

Розглядаються процеси, що відбуваються в керованому динаміко-стохастичному навігаційному полі морської поверхні на основі моделювання просторових випадкових полів у трьохмірному просторі похибок обсервацій для розрахунку карт полів похибок обсервацій в інтересах прогнозування точності супутникового навігаційного забезпечення безпеки мореплавства

Ключові слова: кероване динаміко-стохастичне навігаційне поле, похибка обсервації, безпека мореплавства

Рассматриваются процессы, происходящие в управляемом динамико-стохастическом навигационном поле морской поверхности на основе моделирования пространственных случайных полей в трёхмерном пространстве ошибок обсерваций для расчёта карт полей ошибок обсерваций в интересах прогнозирования точности спутникового навигационного обеспечения безопасности мореплавания

Ключевые слова: динамико-стохастическое навигационное поле, ошибка обсервации, безопасность мореплавания

The processes occurring in the operated dynamics-stochastic navigating floor of a sea surface on the basis of modeling of spatial casual fields in three-dimensional space of errors of observations for calculation of maps of fields of errors of observations in interests of forecasting of accuracy of a satellite navigating safety of navigation are considered

Keywords: a dynamics-stochastic navigating field, an error of an observation, safety of navigation

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ПРОСТОРОВИХ ВИПАДКОВИХ ПОЛЯХ ПОХИБОК ОБСЕРВАЦІЙ МЕТОДОМ ОПТИМАЛЬНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

С. Ю. Інфімовський

Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Начальник відділу - старший державний інспектор

Державна морська інспекція з безпеки судноплавства

Держфлотінспекції України

вул. Ланжеронівська, 1, м. Одеса, 65026

Контактний тел.: (048)785-44-72, 050-360-82-41

E-mail: Slnfimovsky_GGMI@mail.ru

Проблема побудови динаміко-стохастичних моделей пов'язана з обранням оптимальної процедури використання інформації про випадкові складові. Відповідно до загальної схеми динаміко-стохастичного підходу, ця процедура повинна бути заснована на послідовному співставленні навігаційних реалізацій полів похибок обсервацій з їх розрахунковими значеннями, які визначаються моделлю на моменти надходження навігаційних реалізацій. Вибір теоретичної частини динаміко-стохастичної моделі еквівалентний розподіленню реальних полів похибок обсервацій навігаційного поля морської поверхні на детерміновані та випадкові складові.

Використовуючи погляди щодо моделювання процесів просторових випадкових полів похибок обсервацій у роботах А. Балакришнана [1], Ж. Ліонсу [5], Р. Калману [6], І. Сакави [8], С. Цафестасу [9] та ґрун-

туючись на теорії управління дослідимо оптимальні методи фільтрації при використанні текучої навігаційної інформації про поля похибок обсервацій щодо створення теоретичних моделей стохастичних систем з розподіленими параметрами у динаміко-стохастичних моделях навігаційного поля морської поверхні.

Процес безперервного оцінювання оптимальної процедури навігаційної інформації моделі шляхом використання інформації про зміни що в ній відбуваються. З цією метою поряд зі змінами структури моделі може змінюватися й сам метод або алгоритм розрахунків [9-13].

Потребує дослідження вплив фактичної не синхронності даних навігаційних реалізацій про просторові поля похибок обсервацій місця у навігаційному полі морської поверхні. Врахування не синхронності або послаблення її впливу шляхом введення відповід-

них поправок у навігаційні реалізації повинен проводитися до проведення розрахунків.

Метою даної статті є дослідження просторових полів похибок обсервацій навігаційного поля морської поверхні й розрахунок мап у трьохмірному просторі $f(x)$, $\bar{x} = (x_1, x_2, x_3)$ та запропонування практичних прийомів об'єктивного аналізу полів похибок навігаційних реалізацій для побудови мап полів похибок обсервацій у навігаційному полі морської поверхні за даними навігаційних реалізацій.

Дослідимо просторові випадкові поля похибок обсервацій навігаційного поля морської поверхні, котрі являють собою миттєві розподілення параметрів й характеризують ефективність навігаційного забезпечення у просторі. Зазвичай, для наочності, їх надають у вигляді мап, які є сенс будувати для певних районів морської поверхні.

Найбільш зручною моделлю для просторових полів більшості навігаційних параметрів є випадкова функція координат. Застосування такої моделі дозволяє спиратися на наукові здобутки О.М. Колмогорова [4], Л.С. Гандіна [3], Д. Петерсена й Д. Міддлтона [7] та інших авторів для рішення задачі розрахунку просторових полів похибок обсервацій навігаційного поля морської поверхні по дискретним навігаційним вимірюванням, які виконані у вільно обраних точках поля \bar{x}_k .

Використання подібної моделі реальних полів похибок обсервацій навігаційного поля морської поверхні стає можливим, якщо попередньо виділити так звану детерміновану складову навігаційного поля морської поверхні. В цьому випадку будемо рахувати, що значення поля не мають закономірних змін у просторі та часі й можуть бути описані випадковими функціями.

