

ПРЕФІЛЬТРАЦІЯ ПОЛЯ ЕЛІПСА ПОХИБОК ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ РУХОМОГО ОБ'ЄКТА

С. Ю. Інфімовський, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.,
начальник відділу розслідування, обліку та профілактики
аварійних подій, старш. держ. інспектор
Держфлотінспекції України

Головна державна інспекція України з безпеки судноплавства, м. Одеса

Анотація. Розглянуто застосування спектрального методу для забезпечення високої точності розрахунку місцеположення рухомого об'єкта від кількості навігаційних реалізацій за даними контрольно-коригуючих станцій морської диференційної підсистеми супутникової системи навігації.

Ключові слова: навігаційні реалізації, префільтрація, регулярна спектральна сітка, еліпс похибок, місцеположення рухомого об'єкта.

Анотация. Рассмотрено применение спектрального метода для обеспечения высокой точности расчета местоположения подвижного объекта от количества навигационных реализаций по данным контрольно-корректирующих станций морской дифференциальной подсистемы спутниковой системы навигаций.

Ключевые слова: навигационные реализации, префильтрация, регулярная спектральная сетка, эллипс погрешностей, местоположение подвижного объекта.

Abstract. Application of a spectral method for provision of high accurate calculation of a moving object location from quantity of navigating realizations according to control-correcting stations of sea differential subsystem of Satellite Navigation System is considered.

Keywords: navigating realizations, a prefiltration, a regular spectral grid, errors ellipse, location of a moving object.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Одним з основних завдань навігаційного оплавування є дослідження точності визначення місцеположення рухомого об'єкта в реальному навігаційному полі морської поверхні. Тому знання значень похибок інтерполяції на відстані від центральної точки площі зони супутникової видимості до її крайньої межі, з урахуванням величини інтервалу кореляції — один з важливих напрямів дослідження навігаційного поля морської поверхні. На сьогодні при різноманітності зрос-

таючого парку апаратури користувачів супутникової інформації виникає потреба у підвищенні точності отриманих обсервацій місцеположення рухомого об'єкта в реальному навігаційному полі морської поверхні.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Огляд літературних джерел [1–5, 8, 11–13] і невирішені проблеми точності

визначення місцеположення рухомого об'єкта в реальному навігаційному полі морської поверхні потребують пошуку наукових шляхів побудови високоточного навігаційного поля морської поверхні на основі дослідження кількісних експериментів при різних значеннях початкових та граничних умов префільтрації поля еліпса похибок визначення місцеположення рухомого об'єкта за допомогою супутникових систем навігації (ССН).

Разом з тим проблеми застосування спектрального методу для забезпечення високої точності розрахунку місцеположення рухомого об'єкта від кількості навігаційних реалізацій за даними контрольно-корегуючих станцій морської диференційної підсистеми ССН на сьогодні залишаються актуальними.

МЕТОЮ СТАТТІ є дослідження застосування спектрального методу для забезпечення високої точності розрахунку місцеположення рухомого об'єкта від кількості навігаційних реалізацій за даними станцій морської диференційної підсистеми ССН та їх вплив на зміни значень похибок інтерполяції на відстані від центральної точки площі зони

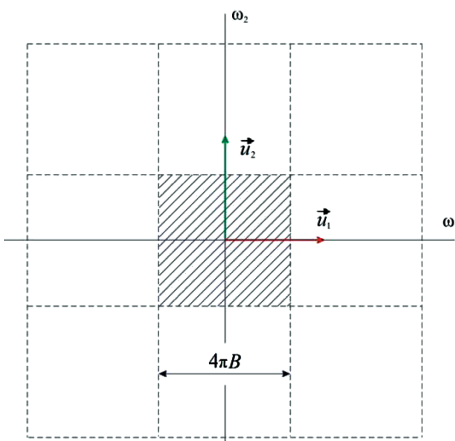


Рис. 1. Розташування основ другорядних спектрів на векторному базисі \vec{u}_1, \vec{u}_2 у просторі $(\vec{\omega})$

