

Розглядається можливість застосування методу засвоєння асинхронних навігаційних реалізацій при обсерваціях з метою отримання мапи просторового розподілення щільності розподілення ймовірностей та характеристик еліпсу похибок місцеположення рухомого об'єкту

Ключові слова: асинхронні дані, навігаційні реалізації, похибка обсервації, безпека мореплавства

Рассматривается возможность применения метода усвоения асинхронных навигационных реализаций при обсервациях с целью получения карты пространственного распределения плотности распределения вероятности и характеристик эллипса ошибок местоположения подвижного объекта

Ключевые слова: асинхронные данные, навигационные реализации, ошибка обсервации, безопасность мореплавания

The possibility of applying the method of assimilation of asynchronous implementations of navigation for observation in order to obtain maps of the spatial distribution of the probability density and the characteristics of the location error ellipse of a moving object

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

РОЗРОБКА МЕТОДУ ЗАСВОЄННЯ АСИНХРОННИХ ДАНИХ НАВІГАЦІЙНИХ РЕАЛІЗАЦІЙ

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

Одним з основних завдань навігаційного оплавування є відтворення за допомогою ПЕОМ динаміки реального навігаційного поля морської поверхні. З методологічної точки зору здатність відтворити реальні динамічні процеси з певним рівнем похибки означає, що моделі динаміки навігаційного поля морської поверхні, які використовуються та методи обробки навігаційних реалізацій у певній мірі достовірні.

Високий рівень адекватності при віддзеркаленні навіть окремих характеристик динамічних процесів дає змогу провести фактичний аналіз явищ у навігаційному полі морської поверхні й вивчити природу цих явищ.

Тому розробка методу засвоєння асинхронних навігаційних реалізацій при обсерваціях з метою отримання мапи просторового розподілення щільності розподілення ймовірностей та характеристик еліпсу похибок місцеположення рухомого об'єкту в інтересах підвищення точності судноводіння являє собою один з перспективних напрямів досліджень у супутниковому навігаційному полі морської поверхні.

Фізико-математична модель системи полів похибок обсервацій по суті є деяким кінцево-різницеvim алгоритмом, що реалізується на ПЕОМ, а рішення прогностичних задач зводиться до кількісних експериментів на моделях при різних початкових та граничних умовах. З цієї точки зору прогноз точності навігаційного поля морської поверхні є відшукуванням розподілення щільності розподілення ймовірностей та характеристик еліпсу похибок місцеположення рухомого об'єкту при фіксованих початкових умовах.

У теперішній час, при різноманітті зростаючого парку апаратури користувачів супутникової інформації, виникає потреба у приведенні отриманих обсервацій за допомогою супутникових систем навігації (далі – ССН), що належать різним державам які використовують власні еліпсоїди та системи координат до системи координат та відліку часу, які прийняті в Україні.

Ця проблема пов'язана з використанням спеціальних навігаційних карт, де наведені табличні поправки, з певних причин, не завжди коректні. Подібні обставини визначають необхідність знати, перш за все, зв'язок між різними системами координат.

Разом з тим проблеми засвоєння асинхронних навігаційних реалізацій при обсерваціях з метою отримання мапи просторового розподілення щільності розподілення ймовірностей та характеристик еліпсу похибок місцеположення рухомого об'єкту складні й ще далекі від розв'язання. У спеціальній літературі з подібним вирішенням проблем існує незначна кількість робіт, які містять результати застосування засвоєння асинхронних реалізацій у геофізичних полях [3, 6 – 12].

Сформулюємо мету завдання – отримання мапи просторового розподілення щільності розподілення ймовірностей та характеристик еліпсу похибок місцеположення рухомого об'єкту на момент T , використовуючи динаміко-стохастичну модель полів похибок обсервацій за умови просторово-часового засвоєння навігаційної інформації.

Припустимо, у момент часу t_m у певному латеральному районі навігаційного поля морської поверхні відомі значення поля щільності розподілення ймовірностей та характеристик еліпсу похибок місцеположення рухомого об'єкту. Розташування точок навігаційних вимірювань у латеральному районі може бути довільним.

