

СТРУКТУРА ТА ДИФЕРЕНЦІАЛЬНА МОДЕЛЬ ІНЕРЦІАЛЬНО-ПЕЛЕНГАЦІЙНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

У статті обґрунтовано необхідність комплексування даних різнорідних навігаційних систем для підвищення точності інерціальної навігації безпілотного літального апарата в умовах радіоелектронного подавлення каналів супутникових систем навігації. Існуючі варіанти комплексування, побудовані на використанні додаткової інформації від магнітометричних датчиків, датчиків курсу, системи фотограмметричної обробки зображення штучних наземних орієнтирів, неможливо застосувати в районах виконання спеціальних завдань безпілотним літальним апаратом. Тому для корекції інерціальної навігації обрано радіопеленгаційну систему, для якої як реперні точки можуть бути використані базові станції систем стільникового зв'язку, телевізійні вежі ефірного телебачення тощо. Запропоновано структуру автономної навігаційної системи безпілотного літального апарата на основі комплексування інформації від радіопеленгаційної та інерціальної навігаційних систем за слабозв'язаною схемою зі зворотнім зв'язком. Комплексування даних реалізовано з використанням диференціальної моделі алгоритму калманівської фільтрації, перевагою якої, порівняно з класичним алгоритмом, є невисока обчислювальна складність зі збереженням точності. Оцінку вектора стану, який включає різницю показів інерціальної та радіопеленгаційної навігаційних систем, використовують для корегування показів інерціальної навігаційної системи та її початкового стану. Отриманий результат може бути застосованим для автономної навігації безпілотного літального апарата військового призначення в умовах радіоелектронного подавлення.

Ключові слова: комплексування інформації, інерціальна навігація, безпілотний літальний апарат.

Постановка проблеми в загальному вигляді. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) для реалізації завдань навігації використовують такі супутникові радіонавігаційні системи (СРНС), як GPS, ГЛОНАСС, а також інерціальні навігаційні системи (ІНС). СРНС у більшості випадків гарантують достатню точність, якщо в зоні прямої видимості є щонайменше 4 навігаційні супутники, проте характеризуються низькою завадостійкістю [1]. У разі радіоелектронного подавлення приймачів сигналів СРНС виконання завдань навігації БПЛА без інерціальної системи стає неможливим.

Тому за відсутності сигналів СРНС більшість сучасних БПЛА здійснюють навігацію за інформацією ІНС. Така система є автономною, а тому захищеною від дії засобів радіоелектронного подавлення. Проте їй притаманне накопичення помилки, що призводить до суттєвого відхилення від польотного завдання БПЛА [2]. Тому підвищення точності навігації БПЛА в умовах радіоелектронного подавлення є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо, що підвищення точності визначення навігаційних параметрів об'єктів у просторі можливе за рахунок функціонального, інформаційного та апаратного об'єднання навігаційних вимірювачів різної фізичної природи в єдиний інтегрований навігаційний комплекс. Проте запропоноване в [3] комплексування даних СРНС та безплатформених ІНС не дозволяє вирішити існуючу проблему через відсутність в умовах радіоелектронного подавлення інформації від супутникової складової навігаційного комплексу.

Вирішенню завдань навігації в умовах відсутності сигналів СРНС для наземних засобів присвячені роботи [4–6], де запропоновано комплексування даних ІНС та одометричної системи. Крім того, як додаткову інформацію запропоновано використовувати прив'язку об'єкта до цифрової карти [4], дані магнітометричних датчиків [7] та датчиків курсу [8], [9].

Для автономної навігації БПЛА під час посадки та підвищення при цьому точності в [10] запропоновано варіант комплексування ІНС і системи визначення параметрів орієнтації та навігації на базі фотограмметричної обробки зображення штучних наземних орієнтирів. Але застосувати такий спосіб на невідомій місцевості через відсутність штучних орієнтирів неможливо.

Формулювання завдання дослідження. Таким чином, для підвищення точності автономної навігації та забезпечення виконання завдань БПЛА над невідомою місцевістю в умовах радіоелектронного подавлення противником каналу СРНС актуальним є завдання щодо комплексування ІНС БПЛА із системами, стійкими до впливу радіоелектронних перешкод.

Виклад основного матеріалу. Досягнення визначеної мети можливе за рахунок застосування додаткових автономних джерел навігаційної інформації, на які не можливо було б впливати ззовні, наприклад, бортової системи радіопеленгування. У цьому разі такими джерелами навігаційної інформації є власні пеленги на радіомаяки, координати яких наперед відомі. Вони дозволяють розрахувати положення БПЛА за пеленгаційним методом [11]. За радіомаяки можуть бути використані базові станції систем стільникового зв'язку, телевізійні вежі системи ефірного телебачення, а в разі застосування противником засобів радіоелектронного подавлення СРНС БПЛА – безпосередньо ці засоби.