супутникової видимості до її краю, які мають певні величини інтервалу кореляції.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Зі статті [10] відомо, що квадратна сітка забезпечує відновлення поля із заданою (середньою за полем) похибкою $\varepsilon(\vec{x})$, при дещо більшій кількості вузлів, у порівнянні з ромбічною сіткою. Але вона більш зручна при наданні інформації у вигляді карти. Крок сітки визначається крайньою межею частоти спектра поля похибок обсервацій $S(\vec{x})$, тобто твірною квадрата, яка лежить в основі спектра у просторі $\vec{\omega}$.

На рис. 1 наведено розташування основ другорядних спектрів на векторному базисі \vec{u}_1, \vec{u}_2 у просторі $(\vec{\omega})$:

$$\vec{u}_{[l]} = l_1 \vec{u}_1 + l_2 \vec{u}_2;$$

$$l_1, l_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

якому відповідає найкраща сітка вимірів $\{\vec{v}_{[m]}\}$ (рис. 2).

З властивостей перетворення Фур'є, що віддзеркалює простір (\vec{x}) на простір $\vec{\omega}$, впливає зв'язок між площею базисної чарунки сітки вимірів Q і площею P ,

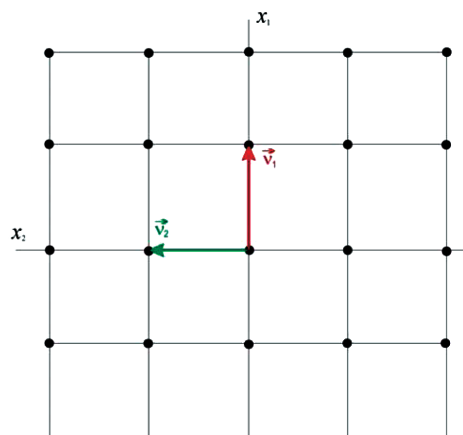


Рис. 2. Сітка вимірів $\{\vec{v}_{[m]}\}$

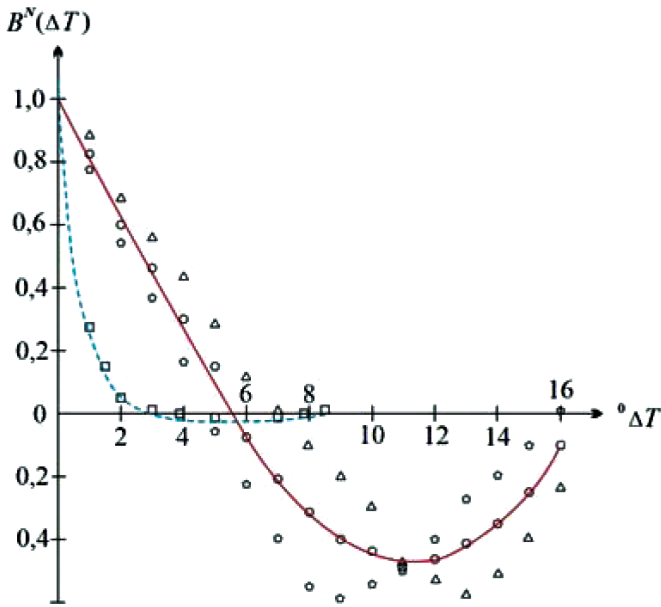


Рис. 3. Середні вибіркові коефіцієнти кореляції у широтному та довготному напрямках. Кореляційні функції: \triangle — у широтному напрямку; \circ — у довготному напрямку; \square — осереднена між широтним та довготним напрямком; \square — в ізотропному наближенні до поля нев'язок

яка пов'язана з відповідною чарункою спектральної сітки $\bar{u}_{[l]}$:

$$Q \cdot P = 4\pi^2. \quad (1)$$

Сторона квадрата (див. рис. 2) в основі спектра поля похибок обсервацій $S(\vec{x})$ повинна дорівнювати кроку регулярної спектральної сітки, тому з формули (1) неважко визначити найкращий крок сітки навігаційних вимірювань

$$a = \frac{\pi}{\omega_c} = \frac{\pi}{2\pi B} = \frac{1}{2B}, \quad (2)$$

де $\omega_c = |\bar{\omega}_c| = 2\pi B$ — половина сторони квадрата основи спектра.