При вирішенні поставленої задачі будемо використовувати для прогнозу поля щільності розподілення ймовірностей в області мезомасштабів теоретичну модель, яка застосовувалася для прогнозу морських течій [9]. За допомогою цієї моделі можливо розрахувати прогностичні значення щільності розподілення ймовірностей, характеристики еліпсу похибок з деяким часовим кроком Δt у вузлах сітчаного уявлення латеральної зони морської поверхні, при чому $\Delta t \geq \Delta t_m$. Межа латеральної зони морської поверхні окреслює її площу й апроксимована замкнутою ломаною, ланцюжки якої паралельні вісям координат. Кроки в горизонтальній площині $\Delta x = \Delta y$, по вертикалі Δz . При цьому вважається відомим початкове просторове розподілення щільності розподілення ймовірностей та характеристики еліпсу похибок місцеположення рухомого об'єкту.

Для знаходження значень рівня морської поверхні ζ та щільності розподілення ймовірностей місцеположення рухомого об'єкту, засновуючись на рівняннях руху та щільності розподілу ймовірностей при використанні супутникових навігаційних апаратів різних ССН будемо кількісно вирішувати рівняння

$$\begin{aligned} & \frac{h}{f} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \zeta + \gamma \Delta \zeta + J(h, \zeta) + \frac{h\beta}{f} \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \\ & = \frac{\gamma'}{P_0 g} \Delta P_a - \frac{\beta \gamma'}{P_0 g} \left(\frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\partial P_a}{\partial y} \right) - \\ & - \frac{1}{f P_0} \int_0^h (h - z_0) \frac{\partial}{\partial t} \Delta P' dz - \frac{\gamma}{P_0} \int_0^h \Delta P' dz - \\ & - \frac{1}{P_0} \int_0^h J(h, P') dz - \frac{\beta}{f P_0} \int_0^h (h - z) \frac{\partial P'}{\partial x} \Delta P' dz; \end{aligned} \quad (1)$$

та

$$L_{x,y,z} = \chi \frac{\partial^2}{\partial z^2} + A \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) - u \frac{\partial}{\partial x} - v \frac{\partial}{\partial y} - \omega \frac{\partial}{\partial z}, \quad (2)$$

де u, v, ω – фіксовані на кожному часовому кроці.

Для визначення перевищення рівня поверхні розрахункового еліпсоїду над рівнем морської поверхні на межі латерального району морської поверхні для ζ отримуємо граничні умови для чого використовуємо прості співвідношення по типу крайової задачі А. Пуанкаре

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{\gamma}{h} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial y} \right) = \frac{f}{gh} S_y - \frac{1}{\beta h} \int_0^h (h - z_0) \frac{\partial P'}{\partial x} dz + \\ & + \frac{\gamma}{P_0 h} \left(\int_0^h \frac{\partial P'}{\partial x} dz + \int_0^h \frac{\partial P'}{\partial y} dz \right) - \frac{\gamma}{P_0 gh} \left(\frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\partial P_a}{\partial y} \right); \end{aligned} \quad (3)$$

на межі, паралельній вісі ординат,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\gamma}{h} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{\partial \zeta}{\partial x} \right) = -\frac{f}{gh} S_x - \frac{1}{P_0 h} \int_0^h (h - z_0) \frac{\partial P'}{\partial y} dz + \\ & + \frac{\gamma}{P_0 h} \left(\int_0^h \frac{\partial P'}{\partial y} dz + \int_0^h \frac{\partial P'}{\partial x} dz \right) + \frac{\gamma}{P_0 gh} \left(\frac{\partial P_a}{\partial x} - \frac{\partial P_a}{\partial y} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

де J – оператор Якобі;

$\beta = \frac{\partial f}{\partial y}$, які дорівнюють нулю.

Складові швидкості відносного переміщення рухомого об'єкту розраховуються через градієнти рівня та щільності розподілення ймовірностей місцеположення рухомого об'єкту по формулах

$$\begin{aligned} u &= \frac{g}{l} \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{g}{P_0 f_0} \int_0^z \frac{\partial P'}{\partial y} d\xi + \\ & + \frac{1}{P_0 f} \sqrt{\frac{v'}{v}} \left(-\frac{\partial P_a}{\partial y} \cos \alpha z + \frac{\partial P_a}{\partial x} \sin \alpha z \right) e^{-\alpha z}; \\ v &= \frac{g}{l} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g}{P_0 f_0} \int_0^z \frac{\partial P'}{\partial x} d\xi + \\ & + \frac{1}{P_0 f} \sqrt{\frac{v'}{v}} \left(\frac{\partial P_a}{\partial x} \cos \alpha z + \frac{\partial P_a}{\partial y} \sin \alpha z \right) e^{-\alpha z}; \\ \omega &= \frac{g\beta}{f^2} z \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g\beta}{P_0 f^2} \int_0^z (z - \xi) \frac{\partial P'}{\partial x} d\xi - \\ & - \frac{1}{2P_0 f \alpha'} \Delta P_a [1 - (\sin \alpha z + \cos \alpha z) e^{-\alpha z}] + \\ & + \frac{\beta}{2P_0 f^2 \alpha'} \left[\frac{3}{2} - \frac{3}{2} (\cos \alpha z - \sin \alpha z) e^{-\alpha z} - \alpha z \cos \alpha z e^{-\alpha z} \right] \frac{\partial P_a}{\partial x} + \\ & + \frac{\beta}{2P_0 f^2 \alpha'} \left[\frac{3}{2} - \frac{3}{2} (\cos \alpha z - \sin \alpha z) e^{-\alpha z} - \alpha z \cos \alpha z e^{-\alpha z} \right] \frac{\partial P_a}{\partial y}, \end{aligned} \quad (5)$$

