

ТРАНСПОРТНІ СИСТЕМИ

УДК 519.712(045)

М. П. Мухіна, канд. техн. наук, доц.,
А. А. Чечина

**АЛГОРИТМ ОДНОЧАСНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ І КАРТОГРАФУВАННЯ
НА ОСНОВІ ВІЗУАЛЬНОГО ПОДАННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ**

Інститут аерокосмічних систем управління НАУ, e-mail: iasy@nau.edu.ua

Розглянуто особливості подання візуальної інформації для одночасного позиціонування та картографування. Розглянуто постановку завдання навігації для випадку спостереження літаком земної поверхні з відомою картою місцевості. Запропоновано алгоритм кореляційного пошуку та оцінювання координат літака із використанням фільтра Калмана.

Ключові слова: принцип одночасного позиціонування та картографування, статистична кореляція, «замкнений цикл», тривимірна матриця зображення, похибка датчика поля.

Актуальність роботи. Принцип одночасного позиціонування та картографування (ОПК) ґрунтується на обробленні інформації, поданої у вигляді випадкових функцій (полів), що призначена для визначення координат руху. В основу роботи покладено кореляційний зв'язок між реалізаціями випадкових функцій, а вихідні величини (координат місцеположення чи їх похідних) визначаються за допомогою знаходження екстремуму кореляційної функції чи будь-якої іншої статистичної оцінки реалізації випадкових функцій. Керування об'єктом здійснюється через визначення його місцеположення в процесі порівняння поточного (знятого в процесі руху) розподілу поля з еталонним (знятим заздалегідь) розподілом цього ж поля, що прив'язане до карти місцевості з певною точністю.

Оскільки розподіли поточного та картографованого полів по маршруту являють собою випадкові процеси, то ступінь їх близькості можна визначити за величиною взаємнокорельованої функції [1]. Максимум (екстремум) цієї функції буде свідчити про те, що поточна реалізація поля збігається з певною ділянкою карти цього поля, координати якого відомі з певною точністю.

Карти використовують для визначення положення об'єкта у просторі та графічного зображення плану місцевості. Одночасне позиціонування та картографування карти використовують для оцінювання фактичного місцеположення шляхом записування інформації, отриманої від убудованих датчиків, і порівнюють її з поточним набором даних. Визначати місцеперебування рухомого об'єкта на карті можна за допомогою статистичної кореляції, яка існує між оцінками положення її рухомого об'єкта та орієнтирів.

Архітектура систем ОПК має певні особливості. Першою є те, що об'єкт запам'ятовує характерні особливості середовища (орієнтири), що призводить до зменшення невизначеності об'єкта. Те саме відбувається при детектуванні всіх інших орієнтирів на карті, що зумовлено високим кореляційним зв'язком.

У разі виявлення невідомих орієнтирів об'єкт наносить їх на карту з характерною невизначеністю, яка є досить високою. Але при повторному скануванні усіх орієнтирів невизначеність зменшується завдяки кореляції між об'єктом та орієнтирами.

Другою особливістю задач ОПК є складність карти. Значна кількість кореляцій може призвести до збільшення обчислювальної складності задач навігації. Для збереження всіх можливих кореляційних зв'язків необхідно виконати обчислення $O(n^3)$ і $O(n^2)$ зв'язків, де n – кількість функцій. Тому для розв'язання задач ОПК важливо створити ефективну карту фізичного поля, яка буде містити характерні особливості середовища, що необхідно для позиціонування об'єкта.

Для розв'язання задач ОПК важливою є перевірка достовірності карти, що досягається «замкненням циклу», тобто поверненням об'єкта в початкову точку руху. Якщо карту складено правильно, то об'єкт буде здатен визначити по карті початкову точку й повернутися до неї з мінімальною різницею порівняно зі спостереженими орієнтирами.

Огляд існуючих рішень. Скорочення обчислювальної складності, що виникає під час оброблення та оновлення карт у загальному випадку можливе шляхом подання карти у вигляді:

- набору найбільш інформативних областей;
- набору характерних ознак (орієнтирів);
- кодованого (стислого) зображення.

