

КОМПЛЕКСУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ ВИМІРІВ У ЗАДАЧІ МІСЦЕВИЯВЛЕННЯ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

У статті проаналізовано існуючі глобальні навігаційні супутникові системи та розглянуто можливості їх сумісного застосування в системах навігації безпілотних літальних апаратів.

Постановка проблеми. Особливістю й основною перевагою безпілотних літальних апаратів (БПЛА) є повна або часткова відсутність людського фактора при виконанні завдань, які несуть небезпеку життю екіпажу пілотованих літальних апаратів, або в разі неможливості їх виконання засобами пілотованої авіації. Розрізняють БПЛА трьох видів: безпілотні дистанційно пілотовані літальні апарати; безпілотні автоматичні, які програмується на певний маршрут польоту; автономні апарати, які не потребують заздалегідь заданої програми польоту за маршрутом, а визначають її «самостійно» під час польоту. Сучасний рівень розвитку БПЛА характеризується широким колом завдань військового та цивільного призначення, що виконуються даним видом авіаційної техніки. Тому до систем навігації та орієнтації БПЛА ставляться високі вимоги. Системи навігації та орієнтації БПЛА є сукупністю джерел навігаційної інформації та мікропроцесорних пристроїв її обробки. Як джерела навігаційної інформації використовують супутникові радіонавігаційні системи (СРНС) і безінерціальні навігаційні системи (БІНС). До останнього часу СРНС GPS була безальтернативною. На сьогодні в світі функціонують дві глобальні СРНС: GPS (США) і ГЛОНАСС (Росія), – ще дві знаходяться на етапі розгортання повного орбітального угруповання: Galileo (Європейське космічне агентство) і BeiDou (Китай).

Огляд останніх досліджень і публікацій. У сучасних публікаціях [1, 2] багато уваги приділяють розгляду можливості сумісного використання СРНС GPS і ГЛОНАСС. У деяких джерелах досліджують принципи побудови багатосистемних навігаційних приймачів [4]. На особливу увагу заслуговує наукова праця [3], у якій проаналізовано ефективність розв'язання навігаційної задачі за алгоритмом спільної обробки даних, що надходять від систем GPS і ГЛОНАСС. Однак сучасний стан орбітального угруповання космічних апаратів системи Galileo дозволяє вже сьогодні розглядати можливості щодо комплексування даних з трьох СРНС.

Формулювання завдання дослідження. Багато держав, у тому числі й Україна, створюють власні зразки приймальної апаратури супутникової навігації сумісного використання GPS і ГЛОНАСС, що застосовуються в різних сферах. На сьогоднішній день актуальним є завдання оцінювання можливості комплексування їх інформації з даними Galileo для сумісного застосування в системах навігації БПЛА.

Виклад основного матеріалу. Можливість сумісного використання СРНС GPS, ГЛОНАСС, Galileo обумовлена подібними принципами їх побудови, а саме:

спільністю принципів балістичної побудови систем;
 схожістю частотних діапазонів, а також сигнально-кодових конструкцій, що використовують фазову маніпуляцію і псевдовипадкові послідовності;
 подібністю принципів синхронізації та вимірювання навігаційних параметрів;
 близькістю систем координат;
 одночасністю створення СРНС GPS і ГЛОНАСС, модернізації та використання досвіду їх розгортання й експлуатації при проектуванні СРНС Galileo.
 Відмінності навігаційних сигналів СРНС наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Відмінності в навігаційних сигналах GPS, ГЛОНАСС і Galileo

Характеристика	GPS	ГЛОНАСС	Galileo
Метод розділення каналів	Кодовий (CDMA)	Частотний (FDMA)	Кодовий (CDMA)
Частота несучої (МГц)	L1 1575,42 L2 1227,60 L5 1176,45	L1 1602,5625-1615,5 L2 1246,4375-1256,6 L3 1197,648-1212,606	E1 1587-1591 E2 1559-1563 E5 1164-1188 E6 1260-1300
Координати	WGS-84	ПЗ-90.2	GTRF
Час	UTC(USNO)	UTC(SU)	Galileo system time

Незалежно від типу навігаційної системи (GPS, ГЛОНАСС, Galileo) і частотного діапазону (L1, L2 тощо) у побудові навігаційного приймача можна виділити два основні модулі: радіочастотний блок і цифровий обчислювач (рис. 1).