де u, v, ω – складові швидкості відносного переміщення рухомого об'єкту по вісям ox, oy, oz (вісь ox направлена на схід, вісь oy – на північ, вісь oz – вертикально вниз);

- ϕ – географічна широта місця;
- g – прискорення сили тяжіння;
- Δ – плоский оператор Лапласу;
- I – оператор Якобі;

v – коефіцієнт турбулентного обміну перевищень різних еліпсоїдів, які застосовуються у ССН, до швидкості по вертикалі Z ,

$f = 2\omega \sin \phi$ – параметр Г. Коріолісу,

$h = h(x, y)$ – перевищення висоти поверхні геоїду над морською поверхнею;

$$\xi = \zeta^* + \frac{P_a}{\rho_0 g} \quad - \text{приведена рівнява поверхня};$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{f}{2v}}; \quad \alpha' = \sqrt{\frac{f}{2v'}}; \quad \beta = \partial f / \partial y.$$

Оскільки диференційне рівняння (1) лінійне, надамо його рішення у виді суми $\zeta = \bar{\zeta} + \zeta'$. Для визначення $\bar{\zeta}$ у передбаченні, що аномалією щільності можна знехтувати, а для визначення ζ' – динамічної поправки – отримаємо

$$\frac{h}{f} \frac{\partial}{\partial t} \Delta \zeta' + \frac{1}{2\alpha} \Delta \zeta' + J(h, \zeta') + \frac{h\beta}{f} \frac{\partial \zeta'}{\partial x} = \frac{1}{2P_0 g \alpha'} \Delta P_a -$$

$$- \frac{\beta}{2P_0 g f \alpha'} \left(\frac{\partial P_a}{\partial x} + \frac{\partial P_a}{\partial y} \right) + \frac{1}{f P_0} \int_0^h z \frac{\partial}{\partial t} \Delta P' dz + \frac{\beta}{f P_0} \int_0^h z \frac{\partial P'}{\partial x} dz \quad (6)$$

В подальшому у цьому рівнянні локальними похідними типу $\frac{\partial F}{\partial t}$ знехтуємо.

Рівняння (1) та (5) є у кінцево-різницевому виді з використанням неявної схеми, яка має другий порядок точності по просторовим координатам й перший порядок точності за часом [6, 8, 9].

В момент прогнозу

$$t_1 = t_0 + l \Delta t, \quad l = \left[\frac{t_m - t_0}{\Delta t} \right] + 1, \quad \text{де } [\cdot] -$$

ціла частина числа 1, виконується визначення неув'язок прогнозу у точках навігаційних вимірів для наступного засвоєння навігаційної інформації, яка надійшла у момент T_k й корегування прогностичних значень.

У якості початкового поля для прогностичної моделі пропонується поле щільності розподілення ймовірностей місцеположення рухомого об'єкту, що отримане у кожній точці обсервації по z методом об'єктивного аналізу [1 - 3] у передбаченні синхронності усіх проведених навігаційних вимірювань. Значення щільності у кожному вузлі сітчаного латеральної зони морської поверхні P_c визначається з умови мінімуму середнього квадрату похибки інтерполяції, яка виконана по n вимірам, які потрапили до кола просторової кореляції вузла "с",

$$P_c = \sum_{i=1}^n q_i P_i \quad (7)$$

де Q_n – вагові множники n -го навігаційного вимірювання, яке є рішенням системи n лінійних алгебраїчних рівнянь

$$\sum_{j=1}^n q_j \mu_{ij} + q_i \eta = \mu_{ci},$$

$$(i = 1, 2, \dots, n)$$

де η – міра похибки навігаційних вимірювань для усіх n обсервацій;

μ_{ni}, μ_{ci} – коефіцієнти просторової нормованої кореляційної функції між обсерваціями кола кореляції й вузлом сітки та тими ж обсерваціями.