Виконаємо оцінку ізотропності поля по відношенню до кореляційної функції $K_{ff}(\vec{x})$. Для цього побудуємо середні ви-

біркові коефіцієнти кореляції у широтному та довготному напрямках (рис. 3). З урахуванням їх довірчих інтервалів можна прийняти гіпотезу про ізотропність поля похибок обсервацій $f(\vec{x})$.

Для того щоб оцінити спектр поля похибок обсервацій, необхідно апроксимувати вибіркові осереднені коефіцієнти кореляції аналітичною залежністю

$$K(|\vec{x}|) = e^{-\alpha|\vec{x}|} \cos \beta_1 |\vec{x}|,$$

$$\alpha_1 = 10^{-4} \text{ км}^{-1}, \quad \beta_1 = 26 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-1},$$

яка на рис. 3 зображена безперервною лінією. Тоді твірну спектра поля похибок обсервацій $f(\vec{x})$ можна записати таким чином [6]:

$$\Phi_2(\bar{\omega}) = \frac{\alpha \sqrt{(\gamma^2 + \eta^2)^{3/2} + \gamma(\gamma^2 - 3\eta)} + \beta \sqrt{(\gamma^2 + \eta^2)^{3/2} - \gamma(\gamma^2 - 3\eta)}}{2\sqrt{2\pi}(\gamma + \eta)^{3/2}}$$

$$\gamma \equiv k^2 + \alpha^2 - \beta^2, \quad \eta \equiv 4\alpha^2\beta^2, \quad \omega = 2\pi|\vec{k}|.$$

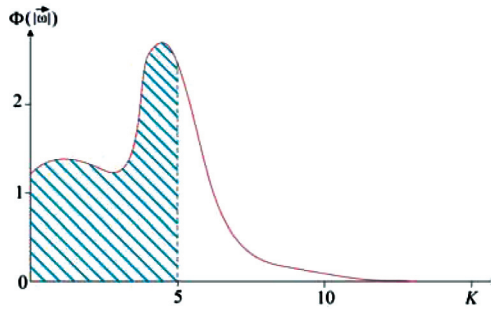


Рис. 4. Спектральна щільність випадкової складової поля похибок обсервацій

Аналізуючи вид спектральної щільності $\Phi_2(\vec{\omega})$, яку наведено на рис. 4, доцільно обрати верхню межу частоти $\omega_c = 2\pi b$, що визначає інформативну (з точки зору мети навігаційних досліджень) частину спектра від високочастотних шумів навігаційних реалізацій. У задачах контролю за станом супутникового навігаційного поля морської поверхні інформативна частина спектра, як правило, зосереджена в області «низьких частот» і відповідній до неї області малих хвильових чисел. Крім того, як уже було відзначено, в задачах динаміко-стохастичного моделювання процесів визначення місця рухомого об'єкта у навігаційному полі морської поверхні динамічна частина моделі неминуче описує згладжені поля похибок обсервацій, тобто поля, які відповідають області «малих» та «середніх» хвильових чисел. Додатковою інформацією для прийняття рішення про розподіл спектра на інформативну й «шумову» частини повинні бути відомості про спектральні характеристики похибок супутникових навігаційних вимірювань, перешкод у каналах передачі інформації та інших джерел похибок навігаційних вимірювань.

Прийmemo, що внаслідок високого рівня перешкод біля 30 % енергії поля $f(\vec{x})$ слід віднести до високочастотних похибок вимірювань.