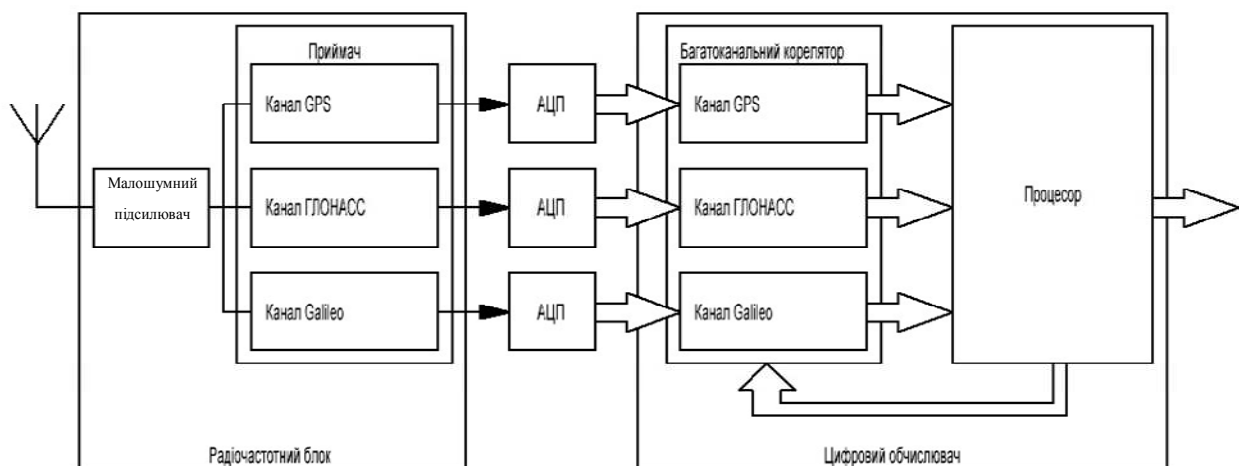


Рис. 1. Структура приймача для комплексування сигналів СРНС

Радіочастотний блок складається із преселектора, який є малошумним підсилювачем, конструктивно об'єднаним з антеною, і приймача, розташованого на одній платі з цифровим обчислювачем.

Цифровий обчислювач, у свою чергу, складається із замовленої інтегральної мікросхеми (ASIC), на якій побудовані корелятори, і процесора, у якому вирішується

навігаційне завдання і формуються керувальні сигнали для всіх блоків [4].

Однчасне використання сигналів від трьох навігаційних систем зумовлює певні особливості побудови всіх складових блоків навігаційного приймача.

Радіосигнали надходять на одну антену, об'єднану з преселектором. Вона повинна бути широкосмуговою і надавати достатнє підсилення для прийому слабких сигналів. У приймачі необхідно реалізувати оптимальний тракт для приймання кожного типу сигналу. У ньому сигнали підсилюються, перетворюються за частотою, відфільтровуються, квантуються за рівнем і потрапляють в ASIC – спеціалізовану інтегральну мікросхему, яка виконує роль багатоканального цифрового корелятора. Він повинен забезпечити обробку сигналів від усіх навігаційних супутників (НС).

Процесор вирішує такі завдання, як: вибір робочого сузір'я НС; розрахунок цілевказівок за частотою і затримкою маніпулюючої псевдовипадкової послідовності (ПВП); декодування навігаційних повідомлень, альманахів і ефемеридної інформації; розв'язання навігаційно-часової задачі з видачею координат і параметрів руху об'єкта; комплексування з даними автономних навігаційних систем; організація обміну даними; контроль працездатності блоків і навігаційного приймача в цілому.

