j = 2 \sum_{k=1}^{N-1} R_k^{-1} \sum_{j=1}^{N-k} x_j x_{j+k} + \sum_{i=1}^N R^{-1}(0) x_i^2;$$

$$i-j=k.$$

Обчислюючи власні похідні від детермінанта $\Delta = \text{Det} R_{ij}^{-1}$, отримаємо

$$\frac{\partial \Delta}{\partial R_0^{-1}} = \Delta (R_{11} + R_{22} + \dots + R_{NN}) = N \Delta R(0),$$

де $R_{11} = \frac{\Delta_{11}}{\Delta}$, $R_{11} = R_{22} = \dots = R_{NN} = R(0)$.

При обчисленні решти власних похідних потрібно врахувати, що елемент $R^{-1}(k)$ зустрічаються у $2k$ строках (k зверху і k знизу) по одному разу й у $(N-2k)$ строках по два рази при $\left(k \leq \frac{N}{2}\right)$.

Тоді

$$\frac{\partial \Delta}{\partial R_k^{-1}} = \Delta [2k + 2(N-2k)] R(k) = 2(N-k) \Delta R_k.$$

При $k > \frac{N}{2}$ елемент R_k зустрічається тільки у

$2(N-k)$ рядках по одному разу, а отже, для нього також правильним є отримане співвідношення.

З урахуванням сказаного вище, проведемо диференціювання виразу (3) за $R^{-1}(k)$ та запишемо умову:

$$\frac{\partial W}{\partial R_k^{-1}} = (2\pi)^{-\frac{N}{2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N R_{ij}^{-1} x_i x_j \right\} \times \left[\Delta^{-\frac{1}{2}} (N-k) R(k) - \Delta^{-\frac{1}{2}} \sum_{j=1}^{N-k} x_j x_{j+k} \right] = 0.$$

Звідси знаходимо оптимальну оцінку

$$\hat{R}_k = \frac{1}{N-k} \sum_{j=1}^{N-k} x_j x_{j+k}, \quad (4)$$

де $N = \frac{T}{\tau_d}$; $k = \frac{\tau}{\tau_d}$; τ_d — період дискретизації досліджуваного випадкового процесу $x(t)$.

Переходячи до границі у співвідношенні (4) при $\tau_d \rightarrow 0$, отримаємо

$$\hat{R}_{opt}(\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} x(t) x(t+\tau) dt. \quad (5)$$

Ця оцінка кореляційної функції оптимальна тоді, коли вона забезпечує найменшу, порівняно з іншими оцінками, дисперсію, унаслідок максимально повного використання інформації про досліджуваний процес, що міститься в послідовності $\{x(t)\}$.

Її використання дозволяє отримати з виразу (1) оптимальну оцінку СЩП \hat{G}_{opt} , що забезпечує, порівняно з іншими оцінками, найменшу дисперсію, тобто вона забезпечує найбільшу точність вимірювань навігаційних параметрів.

У практиці апаратного спектрального аналізу часто використовують спрощену оцінку СЩП, у якій для всіх значень t час інтеграції приймається постійним [3]:

$$\hat{R}(\tau) = \frac{1}{T-\tau_0} \int_0^T x(t) x(t+\tau) dt. \quad (6)$$

З цього співвідношення видно, що для отримання оцінки $\hat{R}(\tau)$ необхідні значення $x(t)$ при $t > T$.

Отже, якщо необхідні значення кореляційної функції при $0 < \tau < \tau_1$, то потрібно знати $x(t)$ при $0 < t < T + \tau$. Але, якщо послідовність $x(t)$ відома на інтервалі $0 \leq t \leq T + \tau_1$, то оптимальна на цьому інтервалі оцінка (5) приймає вигляд:

$$\hat{R}_{opt}(\tau) = \frac{1}{T + \tau_1 - \tau} \int_0^{T + \tau_1 - \tau} x(t)x(t + \tau) dt. \quad (7)$$

Отримана оцінка також має мінімальну дисперсію. Відмінність між оцінками (6) і (7), у сенсі оптимальності, буде незначною при $\tau_1 \ll T$.

Отже, запропонована модель оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів морських навігаційних приладів дозволяє враховувати рівень перешкод, які вносяться у визначення навігаційних параметрів судна під час руху. Застосування автоматичних фільтрів (переважно цифрових), які у автоматичному режимі здатні налаштуватися на визначені перешкоди, дозволить підвищити точність отримання навігаційних параметрів системою управління судном під час руху, тобто підвищити безпеку, особливо при застосуванні автоматичних (автоматизованих) засобів прокладання маршруту та руху за встановленим курсом.

Висновки

У статті обґрунтовано, що проблема підвищення точності визначення навігаційних параметрів за допомогою бортових морських навігаційних приладів залежить від врахування можливих перешкод. Розроблена модель оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів морських навігаційних приладів, яка є оптимальною за можливістю технічної реалізації та потрібною точністю визначення навігаційних параметрів судна під час руху, дозволяє підвищити точність визначення навігаційних параметрів за рахунок фільтрування зайвої інформації, що вноситься випадковими сигналами.