Припустимо, що у якості моделі поля використана однорідна та ізотропна випадкова функція координат $f(\bar{x})$, яка має нульове середнє значення та кореляційну функцію $K(\bar{x})$, тоді формулами оптимальної інтерполяції можна виразити значення поля $f(\bar{x})$ у вільно обраній точці через відомі величини $\hat{f}(\bar{x}_k)$ в точках навігаційних реалізацій $\{\bar{x}_k\}$

$$\hat{f}(\bar{x}) = \sum_{i=1}^n g(\bar{x}, \bar{x}_i) f(\bar{x}_i) \quad (1)$$

В цій лінійній комбінації вагові коефіцієнти $g(\bar{x}, \bar{x}_i)$ повинні бути підбрані таким чином, щоб середньоквадратична похибка відновлення поля

$$\epsilon(\bar{x}) = E \left\{ \left[f(\bar{x}) - \hat{f}(\bar{x}) \right]^2 \right\} \quad (2)$$

прийняла мінімальне значення. Для цього потрібно вирішити систему рівнянь О.М. Колмогорова [4]

$$K(\bar{x}, \bar{x}_l) = \sum_{m=1}^n g(\bar{x}, \bar{x}_m) K(\bar{x}_l, \bar{x}_m) \quad (3)$$

$l = 1, 2, \dots, n$

Формули (1) та (3) являють собою так званий кореляційний алгоритм об'єктивного аналізу або оптимальної інтерполяції поля похибок обсервацій [3]. Результати інтерполяції забезпечують відновлення випадкового поля з максимально можливою точністю.

Інакше кажучи, навігаційна інформація, яка міститься у вимірах навігаційного поля морської поверхні, використовується найкращим способом.

Застосування алгоритму оптимальної фільтрації до дослідження полів похибок навігаційних реалізацій навігаційного поля морської поверхні пов'язано з низкою практичних труднощів. Перш за все за спостереженнями навігаційного поля морської поверхні необхідно оцінити адекватність йому однорідної та ізотропної моделі, на якій засновано алгоритм. Це означає, що повинні бути розроблені прості та зручні на практиці методи перевірки даних на однорідність та ізотропність. Оскільки більшість просторових полів похибок обсервацій відрізняється від однорідних та ізотропних моделей у тому чи іншому ступені, необхідні практичні способи врахування або усунення цього явища.

Одним з найбільш простих способів усунення нестационарності просторових полів похибок обсервацій у навігаційному полі морської поверхні є розподіл поля на детерміновану та випадкову складові. Під детермінованою складовою розуміється визначене тим чи іншим способом поле осереднених значень (норм), яке може бути отримано з вихідної вибірки шляхом згладжування її за простором. Випадковою складовою у цьому випадку є поле відхилень від норм

$$f'(\bar{x}) = f(\bar{x}) - E \{ f(\bar{x}) \} \quad (4)$$

Зручний розподіл вихідного поля на детерміновану та випадкову складову слід вважати одним з важливих моментів моделювання.

Для врахування анізотропії поля, наприклад, за кореляційною функцією, може бути введений так званий еліпс кореляцій, що враховує зміни параметрів кореляційної функції при обертанні її навколо точки відрахування координат. Цього результату можна досягти шляхом лінійної деформації у напрямку максимальної (мінімальної) анізотропії.

Окремим питанням, що потребує дослідження є вплив фактичної несинхронності даних навігаційних реалізацій про просторові поля похибок обсервацій місця у навігаційному полі морської поверхні. Врахування несинхронності або послаблення її впливу шляхом введення відповідних поправок у навігаційні реалізації повинен проводитися до проведення розрахунків.

Розробка практичних прийомів об'єктивного аналізу полів похибок навігаційних реалізацій складає головну задачу побудови мап полів похибок обсервацій у навігаційному полі морської поверхні за даними навігаційних реалізацій. Об'єктивний аналіз просторових полів є також важливим складовим елементом задачі оптимального прогнозування просторових полів похибок обсервацій навігаційного поля морської поверхні.

Практичне застосування об'єктивного аналізу пов'язано, крім того, з труднощами обчислювального характеру. Відомо, що при рішенні на ПЕОМ систем рівнянь високого порядку висвітлюється обчислювальна нестійкість, що потребує використання ПЕОМ зі збільшеною оперативною пам'яттю та потужним процесором. Тому являє інтерес перехід від **кореляційного до спектрального алгоритму оптимальної**

інтерполяції. Такий перехід стає можливим, коли вимірювання навігаційного поля виконані у вузлах регулярної гексагональної сітки, яка покриває акваторію навігаційного поля морської поверхні. Виконавши перетворення по Ж. Фур'є формул оптимальної інтерполяції (1) – (3), можна визначити загальну для усього поля вагову функцію інтерполяції $g(\bar{x})$. Наприклад, якщо вимірювання поля виконані в вузлах пів-градусної ромбічної сітки, формула оптимальної інтерполяції поля має вид [7]

$$\hat{f}(\bar{x}) = \sum_{k=1}^n \frac{J_1(|\bar{\omega}_c| \rho_k)}{\pi \sqrt{3} |\bar{\omega}_c| \rho_k} f(\bar{x}_k), \quad (5)$$

$$\rho_k = |\bar{x} - \bar{x}_k|$$

та легко реалізується на ПЕОМ.