Приймачі здійснюють видачу навігаційної інформації у форматі NMEA 0183, що є символьним протоколом зв'язку навігаційного обладнання між собою. Як правило, виробник навігаційних приймачів додаток до протоколу NMEA доповнює власним протоколом у бінарному форматі передачі, який забезпечує можливість налаштування режимів роботи приймача, отримання розширеної навігаційної (порівняно з NMEA) інформації, відповідь на запити, які надсилаються в приймач. Додаткова інформація може містити в собі повідомлення про альманахи, ефемериди, вимірювальну інформацію про супутники, дані про положення в географічних і геоцентричних координатах. Можливі детальні налаштування приймача (наприклад, вибір конкретних супутників для розрахунку положення).

У системах супутникової навігації застосовують псевдодальномірний метод розв'язання навігаційної задачі, який припускає, що шкала часу навігаційної апаратури користувача не потребує синхронізації власної шкали часу приймача відносно шкали часу системи.

В основу вимірювань положення об'єкта покладено дві фізичні умови: сталість і прямолінійність розповсюдження радіосигналу.

Визначення положення об'єкта здійснюють за затримкою між сигналами, які розповсюджуються від різних НС.

На вхід алгоритму обчислення координат надходять спостереження такого вигляду:

$$\begin{cases} R_1 = p_1(x, y, z) + n_1; \\ R_2 = p_2(x, y, z) + n_2; \\ \dots \\ R_N = p_N(x, y, z) + n_n, \end{cases} \quad (1)$$

де R_i – виміри псевдодальності за i -м НС;

p_i – псевдодальність до i -го НС;

n_i – шуми спостережень за i -м НС.

Вимірювання часу прийому сигналу здійснюється за власною шкалою часу приймача, який має зсув $\Delta\tau$ відносно шкали часу системи. Тому псевдодальності пов'язані із зсувом шкали часу приймача $\Delta\tau$ і трьома координатами приймача x, y, z :

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + \Delta\tau \cdot c; \\ R_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} + \Delta\tau \cdot c; \\ \dots \\ R_N = \sqrt{(x-x_N)^2 + (y-y_N)^2 + (z-z_N)^2} + \Delta\tau \cdot c, \end{cases} \quad (2)$$

де x_i, y_i, z_i – координати i -го НС.

Для однієї навігаційної системи достатньо розв'язати систему із чотирьох рівнянь. Вектор параметрів навігаційної задачі $\vec{x} = (x \ y \ z \ \Delta\tau \cdot c)^T$ має такий вигляд:

для системи GPS

$$R_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} + \Delta\tau_{GPS} \cdot c; \quad (3)$$

для системи ГЛОНАСС

$$R_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} + \Delta\tau_{GLN} \cdot c; \quad (4)$$

для системи Galileo

$$R_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2} + \Delta\tau_{GAL} \cdot c, \quad (5)$$

де $\Delta\tau_{GPS}, \Delta\tau_{GLN}, \Delta\tau_{GAL}$ – зсув шкали часу приймача відносно шкал часу систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo відповідно, причому $\Delta\tau_{GPS} \neq \Delta\tau_{GLN} \neq \Delta\tau_{GAL}$. При сумісному розв'язанні

вектор параметрів навігаційної задачі має такий вигляд:

$$\vec{x} = (x \ y \ z \ \Delta\tau_{GPS} \cdot c \ \Delta\tau_{GLN} \cdot c \ \Delta\tau_{GAL} \cdot c)^T.$$

Тоді система рівнянь (2) набуває такого вигляду:

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + \Delta\tau_{GPS} \cdot c + \Delta\tau_{GLN} \cdot c + \Delta\tau_{GAL} \cdot c; \\ R_2 = \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} + \Delta\tau_{GPS} \cdot c + \Delta\tau_{GLN} \cdot c + \Delta\tau_{GAL} \cdot c; \\ \dots \\ R_N = \sqrt{(x-x_N)^2 + (y-y_N)^2 + (z-z_N)^2} + \Delta\tau_{GPS} \cdot c + \Delta\tau_{GLN} \cdot c + \Delta\tau_{GAL} \cdot c. \end{cases} \quad (6)$$

Для розв'язання системи рівнянь (6) застосовують ітераційні алгоритми, які використовують для уточнення апріорних значень координат об'єкта шляхом знаходження поправок до них у процесі послідовних наближень.