Інформація геофізичного поля в загальному випадку може бути подана у вигляді двовимірної матриці зі значеннями третьої координати, наприклад висоти.

Суть запропонованої методики полягає в зведенні всієї наявної інформації про геофізичні поля до єдиного подання у вигляді тривимірної матриці зображення, для якої розробляються методи кореляційного пошуку відповідності [2; 3].

У разі оптичного (візуального) поля використовують варіанти задання еталонної карти у вигляді:

- набору контурів;
- розподілу інтенсивності поля (гістограми);
- наборів характерних ознак (наприклад, коефіцієнти вейвлет-перетворення).

Постановка завдання. Робочою інформацією є зображення (кадри) поверхневого поля. Позначимо спостережуване поле через $f(x, y)$, вважаючи, що Oxy – горизонтальна прямокутна система координат. Вектор спостереження подамо набором дискретних вимірюваних значень поля $z_i (i = 1, 2, \dots)$ (рис. 1).

Припустимо, що поздовжня вісь x_0 рухається орієнтовно осі x . Якщо курсової помилки немає, то

$$z_i = f x_d + \left(-N' - 1 + i - N \right) \left[\frac{i}{N} \right] L_x, y_d + \left(M - \left[\frac{i}{N} \right] \right) L_y + \eta_i,$$

де x_d, y_d – координати точки земної поверхні, куди напрямлена вісь датчика поверхневого поля (оскільки можливі відхилення $\Delta\beta_x, \Delta\beta_y$ осі датчика поля від вертикалі, то координати x_d, y_d можуть відрізнятися від координат x_0, y_0); L_x, L_y – дійсні відстані (масштаби) між елементами зображення; $N L_x \times (2M + 1) L_y$ – розмір зображення (кадру); у загальному випадку припускаємо кадр несиметричним $[N = N' + N'' + 1, N' \neq N'', q = N(2M + 1)]$, η_i – помилки вимірювання поля датчиком поля в i -й точці:

$$\eta_i = \eta_i \left\langle x_d + \left(-N' - 1 + i - N \right) \left[\frac{i}{N} \right] L_x, y_d + \left(M - \left[\frac{i}{N} \right] \right) L_y \right\rangle.$$

Елементи зображення пронумеровані так, що першим вважається верхній лівий елемент. Якщо тепер розглянути постійну курсову помилку ψ – неузгодженість між осями x_0 і x , яка виникає унаслідок того, що на борту рухомого об'єкта курс ніколи не буває точно відомим, то вираз для спостережуваних значень поля набуде вигляду:

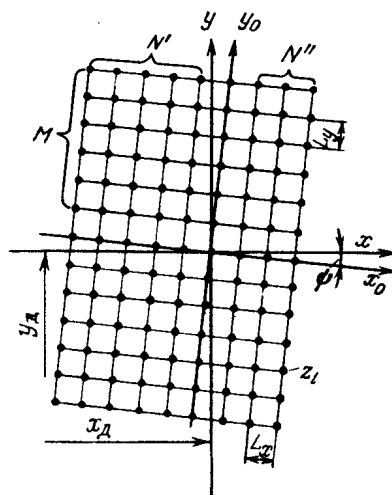


Рис. 1. Карта фізичного поля

$$\begin{aligned}
z_i = f \left\langle x_d + \left(-N' - 1 + i - N \right) \frac{i}{N} \left[\right] L_x \cos Y + \left(-M + \right) \frac{i}{N} \left[\right] L_y \sin Y, \right. \\
y_d + \left(-N' - 1 + i - N \right) \frac{i}{N} \left[\right] L_x \sin \Psi + \left(-M + \right) \frac{i}{N} \left[\right] L_y \cos \Psi \rangle + \\
+ \eta \left\langle x_d + \left(-N' - 1 + i - N \right) \frac{i}{N} \left[\right] L_x \cos \Psi + \left(-M + \right) \frac{i}{N} \left[\right] L_y \sin \Psi, \right. \\
y_d + \left(-N' - 1 + i - N \right) \frac{i}{N} \left[\right] L_x \sin \Psi + \left(-M + \right) \frac{i}{N} \left[\right] L_y \cos \Psi \rangle \\
(i = 1, 2, \dots, q).
\end{aligned}$$

Масштаби зображення L_x і L_y надалі передбачаються постійними в часі, але невідомими на рухомому об'єкті. Наприклад, у разі використання на літальному апараті оптичних зображень ця невідомість визначається неточними даними висоти польоту і кутами $\Delta\beta_x$, $\Delta\beta_y$ відхилення осі датчика поля від вертикалі. У разі використання радіолокаційних зображень місцевості та здійснення розгортки по горизонтальній дальності (що зазвичай виявляється необхідним) невідомість масштабів також пояснюється неточними даними висоти польоту.