При комплексному використанні інформації основної (ІНС) і додаткової (радіопеленгаційної) навігаційних систем для вирішення завдання корекції інерціальної навігації надлишковість інформації дозволяє потенційно підвищити точність системи.

Для комплексного оброблення інформації ІНС і радіопеленгаційної системи (РПС) пропонуємо застосувати замкнену схему комплексування на основі оптимального фільтра Калмана (ФК), наведену на рис. 1.

У даній схемі (рис. 1) ІНС і РПС здійснюють незалежне визначення координат БПЛА ($\mathbf{x}_{\text{ІНС}}, \mathbf{x}_{\text{РПС}}$). У зв'язному блоці на підставі розбіжності показів ІНС і РПС ($\Delta \mathbf{x}$) ФК формує оцінку вектора стану ($\Delta \hat{\mathbf{x}}$), у який входять похибки ІНС у визначенні навігаційних параметрів, що застосовується для корекції показів ІНС. Отримана в результаті корекції оцінка навігаційних параметрів ($\hat{\mathbf{x}}$) використовується для корегування початкових даних ІНС.

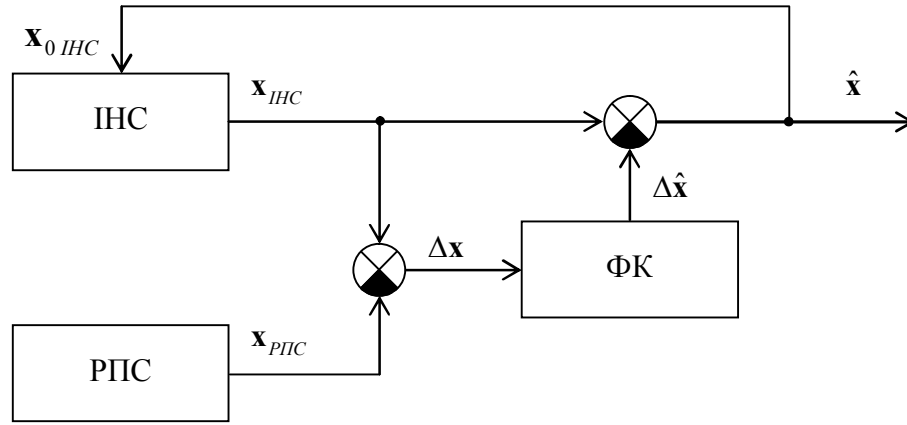


Рис. 1. Структурна схема системи комплексування ІНС та РПС

Відповідно до структурної схеми (див. рис. 1) алгоритм отримання навігаційних параметрів БПЛА у формалізованому вигляді описується виразами:

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}_{ІНС} - \Delta\hat{\mathbf{x}}, \quad (1)$$

$$\Delta\hat{\mathbf{x}} = \Phi(\mathbf{x}_{ІНС} - \mathbf{x}_{РПС}), \quad (2)$$

$$\mathbf{x}_{0\ ІНС} = \hat{\mathbf{x}}, \quad (3)$$

де $\mathbf{x}_{ІНС}$ – вектор навігаційних параметрів БПЛА за даними ІНС;

$\mathbf{x}_{РПС}$ – вектор навігаційних параметрів БПЛА за даними РПС;

$\hat{\mathbf{x}}$ – вектор оцінок навігаційних параметрів БПЛА;

$\Delta\hat{\mathbf{x}}$ – вектор оцінок розбіжності показів ІНС і РПС;

$\mathbf{x}_{0\ ІНС}$ – вектор початкових навігаційних параметрів БПЛА;

Φ – оператор застосування алгоритму калманівської фільтрації.