Значення останньої розраховуються за відхиленнями виміряних та розрахованих значень щільності розподілення ймовірностей місцеположення рухомого об'єкту від середнього

$$\mu_s(r) = \frac{\frac{1}{n_s} \sum_s (P_n - \bar{P}_n)(P_p - \bar{P}_p)}{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (P_m - \bar{P}_m)^2}, \quad (9)$$

де n_s – кількість пар здобутків $(P_n - \bar{P}_n)(P_p - \bar{P}_p)$, які потрапили до S - градацій відстаней r між n -й та p -й обсерваціями.

Слід відзначити, що при обрахуванні відстаней необхідно здійснювати перерахунок координат з урахуванням широти місця.

Середнє значення \bar{P} у кожній точці t визначається за методом найменших квадратів, як функція географічних координат (ϕ_m, λ_m)

$$\bar{P}_m = a + b\lambda_m + c\phi_m. \quad (10)$$

Похибка створення поля похибок обсервацій по відношенню до його дисперсії має наступний вираз

$$\epsilon_c = 1 - \sum_{i=1}^n q_i \mu_{ci}. \quad (11)$$

Результати чотирьохмірного аналізу полів похибок обсервацій у реальних умовах приводять до висновку, що метод оптимальної інтерполяції відхилень значень навігаційних спостережень від прогностичних дозволяє значно підвищити точність створення мапи поля похибок обсервацій [1, 5].

Засвоєння інформації передбачається проводити дискретно (порціями), оскільки для здійснення "розпорошення" неув'язок прогнозу по сітчаній області методом оптимальної інтерполяції необхідна вибірка, достатня для отримання переконливих оцінок просторових статистичних характеристик.

Весь період навігаційних спостережень T розбивається на часові пакети $T_k \gg \Delta t$, котрі обираються у відповідності зі змінністю елементу, який досліджується так, щоб просторову статистичну структуру його у періоди можна було вважати незмінною. Такі оцінки можуть бути отримані, наприклад, за даними багатодобових навігаційних реалізацій на контрольно-корегуючих станціях морської диференційної підсистеми ССН латерального району, який досліджується шляхом вивчення часових статистичних характеристик процесу.

Оскільки значення, що прогнозуються, розраховуються тільки для сітчаній латеральної зони морської поверхні, а значення навігаційного параметру, який спостерігається, у загальному випадку, може бути розташований всередині її. Для визначення прогнозу у точці (ϕ_m, λ_m) проводиться лінійна інтерполяція з чотирьох найближчих вузлів по формулі

$$P_n(x_m, y_m) = 0,25(P_{00} + P_{00} + P_{01} + P_{11}) +$$

$$+ 0,5 \left(\frac{x_m - x_p}{\Delta x} - 0,5 \right) (P_{10} + P_{00} + P_{11} + P_{01}) +$$

$$+ 0,5 \left(\frac{y_m - y_p}{\Delta y} - 0,5 \right) (P_{10} + P_{00} + P_{11} + P_{01}) +$$

$$+ \left(\frac{x_m - x_p}{\Delta x} - 0,5 \right) \left(\frac{y_m - y_p}{\Delta y} - 0,5 \right) (P_{11} - P_{10} - P_{01} + P_{00}) \quad (12)$$

де $P_n(x_m, y_m)$ – значення прогнозу у t -й точці;

$P_{00}, P_{01}, P_{10}, P_{11}$ – значення щільності у вузлах сітки;
 x_m, y_m – умовні координати t -ї точки навігаційних спостережень;

x_0, x_1, y_0, y_1 – значення умовних координат вузлів сітчастої латеральної зони навігаційного поля морської поверхні.

Різниця прогностичного та безпосереднього значення навігаційного спостереження у точці t приймається за нев'язку прогнозу на кроці $1 \cdot \Delta t$. Визначивши усі нев'язки у пакеті T_k методом оптимальної інтерполяції по формулам (6) – (11) створюємо поле похибок поправок до прогнозу у всій сітчастій латеральній зоні морської поверхні. Підсумував його з полем прогностичних значень, отримаємо підсумкове поле, яке має більшу точність.