Як видно з рис. 4, основа спектра поля похибок обсервацій $S(\vec{x})$ повинна

бути обмежена на хвильових числах $\omega_c = 0,165 \text{ 1/км}^{-1}$. Підставляючи це значення у формулу (2), знайдемо, що найбільш доречним кроком сітки, яка являє собою «корисну» площу зони супутникової видимості, є величина у лінійній мірі приблизно 333 км, або у градусній мірі порядку 3° .

Порівнюючи вирішення проблеми з результатами подібного роду, наведеними у роботі [9], виконаємо префільтрацію поля похибок обсервацій $f(\vec{x})$ у вузли знайденої сітки. Відмітимо, що значення поля похибок обсервацій $S_{[k]}(0)$ у точці відліку координат може бути знайдене за формулами

$$s(\vec{v}_{[m]}) = \int_{(\vec{x})} f(\vec{x}) \gamma(\vec{v}_{[m]} - \vec{x}) d\vec{x};$$

$$\hat{s}(\vec{x}) = \sum_{[m]} g(\vec{x} - \vec{v}_{[m]}) s(\vec{v}_{[m]}), \quad (3)$$

а через значення площі зони супутникової видимості у певній точці наступним чином:

$$\hat{S}_{[k]}(0) = f(\vec{x}_{[k]}) \int_{(\vec{x})} \gamma(0 - \vec{x}) g(\vec{x} - \vec{x}_{[k]}) d\vec{x}.$$

За теоремою Парсеваля воно може бути приведене до вигляду

$$\hat{S}_{[k]}(0) = \frac{f(\vec{x}_{[k]})}{(4\pi)^2} \int_{(\vec{\omega})} \Gamma(\vec{\omega}) G(\vec{\omega}) l^{-i\vec{\omega}\vec{x}_{[k]}} d\vec{\omega}, \quad (4)$$

де $\Gamma(\vec{\omega})$, $G(\vec{\omega})$ — перетворення Фур'є від вагових функцій $\gamma(\vec{\omega})$, $g(\vec{\omega})$.

У формулі (4) інтеграл являє собою оптимальне виваження, яке необхідно

застосувати до значення площі зони супутникової видимості $f(\bar{x}_{[k]})$, щоб оцінити його внесок у величину поля похибок обсервацій $S(\bar{x})$ у точці відліку координат. Виходячи з умови репрезентативності значень $S(0)$ [9], застосуємо умову виконання співвідношень

$$\Gamma(\bar{\omega}) = \begin{cases} 1, & |\bar{\omega}| < \omega_c; \\ 0, & |\bar{\omega}| \geq \omega_c; \end{cases}$$

$$G(\bar{\omega}) = \begin{cases} \frac{\sqrt{3}a^2}{2}, & |\bar{\omega}| < \omega_c; \\ 0, & |\bar{\omega}| \geq \omega_c. \end{cases}$$

Застосовуючи формули (3) та (4), можна отримати кінцевий вираз для значень $S(\bar{v}_{[m]})$ як результату площі зони супутникової видимості:

$$S(\bar{v}_{[m]}) = \sum_{[k]} \left[f(\bar{x}_{[k]}) \frac{\prod_{i=1}^2 \frac{\sin 2\pi B |\bar{x}_i|}{2\pi B |\bar{x}_i|}}{a^2} \right]$$

Наведена формула профільтрації легко реалізується на ПЕОМ у вузлах триградусної квадратної сітки. Більш докладну карту поля похибок обсервацій $S(\bar{x})$ можна побудувати шляхом оптимальної інтерполяції величин $S(\bar{x}_{[m]})$ у вільно обрані точки навігаційного поля морської поверхні \bar{x} :

$$\hat{S}(\bar{x}) = \sum_{[k]} g(\bar{x} - \bar{v}_{[k]}) s(\bar{v}_{[k]});$$

$$g(x_1, x_2) = \frac{\sin 2\pi B x_1}{2\pi B x_1} \cdot \frac{\sin 2\pi B x_2}{2\pi B x_2}.$$