Штрибець В. В., Василенко В. М., Вечурко О. М. МОДЕЛЬ ОЦІНКИ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ПОТУЖНОСТІ ВИПАДКОВИХ СИГНАЛІВ МОРСЬКИХ НАВІГАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ

Показано, що призначенням морських навігаційних приладів є забезпечення надійного контролю за поточними значеннями параметрів, які характеризують режими маршруту засобу водного транспорту. Обґрунтовано, що при дослідженні та вимірюванні характеристик випадкових процесів використовується два класичні підходи: спектральний і часовий. Визначені переваги та недоліки цих підходів. У дослідженні розроблена модель оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів морських навігаційних приладів, оптимальної за можливістю технічної реалізації та потрібною точністю визначення навігаційних параметрів під час руху судна. Запропонована модель оцінки спектральної щільності потужності випадкових сигналів морських навігаційних приладів.

Ключові слова: спектральна щільність потужності; випадковий сигнал; навігаційні прилади; маршрут руху.

ЛІТЕРАТУРА

1. Каретников В. В., Пашенко И. В., Соколов А. И., Кузнецов И. Г. К вопросу построения автоматизированной системы мониторинга параметров высокоточного навигационного поля. *Морская радиоэлектроника*. 2015. № 2 (52). С. 24–27.
2. Борисенко М. В., Герасимов С. В., Костенко О. І., Макачук Д. В. Development of optimum navigation information processing algorithm. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2018. № 3(32). С. 38–44.
3. Соловьев И. *Морская радиоэлектроника*. Санкт-Петербург: Политехника, 2003. 185 с.
4. Алешин Б. С., Веремченко К. К. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии. М.: Наука, 2006. 424 с.
5. Герасимов С., Шапран Ю., Стахова М. Measures of efficiency of dimensional control under technical state designation of radio-technical facilities. *Системи обробки інформації*. 2018. Вип. 1(152). С. 148–154. DOI: 10.30748/soi.2018.152.21.
6. Герасимов С. В., Шапран Ю. Є., Кірвас В. В. Розробка та дослідження методу розрахунку достовірності вимірювального контролю параметрів радіотехнічних систем морського транспорту. *Системи озброєння і військова техніка*. 2017. № 4 (52). С. 5–10.
7. Басов В. Г. Измерительные сигналы и функциональные устройства их обработки. Минск: БГУИР, 2012. 119 с.
8. Norman Friedman. The Naval Institute Guide to World Naval Weapon System. Naval Institute Press, 2006. 858 p.
9. Admiralty list of radio signals. Global maritime distress and safety system (GMDSS). Vol 5. NP 285. 2000. 338 p.
10. Qriffsiths B. E. Optimal control of jump-linear gaussian systems. *Int. J. of control*. Vol. 42. N. 4. 1985. P. 791–819.

Shtribec V., Vasylenko O., Vechurko O.

MODEL OF ESTIMATION OF SPECTRAL DENSITY OF POWER OF RISK SIGNALS OF MARINE NAVIGATION EQUIPMENT

It is shown that the purpose of maritime navigation devices is to provide reliable control over the current values of parameters that characterize the modes of the route of the water transport vehicle. The route of the vehicle in difficult meteorological conditions and in the night impossible without equipment, which determine and provide information to the navigator on the position of the means of inland transport in the route relative to the horizon, the direction of its movement, etc. At the spot displays of marine navigational devices, its safe operation is ensured by the safety of naval navigation. The main navigational devices and their purpose are shown. It is substantiated that in the study and measurement of the characteristics of random processes, two classical approaches are used: spectral and temporal. The advantages and disadvantages of these approaches are defined. It is noted that determination of the local estimation of the spectral density of the power of random variables in marine navigational devices is not used due to the complicated technical implementation of known calculation methods. In the known sea navigation devices an integral estimate of the spectral density of the power of random variables is determined. In the research the model of the estimation of the spectral density of the power of the random signals of marine navigational devices, optimized for the possibility of technical implementation and the required accuracy of the determination of navigational parameters during the movement of the vessel, was developed. The proposed model of the estimation of the spectral density of the power of the random signals of marine navigational devices allows to take into account the level of interference that is introduced in the definition of navigation parameters of the vessel during the movement. The use of automatic filters will increase the accuracy of obtaining navigational parameters by the ship's control system during movement. This will increase the safety of the movement and allow you to move along the optimal route according to the established course.

Keywords: spectral power density; random signal; navigational devices; route of movement.

Штрибець В. В., Василенко В. Н., Вечурко А. Н.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ МОРСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИБОРОВ

Показано, что назначением морских навигационных приборов является обеспечение надежного контроля за текущими значениями параметров, характеризующих режимы маршрута средства водного транспорта. Обосновано, что при исследовании и измерении характеристик случайных процессов используется два классических подхода: спектральный и временной. Определены преимущества и недостатки этих подходов. В исследовании разработана модель оценки спектральной плотности мощности случайных сигналов морских навигационных приборов, оптимальной по возможности технической реализации и требуемой точности определения навигационных параметров при движении судна. Предложена модель оценки спектральной плотности мощности случайных сигналов морских навигационных приборов.

Ключевые слова: спектральная плотность мощности; случайный сигнал; навигационные приборы; маршрут движения.

Стаття надійшла до редакції 12.10.2018 р.

Прийнято до друку 10.12.2018 р.