Оскільки у часовому пакеті T_k відбувається деякий розкид даних відносно середнього моменту часу, то доцільно уточнене прогностичне поле віднести саме до цього моменту. У якості такого моменту приймається $T_{k+1} - T_k / 2$, й цей час служить початком наступного пакету. З цих ж міркувань і оптимальну інтерполяцію неув'язок у вузлах сітчастої латеральної зони морської поверхні краще проводити не по усім неув'язкам пакету T_k , а використовувати лише найближчі за часом до $T_k / 2$, тобто ті які потрапляють до певного інтервалу $T_k / 2 \pm A$.

Уточнене поле щільності розподілення ймовірностей в момент $T_k / 2$ служить початковим для наступного $k+1$ -го пакету навігаційних спостережень. Процедура отримання й уточнення прогностичних значень повторюється. Таким чином, пакети навігаційних реалізацій послідовно обираються вздовж часової вісі з кроком T_k , при цьому кожний наступний перекриває попередній наполовину, тобто здійснюється якби змінне засвоєння інформації, що надходить на протязі всього часу T .

Процедура засвоєння нерівномірних навігаційних даних динаміко-стохастичною моделлю дозволяє відтворити поле щільності розподілення ймовірностей, що поступово наближується до поля яке спостерігається. Про якість моделі можна судити по поведінці стохастичних характеристик полів неув'язок. Оцінкою або мірою наближення може служити дисперсія поля похибок прогнозу розподілення ймовірностей місцеположення рухомого об'єкту.

Отже, запропонований метод засвоєння нерівномірних навігаційних реалізацій до розрахунків полів похибок обсервацій у навігаційному полі морської поверхні дозволяє засвоювати порціями дані навігаційних реалізацій при створенні мап полів похибок обсервацій навігаційного поля морської поверхні у випадку нерівномірних навігаційних реалізацій у латеральних зонах морської поверхні за тривалий період часу; критерієм якості моделі можуть служити статистичні характеристики поля неув'язок прогнозу – інтервал просторової кореляції та дисперсія.

Література

1. Інфімовський С.Ю. Підходи до використання чотирьох-мірного аналізу щодо визначення місця рухомого об'єкту при навігаційному оплаванні. / Інфімовський С.Ю. Матеріали V науково-технічної конференції ВМС ЗС України "Стан і розвиток Військово-Морських Сил ЗС України". Зб. наук. праць СВМІ ім. П.С. Нахімова. – Випуск 2 (12). – Севастополь. – 2007. – С. 184 – 188.
2. Беляев В.И. О применении объективного и четырёх-мерного анализа в океанографии. / Беляев В.И., Тимченко И.Е. – Мор. гидрофиз. исслед., 1972, № 2, С. 80 – 92.
3. Беляев В.И. Статистическое согласование гидрофизических полей. // Беляев В.И., Тимченко И.Е., Ярин В.Д. – Мор. гидрофиз. исслед., 1970, № 1, С. 81 – 97.
4. Губанов В.С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии. / Губанов В.С. СПб.: Наука, 1997. – 318 с., ил. 53.
5. Гандин Л.С. Четырёхмерный анализ метеорологических полей. / Гандин Л.С. – Л., Гидрометеиздат, 1976. – 61 с.
6. Дмитриев С.П. Нелинейные задачи обработки навигационной информации. / Дмитриев С.П., Шимелевич Л.И. Л.: ЦНИИ "Румб", 1977. – 86 с.
7. Ермоленко А.И. Учёт несинхронности наблюдений при построении карт полей океана. / Ермоленко А.И., Кныш В.В., Тимченко И.Е. – Мор. гидрофиз. исслед., 1978, № 3, С. 107 – 119.
8. Иванов Б.Е. Использование статистики экстремальных значений в навигации и океанографии // Иванов Б.Е. Записки по гидрографии. – 1999. – № 247. – С. 21 – 29.
9. Кныш В.В. Динамико-стохастическая модель для анализа поля плотности в океане. / Кныш В.В., Тимченко И.Е., Ярин В.Д. – В кн.: Советско-французские исследования. Севастополь: Мор. гидрофиз. ин-т АН УССР, 1978, С. 20 – 33.
10. Саркисян А.С. Численный анализ и прогноз морских течений. / Саркисян А.С. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 182 с.
11. PETERSEN D.P. Static and dynamic constraints on the estimations of space-time covariance and wave-number-frequency spectral fields. / PETERSEN D.P. – J. Atmos. Sci., 1973, 30, P. 141 – 152.
12. PETERSEN D.P. On representative observations. / PETERSEN D.P., MIDDLETON D. – Tellus, 1963, 15, P. 387 – 405.