Розглянемо одновимірний варіант системи ОПК і розглянемо рівномірне переміщення рухомого об'єкта (встановленого на ньому датчика поля) уздовж осі x :

$$x_d = V_x t, \quad y_d = 0.$$

Рівняння руху в скалярній формі будуть мати вигляд:

$$\dot{x}_d = V_x, \quad \dot{V}_x = 0, \quad \dot{L}_y = 0, \quad \dot{\psi} = 0.$$

Якщо ввести вектор стану

$$\mathbf{X} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T,$$

де $x_1 = x_d$, $x_2 = V_x$, $x_3 = L_x$, $x_4 = L_y$, $x_5 = \psi$, то рівняння руху буде таким:

$$\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{0}.$$

Матриця $\mathbf{A}$ має вигляд:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Уведемо також векторне позначення для вектора шумів $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_q]^T$. Оскільки курсова помилка має малі значення, то можна провести лінеаризацію за ψ і тоді проекції вектора $h(\mathbf{X})$ набудуть вигляду

$$\begin{aligned}
h_i(\mathbf{X}) = f \left\langle x_1 + \left(-N' - 1 + i - N \right) \frac{i}{N} \left[\right] x_3 + \left(-M + \right) \frac{i}{N} \left[\right] x_4 x_5 \right\rangle = \\
= \left(-N' - 1 + i - N \right) \frac{i}{N} \left[\right] x_4 x_5 + \left(M - \right) \frac{i}{N} \left[\right] x_4 \rangle.
\end{aligned}$$

Припустимо, що матриця спектральної густини шумів діагональна:

$$S_z = \begin{pmatrix} S_1 & & 0 \\ & 0 & \\ 0 & & S_q \end{pmatrix},$$

де $S_1, \dots, S_q$ – значення спектральних густин помилок у різних точках кадру на нульовій частоті.

Будемо вважати вимірювання з однаковою точністю ($S_1 = S_2 = \dots = S_q = S_0$), тоді $S_z = S_0 * I$, де I – одинична матриця розміром $q \times q$:

$$R_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x_0}^2 & & & & 0 \\ & \sigma_{v_{x_0}}^2 & & & \\ & & L_x^2 \sigma_{\lambda_0}^2 & & \\ & & & L_y^2 \sigma_{\mu_0}^2 & \\ 0 & & & & \sigma_{\psi_0}^2 \end{bmatrix}$$

де $\sigma_{x_0}^2, \sigma_{v_{x_0}}^2, \sigma_{\psi_0}^2$ – дисперсії початкових помилок оцінювання місцеположення, швидкості і курсу рухомого об'єкта відповідно; $\sigma_{\lambda_0}^2, \sigma_{\mu_0}^2$ – дисперсії початкових відносних помилок оцінювання масштабів L_x, L_y . Початкове значення оберненої матриці дорівнює

$$\Sigma_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{x_0}^{-2} & & & & 0 \\ & \sigma_{v_{x_0}}^{-2} & & & \\ & & L_x^{-2} \sigma_{\lambda_0}^{-2} & & \\ & & & L_y^{-2} \sigma_{\mu_0}^{-2} & \\ 0 & & & & \sigma_{\psi_0}^{-2} \end{bmatrix}$$