При лінеаризації системи в околах апріорних значень вектора параметрів навігаційної задачі $\bar{x}_0 = (x_0 \quad y_0 \quad z_0 \quad \Delta\tau_{0GPS} \cdot c \quad \Delta\tau_{0GLN} \cdot c \quad \Delta\tau_{0GAL} \cdot c)^T$ визначають розрахункові значення R_{0i} згідно з (6):

$$R_{0i} = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2} + \Delta\tau_{0GPS} \cdot c + \Delta\tau_{0GLN} \cdot c + \Delta\tau_{0GAL} \cdot c. \quad (7)$$

Різниця псевдодальностей виміряних і розрахункових $R_i - R_{0i}$ має такий вигляд:

$$R_i - R_{0i} = R_i(x_0 + \Delta x, y_0 + \Delta y, z_0 + \Delta z, \tau_{0GPS} + \Delta\tau_{GPS}, \tau_{0GLN} + \Delta\tau_{GLN}, \tau_{0GAL} + \Delta\tau_{GAL}, x_i, y_i, z_i) - R_i(x_0, y_0, z_0, \tau_{0GPS}, \tau_{0GLN}, \tau_{0GAL}, x_i, y_i, z_i), \quad (8)$$

де $R_i(\dots, x_i, y_i, z_i)$ – функція, що пов’язує значення вектора параметрів з псевдодальностями та відповідає лівій частині рівняння (7).

Лінеаризацію рівняння (8) проводять шляхом розкладання в ряд Тейлора за степенями поправок:

$$R_i - R_{0i} = \left(\frac{\partial R_i}{\partial x}\right) \cdot \Delta x + \left(\frac{\partial R_i}{\partial y}\right) \cdot \Delta y + \left(\frac{\partial R_i}{\partial z}\right) \cdot \Delta z + \left(\frac{\partial R_i}{\partial \tau_{GPS}}\right) \cdot \Delta\tau_{GPS} + \left(\frac{\partial R_i}{\partial \tau_{GLN}}\right) \cdot \Delta\tau_{GLN} + \left(\frac{\partial R_i}{\partial \tau_{GAL}}\right) \cdot \Delta\tau_{GAL}. \quad (9)$$

Часткові похідні $\left(\frac{\partial R_i}{\partial *}\right)$ від функції R_i за координатами, що входять у систему (9) та відповідають наближено відомому місцю, визначають за значеннями елементів апріорного вектора X_0 .

Система рівнянь (9) може бути записана в матричному вигляді:

$$\Delta R = A \cdot \Delta, \quad (10)$$

де $\Delta R = R_i - R_{0i}$, $\Delta R = \begin{bmatrix} R_1 - R_{01} \\ \dots \\ \dots \\ R_N - R_{0N} \end{bmatrix}^{n \times 1}$;

A – матриця часткових похідних $\left(\frac{\partial R_i}{\partial *}\right)$;

$$A = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial R_1}{\partial x}\right) & \left(\frac{\partial R_1}{\partial y}\right) & \left(\frac{\partial R_1}{\partial z}\right) & \left(\frac{\partial R_1}{\partial \tau_{GPS}}\right) & \left(\frac{\partial R_1}{\partial \tau_{GLN}}\right) & \left(\frac{\partial R_1}{\partial \tau_{GAL}}\right) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \left(\frac{\partial R_n}{\partial x}\right) & \left(\frac{\partial R_n}{\partial y}\right) & \left(\frac{\partial R_n}{\partial z}\right) & \left(\frac{\partial R_n}{\partial \tau_{GPS}}\right) & \left(\frac{\partial R_n}{\partial \tau_{GLN}}\right) & \left(\frac{\partial R_n}{\partial \tau_{GAL}}\right) \end{bmatrix}^{n \times 6},$$

$$\Delta = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \tau_{GPS} \\ \Delta \tau_{GLN} \\ \Delta \tau_{GAL} \end{bmatrix}^{6 \times 1}$$

Δ – матриця невідомих поправок:

Система рівнянь (10) має розв'язання у випадку невинродженості матриці A , тобто при рівній кількості визначених параметрів та вимірів псевдодальності до НС. Як правило, у зоні знаходження об'єкта можна спостерігати більшу кількість НС, ніж необхідно. У такому разі система (10) стає надмірною. Для обробки цих систем застосовують метод найменших квадратів (МНК).