Для реалізації алгоритму калманівської фільтрації, позначеного у виразі (2) оператором Φ , з метою отримання оцінки розбіжності показів ІНС і РПС пропонуємо застосувати його диференціальну модель [12]. Диференціальній моделі ФК характерна невисока обчислювальна складність при збереженні точнісних характеристик [12], що особливо актуально в навігаційних системах через вимогу до функціонування в умовах реального часу. У загальному вигляді для запропонованого алгоритму (1)–(3) вона описується виразами [12]:

$$\frac{d\Delta\hat{\mathbf{x}}(t)}{dt} = \mathbf{F}(t)\Delta\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}(t)[\Delta\mathbf{x}(t) - \mathbf{H}(t)\Delta\hat{\mathbf{x}}(t)], \quad (4)$$

$$\mathbf{K}(t) = \boldsymbol{\eta}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1}(t), \quad (5)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\eta}(t)}{dt} = \mathbf{F}(t)\boldsymbol{\eta}(t) + \boldsymbol{\eta}(t)\mathbf{F}^T(t) - \boldsymbol{\eta}(t)\mathbf{H}^T(t)\mathbf{R}^{-1}(t)\mathbf{H}(t)\boldsymbol{\eta}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{Q}(t)\mathbf{G}^T(t), \quad (6)$$

$$\frac{k+1}{H} \boldsymbol{\eta}(k+1) + \sum_{l=0}^{l=k} \mathbf{A}(k-l)\boldsymbol{\eta}(l) + \mathbf{Y}(k) + \mathbf{F}(k) = 0, \quad (7)$$

де $F(t)$ – матриця стану;

$K(t)$ – матричний коефіцієнт підсилення фільтра;

Δx – вектор стану (вектор розбіжностей показів ІНС і РПС);

$H(t)$ – матриця спостереження;

$R(t)$ – матриця інтенсивності похибок вимірювання;

$\eta(t)$ – коваріаційна матриця похибок фільтрації;

$G(t)$ – матриця управління;

$Q(t)$ – матриця інтенсивності похибок спостереження;

H – інтервал збіжності нелінійної функції $\eta(t)$;

$A(k)$ – диференціальний спектр лінійної частини рівняння (6);

$Y(k)$ – диференціальний спектр нелінійної частини рівняння (6);

$F(k)$ – диференціальний спектр частини рівняння (6), яка не залежить від $\eta(t)$;

t – час;

$k = 0, 1, 2, \dots$ – номер дискрети диференціального спектра.

Рівняння (7) є матричним рекурентним. Його отримано шляхом застосування математичного апарату диференціальних перетворень академіка Г. Є. Пухова [13] до нелінійного матричного рівняння Рікатті (6). Вираз (7), за умови високого порядку апроксимуючої функції, абсолютно точно моделює нелінійне диференціальне рівняння (6), а за умови невисокого порядку дає наближений розв'язок, перевагою якого є простота обчислень, а недоліком – недостатній радіус збіжності. Для забезпечення збіжності розв'язку на великому інтервалі застосовують його розбиття на підінтервали, на кожному з яких шукають локальний розв'язок.

Висновки. Отже, запропонована структурна схема об'єднання інформації ІНС і РПС на основі алгоритму калманівської фільтрації (рис. 1) з її математичним описом (1)–(5), (7) є основою для побудови комплексної навігаційної системи ІНС – РПС, яка дозволить здійснювати автономну навігацію БПЛА в умовах відсутності сигналів СРНС без зриву польотного завдання. Її перевагою є те, що використання для корегування ІНС РПС підвищує інформаційну надмірність навігаційного комплексу БПЛА, а отже, і точність.

Застосування диференціальної моделі ФК як блоку комплексування інформації дозволяє отримувати оптимальні навігаційні параметри БПЛА за критерієм мінімуму середньоквадратичної похибки фільтрації в реальному масштабі часу за рахунок зниження обчислювальної складності алгоритму. Перспективами подальших досліджень у цьому напрямку є розроблення алгоритму комплексування інформації ІНС і РПС на основі диференціальної моделі ФК та проведення оцінювання його точності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М. Н. Красильщикова, Г. Г. Себрякова. Москва : Физматлит, 2009. 556 с.
2. Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации. Москва : Наука, 1979. 291 с.