Алгоритм оцінювання в цьому випадку має вигляд:

$$\dot{\hat{X}} + A\hat{X} = k_\phi [z - h(\hat{X})];$$

$$k_\phi = R \left(\frac{\partial h}{\partial \hat{X}} \right)^\tau S_z^{-1};$$

$$\dot{\Sigma} - \Sigma A - A^\tau \Sigma = \left(\frac{\partial h}{\partial \hat{X}} \right)^\tau S_z^{-1} \left(\frac{\partial h}{\partial \hat{X}} \right);$$

$$\Sigma = R^{-1}.$$

При розрахунку і побудові графіків (рис. 2) для досягнення точності ОПК одновимірний перетин кореляційної функції використовуваного поля $f(x, y)$ описується рівнянням

$$R_f(\Delta) = \sigma_f^2 \exp(-\alpha^2 \Delta^2),$$

де σ_f^2 – дисперсія поля $f(x, y)$. Радіус кореляції ρ такого поля, що визначається

$$\text{співвідношенням } \frac{\int_0^\infty R_f(\Delta) d\Delta}{R_f(0)}, \text{ дорівнює: } \rho = \sqrt{\pi} / (2\alpha).$$

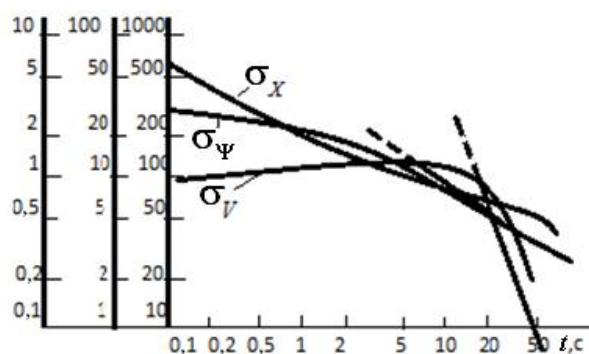


Рис. 2. Оцінювання похибок координат літака за ОПК

Кореляційна функція $R_{\Delta f}(\Delta)$ градієнта вихідного поля пов'язана з $R_f(\Delta)$ рівнянням

$$R_f(\Delta) = -\frac{\partial^2 R_f(\Delta)}{\partial \Delta^2}.$$

Отже,

$$R_f(\Delta) = 2\alpha^2 \sigma_f^2 (1 - 2\alpha^2 \Delta^2) \exp(-\alpha^2 \Delta^2)$$

звідки середній квадрат σ_{Δ}^2 градієнта використовуваного поля становить:

$$\sigma_{\Delta}^2 = \frac{\pi \sigma_f^2}{4 \rho^2}.$$

Як видно з графіків, основним джерелом похибок є похибки датчика поля при первинному картографуванні, тому для реалізації алгоритму ОПК необхідно передбачити етап «замкнення циклу», за якого об'єкт буде повертатися до початкової точки циклу та уточнювати дані картографування.

Список літератури

1. Баклицкий В. К. Корреляционно-экстремальные методы навигации / В. К. Баклицкий, А. Н. Юрьев. – М.: Радио и связь, 1982 – 256 с.
2. Белоглазов И. Н. Корреляционно-экстремальные системы / И. Н. Белоглазов, В. П. Тарасенко. – М.: Сов. радио, 1974 – 392 с.
3. H. Jacky Chang «P-SLAM: Simultaneous Localization and Mapping With Environmental-Structure Prediction» / H. Jacky Chang, George Lee, Yung-Hsiang Lu, Y. Charlie Hu // IEEE transactions on robotics. – Vol. 23. – No. 2. – April 2007.

М. П. Мухина, А. А. Чечина

Алгоритм одновременного позиционирования и картографирования на основе визуального представления навигационной информации

Рассмотрено особенности представления визуальной информации для одновременного позиционирования и картографирования. Рассмотрено постановку задач навигации для случая наблюдения самолетом земной поверхности с известной картой местности. Предложен алгоритм корреляционного поиска и оценивания координат самолета с использованием фильтра Калмана.

M. P. Muhina, A. A. Chechyna

Algorithm of simultaneous localization and mapping based on visual presentation of navigation information

Considered features of representation of visual information for the problem of simultaneous localization and mapping. Considered statement of a problem of navigation for the case, when aircraft observed the Earth with knowing map location. A correlation algorithm for researching and evaluating the coordinate plane using a Kalman filters is proposed.

Роботу виконано за підтримки Гранта Президента України для молодих вчених.