Відзначимо, що використане допущення про необмеженість площі зони супутникової видимості на практиці призводить до помітних похибок при побудові карт випадкових полів оцінки точності визначення місця рухомого об'єкта у навігаційному полі морської поверхні. Для оцінки впливу меж області навігаційних вимірювань на точність спектральних алгоритмів профільтрації та відновлення полів було проведено спеціальні числові експерименти, які підтвердили, що спектральний метод інтерполяції забезпечує високу точність розрахунку при обробці вже при більше ніж десяти навігаційних реалізаціях, що використовуються при інтерполяції.

ВИСНОВКИ

1. Спектральний метод забезпечує високу точність розрахунку вже при десяти реалізаціях за даними контрольно-корегуючих станцій морської диференційної підсистеми супутникової системи навігації.

2. Похибки інтерполяції набувають істотних значень тільки на відстанях від краю площі зони супутникової видимості, які мають величини інтервалу кореляції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Инструкция по навигационному оборудованию (ИНО-2000). — Адм. 9106 [Текст]. — С.Пб. : ГУНиО МО, 2001. — 328 с.
- [2] **Машкович, С. А.** Численные эксперименты по четырехмерному объективному анализу на основе спектральной прогностической модели [Текст] / С. А. Машкович, И. Г. Вейль // Метеорология и гидрология. — 1972. — № 3. — С. 3–10.
- [3] Методики вероятностных расчетов при решении навигационных задач на кораблях и судах ВМФ (МВР-96). — Адм. № 9638 [Текст]. — С.Пб. : ГУНиО МО, 1999. — 224 с.

- [4] Методика по использованию спутниковых навигационных систем при производстве гидрографических работ (дополнение к Правилам гидрографической службы № 4) [Текст]. — С.Пб. : ГУНиО МО, 2002. — 25 с.
- [5] **Нелепо, Б. А.** Системные принципы анализа наблюдений в океане [Текст] / Б. А. Нелепо, И. Е. Тимченко. — К. : Наук. думка, 1977. — 222 с.
- [6] **Тимченко, И. Е.** Рационализация съемки пространственно-временных полей океана на полигонах [Текст] / И. Е. Тимченко // Проблемы экспериментальных исследований в океане. — 1975. — Вып. 27. — С. 47–53.
- [7] **Petersen, D. P.** A study of objective analysis techniques for meteorological fields [Text] / D. P. Petersen, T. N. Truske. — Albuquerque, 1969. — 60 p.
- [8] **Petersen, D. P.** On representative observations [Text] / D. P. Petersen, D. Middleton // Tellus. — 1963. — nr 15. — P. 387–405.
- [9] **Petersen, D. P.** On the concept and implementation of sequential analysis for linear random fields [Text] / D. P. Petersen // Tellus. — 1968. — nr 20. — P. 78–93.
- [10] **Petersen, D. P.** Reconstruction of multi-dimensional stochastic fields from discrete measurement of amplitude and gradient [Text] / D. P. Petersen, D. Middleton // Inform. And Contr. — 1964. — nr 7. — P. 62–84.
- [11] **Petersen, D. P.** Sampling and reconstruction of wave-number limited functions in N-dimensional Euclidean spaces [Text] / D. P. Petersen, D. Middleton // Inform. And Contr. — 1962. — nr 5. — P. 81–104.
- [12] **Petersen, D. P.** Smoothing and differential operators for digital processing of sampled field-data [Text] / D. P. Petersen // NEREM 63 Record, Lewis Winner. — 1963. — P. 153–172.
- [13] **Petersen, D. P.** Static and dynamic constraints on the estimations of space-time covariance and wave-number-frequency spectral fields [Text] / D. P. Petersen // J. Atmos. Sci. — 1973. — nr 30. — P. 141–152.