Обчислювальні переваги спектрального алгоритму інтерполяції настільки зрозумілі, що розробка його варіантів для різних сіток навігаційних реалізацій повинна стати однією з практичних задач обробки навігаційних реалізацій. Ці обставини заслуговують більшої уваги ще й тому, що у навігації на відзнаку, наприклад, від метеорології, стаціонарної мережі точок для виміру полів похибок обсервацій не має. Знімання полів відбувається епізодично в окремих місцях навігаційного поля. Але супутникова навігація дозволяє створити таку стаціонарну мережу для виміру полів похибок обсервацій, за допомогою якої завчасно передбачаються точки навігаційних реалізацій в вузлах вірної сітки.

Таким чином, практичне застосування спектрального алгоритму інтерполяції повинно бути обґрунтовано. Перш за все необхідна експериментальна перевірка впливу меж області вимірювань на точність інтерполяції, оскільки формули спектрального алгоритму вводяться в передбаченні про безмежну сітку вимірювань на площині. Потребує дослідження питання про вплив кількості обсервацій на точність розрахунку полів похибок обсервацій спектральним методом.

Наприкінці, у практичних ситуаціях судноводії зазвичай мають справу з просторовими розподілами реалізації декількох полів похибок обсервацій навігаційного поля морської поверхні одночасно. Ці поля зазвичай пов'язані між собою детермінованими або імовірнісними залежностями. Отже, навігаційні реалізації кожного з цих полів похибок обсервацій містять в собі навігаційну інформацію про інші поля, яку доцільно використовувати при побудові мап кожного з полів похибок обсервацій. Одночасне використання інформації про різні поля при інтерполяції кожного з них [2] отримало назву статистичного погодження полів похибок обсервацій навігаційного поля морської поверхні.

Завдання статистичного узгодження може розглядатися як **узгаальнення задачі оптимальної інтерполяції.** Оцінки узгоджених величин кожного з полів відшуковуються у вигляді лінійної комбінації

$$\hat{f}_1(\bar{x}) = \sum_k g_1(\bar{x}, \bar{x}_k) f_1(\bar{x}_k) + \sum_m g_2(\bar{x}, \bar{x}_m) f_2(\bar{x}_m). \quad (6)$$

Вагові коефіцієнти визначаються з системи рівнянь

$$K_1(\bar{X}, \bar{X}_k) = \sum_1 g_1(\bar{x}, \bar{x}_1) K_1(\bar{x}_k, \bar{x}_1) + \sum_m g_2(\bar{x}, \bar{x}_m) K_{12}(\bar{x}_k, \bar{x}_m),$$

$$K_{12}(\bar{X}_1, \bar{X}_m) = \sum_n g_2(\bar{x}, \bar{x}_n) K_2(\bar{x}_m, \bar{x}_n) + \sum_1 g_1(\bar{x}, \bar{x}_1) K_{12}(\bar{x}_k, \bar{x}_m). \quad (7)$$

Ця задача більш складна, ніж задача оптимальної інтерполяції, й до цього часу у галузевій літературі існують лише поодинокі спроби її вирішення. Разом з тим по відношенню до кореляційного алгоритму оптимального узгодження рівняння (6) та (7) також справедливі, щодо труднощів практичної реалізації методу оптимальної інтерполяції.

Отже, головною перевагою кореляційного алгоритму оптимальної інтерполяції є найвища, у порівнянні з іншими методами, точність інтерполяції у тих випадках, коли мережа навігаційних реалізацій виявляється відносно рідкою.

Література

1. Балакришнан А. Введение в теорию оптимизации в гильбертовом пространстве. – М.: Мир, 1974. – 258 с.
2. Беляев В.И., Тимченко И.Е., Ярин В.Д. Статистическое согласование гидрофизических полей. – Мор. гидрофиз. исслед., 1970, № 1, С. 81 – 97.
3. Гандин Л.С., Каган В.Л. Статистические методы интерпретации метеорологических данных. – Л., Гидрометеоиздат, 1976. – 280 с.
4. Колмогоров А.Н. Основные понятия теории вероятностей. – М.: Наука, 1974. – 82 с.
5. Лионс Ж. Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями в частных производных. М., Мир, 1974. – 287 с.
6. KALMAN R.E. On partial realization of linear input/output map. – Guillemin Anniv. Vol., Holt, 1970, p. 211 – 234.
7. PETERSEN D.P., MIDDLETON D. Sampling and reconstruction of wave-number limited functions in N-dimensional Euclidean spaces. – Inform. and Contr., 1962, 5, P. 81 – 104.
8. SAKAWA Y. Optimal filtering in linear distributed-parameter systems. – Int. J. Control, 1972, 16, № 1, p. 115 – 127.
9. TZAFESTAS S.G. State-observer design for linear sequential machines. – Int. J. Systems Sci., 1973, 4, № 1, P. 33 – 41.