Розв'язання надмірної системи рівнянь (10) за МНК можна записати в такому вигляді:

$$\Delta R = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot \Delta R. \quad (11)$$

Початковими значеннями координат для наступного циклу приймаються початкові значення попереднього, виправлені на величини оцінених поправок.

Для перевірки можливості комплексування даних СРНС було розроблено макет приймального пристрою (рис. 2), який дозволяє приймати сигнали навігаційних космічних апаратів СРНС: ГЛОНАСС –у частотному діапазоні L1 (ПТ-код), GPS – на частоті L1 (С/А код), Galileo – на частоті E1.



Рис. 2. Макет приймача для комплексування сигналів СРНС

Висновки. Навігаційна приймальна апаратура – це кореляційні кодові приймачі супергетеродинного типу.

Загальна кількість навігаційних апаратів після розгортання системи Galileo разом з уже існуючими буде становити близько 70, що надасть змогу покращити точність навігації. Деякі частоти усіх трьох навігаційних систем (GPS, ГЛОНАСС і Galileo) розташовані на взаємно перетинних ділянках, вони можуть бути прийняті одним приймальним пристроєм. Приймач, здатний приймати сигнали всіх СРНС, буде спроможним використовувати до 30 НС одночасно. Це сприятиме покращенню визначення місцеположення об'єкта з одночасним підвищенням надійності навігації.

За наявності трьох незалежних навігаційних систем можливо реалізувати такі режими

роботи:

використання тільки одної системи. Приймач матиме можливість вибору оптимальної; застосування одної системи для контролю роботи іншої. Приймач буде обчислювати два незалежні навігаційні рішення з подальшим визначенням кореляції між ними; сумісна робота трьох систем. Приймач обчислюватиме спільне рішення за всіма системами, обираючи для цього найкраще сузір'я супутників.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Перов А. И. Глонасс. Принципы построения и функционирования / А. И. Перов ; под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – [4-е изд.; перераб.]. – М. : Изд-во «Радиотехника», 2010. – 801 с.
2. Погурельський О. С. Переваги методу спільної обробки даних від навігаційних систем GPS та ГЛОНАСС / О. С. Погурельський // Новітні технології – для захисту повітряного простору : тези доповідей 7-ї наук. конф. Харків. ун-ту Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба, (13–14 квітня 2011р.). – Х. : ХУПС, 2011. – С. 263.
3. Феоктистов Д. С. Исследование алгоритмов решения навигационных задач / Д. С. Феоктистов, А. М. Алешечкин // Современные проблемы радиоэлектроники : сб. науч. трудов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. – С. 202–207.
4. Кудрявцев И. А. Приемники сигналов навигационных систем : электрон. учеб. пособ. [Электронный ресурс] / И. А. Кудрявцев. – Электрон, текстовые и граф. дан. (0,72Мбайт). – Самара : Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева, 2011. – Режим доступа : www.ssau.ru/files/.../Приемники%20сигналов-Кудрявцев%20ИА.pdf.

Подано 25.05.2015

И. В. Пулеко, П. П. Топольницкий, Н. С. Медина

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧЕ МЕСТООПРЕДЕЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

В статье проведен анализ существующих глобальных навигационных спутниковых систем и рассмотрены возможности их совместного применения в системах навигации беспилотных летательных аппаратов.

I. V. Puleko, P. P. Topolnytskyi, N. S. Medina

ALGORITHM FOR COMBINING SATELLITE NAVIGATION MEASUREMENTS IN FINDING UNMANNED AERIAL VEHICLE

The article analyzes the existing global navigation satellite systems and the possibilities of their joint application in the navigation of unmanned aerial vehicles.