3. Синеглазов В. М., Аскеров Ш. И. Оптимальная комплексная обработка данных в навигационных системах беспилотных летательных аппаратов // *Електроніка та системи управління*. Київ : НАУ, 2011. № 4 (30). С. 73–78.
4. Dragan Obradovic, Henning Lenz, Markus Schupfner and Kai Heesche. Multimodal Fusion for Car Navigation Systems // *Signal Processing Techniques for Knowledge Extraction and Information Fusion. Part II*. Springer US, 2008. P. 141–158.
5. Jacques Georgy, Tashfeen Karamat, Umar Iqbal, Aboelmagd Noureldin. Enhanced MEMS-IMU /odometer/ GPS integration using mixture particle filter // *GPS Solutions*, 2011 Vol. 15, Issue 3. P. 239–252.
6. Wanklerl M., Trommer G. Evaluation of a Segmented Navigation Filter Approach for Vehicle Self-Localization in Urban Environment // *Gyroscopy and Navigation*, 2014. Vol. 5, No. 2. P. 98–107.
7. Кузнецов И. М., Пронькин А. И., Веремеенко К. К. Навигационный комплекс аэропортового транспортного средства // *Труды МАИ*. 2011. № 47. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26966>.
8. Горбачев А. Ю. Применение одометров для коррекции интегрированных навигационных систем // *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана*. Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. № 4. С. 37–53.
9. Jianchen Gao. GPS/INS/G Sensors/Yaw Rate Sensor/Wheel Speed Sensors Integrated Vehicular Positioning System // *ION 2006, Fort Worth TX. 26-29 Sep, Session E3*. 2006. URL: https://schulich.ucalgary.ca/files/plan/gao2006_conference_b.pdf.
10. Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений / Д. А. Антонов, М. В. Жарков, И. М. Кузнецов и др. // *Труды МАИ*. 2016. № 91. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75632>.
11. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / Я. Д. Ширман, Ю. И. Лосев, Н. Н. Минервин и др. Москва : МАКВИС, 1998. 828 с.
12. Умінський В. В. Диференційна модель фільтра Калмана для локалізації автономного мобільного робота // *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. Хмельницький. 2014. № 1 (46). С. 33–36.
13. Пухов Г. Е. Дифференциальные спектры и модели. Киев : Наук. думка, 1990. 184 с.

Подано 26.06.2018

И. О. Канкин, В. В. Уминский

СТРУКТУРА И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИНЕРЦИАЛЬНО-ПЕЛЕНГАЦИОННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В статье обоснована необходимость комплексирования данных разнородных навигационных систем для повышения точности инерциальной навигации беспилотного летательного аппарата в условиях радиоэлектронного подавления каналов спутниковых систем навигации. Существующие варианты комплексирования, построенные на использовании дополнительной информации от магнитометрических датчиков, датчиков курса, системы фотограмметрической обработки изображения

искусственных наземных ориентиров, невозможно применить в районах выполнения специальных задач беспилотным летательным аппаратом. Поэтому для коррекции инерциальной навигации выбрана радиопеленгационная система, для которой в качестве реперных точек могут быть использованы базовые станции систем сотовой связи, телевизионные вышки эфирного телевидения и т. п. Предложена структура автономной навигационной системы беспилотного летательного аппарата на основе комплексирования информации от радиопеленгационной и инерциальной навигационных систем по слабосвязанной схеме с обратной связью. Комплексирование данных реализовано с использованием дифференциальной модели алгоритма калмановской фильтрации, преимуществом которой, по сравнению с классическим алгоритмом, является невысокая вычислительная сложность с сохранением точности. Оценка вектора состояния, включающего разницу показаний инерциальной и радиопеленгационной навигационных систем, используется для корректировки показаний инерциальной навигационной системы и ее начального состояния. Полученный результат может быть применен для автономной навигации беспилотного летательного аппарата военного назначения в условиях радиоэлектронного подавления.

Ключевые слова: комплексирование информации, инерциальная навигация, беспилотный летательный аппарат.

I. O. Kankin, V. V. Uminskyi

STRUCTURE AND DIFFERENTIAL MODEL OF THE INERTIAL-PELENGINATIVE NAVIGATION SYSTEM OF THE UNBEILED FLYING APPARATUS

The article substantiates the necessity of combining the data of heterogeneous navigation systems to improve the accuracy of inertial navigation of an unmanned aerial vehicle in conditions of radio electronic suppression of channels of satellite navigation systems. Existing variants of integration, built on the use of additional information from magnetometric sensors, course sensors, the system of photogrammetric image processing of artificial landmarks can not be applied in areas where special unmanned aerial vehicle tasks are performed. Therefore, to correct the inertial navigation, a direction-finding system has been chosen for which the reference stations of the stylized communication systems, television towers of the on-air television, etc. can be used as reference points. The structure of the autonomous navigation system of unmanned aerial vehicle based on the combination of information from the direction-finding and inertial navigation systems via a loosely coupled scheme with feedback is proposed. Data compilation is realized using a differential model of the Kalman filtering algorithm, whose advantage, in comparison with the classical algorithm, is low computational complexity with preservation of accuracy. The estimation of the state vector, including the difference in the indications of the inertial and direction-finding navigation systems, is used to correct the indications of the inertial navigation system and its initial state. The obtained result can be used for autonomous navigation of military-controlled unmanned aerial vehicle under conditions of electronic suppression.

Keywords: information complexing, inertial navigation, unmanned aerial vehicle.