

УДК 621.396.933: 629.783(047-31)

¹Ю. В. Пепа, канд. техн. наук, доц.
²Т. О. Затицян, студ.**ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ У ПРОСТОРІ
ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ**¹НАУ, кафедра засобів захисту інформації, e-mail: pepa_yu@mail.ru²НАУ, кафедра засобів захисту інформації, e-mail: akaray@gmail.com

Розглянуто інтерферометричний метод визначення координат рухомих об'єктів у просторі, які використовують супутникові радіонавігаційні системи для визначення своїх поточних координат за допомогою GPS-технологій.

Interferometric method for position finding of moving objects, which use satellite radio navigation system for determination self coordinates by use of GPS-technologies, was observed.

Вступ

Радіонавігаційні засоби розвивалися через удосконалення цих засобів, ускладнення завдань, які підлягали вирішенню, та збільшення вимог до точності визначення координат. Якщо перші радіонавігаційні системи у вигляді радіомаяків та радіопеленгаторів забезпечували дальність дії в декілька сотень кілометрів, то з часом вимоги підвищувались до 1 – 2,5 тис. кілометрів і, навіть, до 8–10 тис. кілометрів. Пізніше питання радіонавігації набули глобального характеру, тобто постало завдання створення глобальної радіонавігаційної системи, в основу якої було покладено супутникову радіонавігаційну систему на основі систем «Глонасс» та «Навстар» (GPS) Global Positioning System (Глобальна система визначення місцеположення). Тому вимоги до точності місцевизначення стаціонарного або рухомого об'єктів істотно збільшилися до десятків метрів.

Користувачами GPS є не тільки рухомі об'єкти, але і стаціонарні, які потребують високоточного визначення своїх координат і поправок до місцевої шкали часу. Тому мова йде не тільки про навігаційно-часове забезпечення, але й про більш широке завдання – координатно-часове забезпечення цивільного користувача GPS.

Аналіз досліджень і публікацій

Супутникові радіонавігаційні системи розроблялися для забезпечення навігаційних потреб таких рухомих об'єктів, як літаки та кораблі. Завдання GPS полягало у визначенні координат, похідних від координат і навігаційних елементів руху [1].

Постановка завдання

Оскільки поточні координати навігаційних штучних супутників Землі задаються в геоцент-

ричній прямокутній системі координат, а за результатами навігаційних вимірювань положення об'єкта прив'язується до штучних супутників Землі [2], то природно визначати ці координати саме в тій самій геоцентричній прямокутній системі координат. Таким чином, формулюється первинна координатна задача. Рухомому цивільному користувачу необхідно знати свій азимут і кут місця. Водночас користувачів GPS цікавлять інші координати: географічні, прямокутні Гаусса–Крюгера, ортодромічні, відносні та ін. [1].

Визначення координат рухомих об'єктів у просторі

Користувачам GPS інколи треба знати не тільки свої поточні координати, але й розташування векторів швидкості та своїх власних осей у просторі відносно напрямку на північ. Усі ці величини потрібні для морського, повітряного супроводу, а також для топогеодезичних робіт.

Для орієнтації об'єкта у просторі використовують GPS, які вимірюють навігаційні параметри, тобто кути між осями об'єкта і прямої, що з'єднує певну точку самого об'єкта та конкретного штучного супутника Землі (рис. 1).

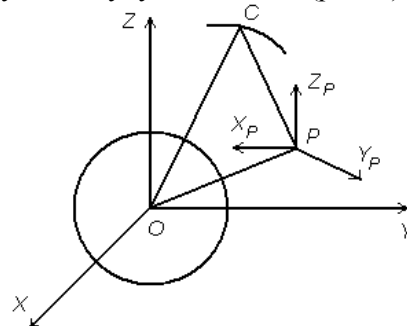


Рис. 1. Розташування об'єкта у просторі

Якщо припустити, що координати супутника C і об'єкта P відомі, то можна визначити орієнтацію прямої CP у геоцентричній системі

координат XYZ , а виміряні кути α (кут між CP та PX_p), β (кут між CP та PY_p) і γ (кут між CP та PZ_p) між осями геоцентричної системи координат об'єкта $X_pY_pZ_p$ і напрямом CP дозволяють знайти положення цих осей в системі координат XYZ . У разі потреби можна перейти до іншої системи координат.

Відомо, що за допомогою двох радіотехнічних методів вимірювання можна знайти азимут і кут місця. Один з методів має назву «радіопеленгаційний», тобто за допомогою антенної системи з дуже вузькою діаграмою спрямованості встановлюється спостереження за напрямом до джерела радіосигналу, яке розміщено на супутнику, і вимірюються кути між віссю антени і осями об'єкта. В такому випадку конструкція антени має бути параболічною або антенною ґраткою, яка б забезпечувала діаграму спрямованості шириною в одиниці градусів, щоб була можливість вимірювати кути α , β та γ з похибками одиниці хвилин.

Інший метод інтерферометричний і полягає в тому, що до двох приймачів GPS під'єднують антени і розносять їх на певну відстань, яку назовемо базою. Антени повинні бути не напрямлені або слабо напрямлені і приймати сигнал від одного джерела. Вимірювальний пристрій оцінює різницю ходу променів від джерела сигналу до антен.

У такому випадку вважається, що падаюча радіохвиля має плоский фронт хвилі через надто велику віддаленість антени приймача GPS від супутника (джерела радіосигналу). Позначимо базу через $d = A_1A_2$ (рис. 2).

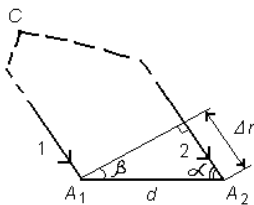


Рис. 2. Падіння променів 1 та 2 від супутника C на антени приймачів GPS

На рис. 2 позначено через α – кут надходження радіохвилі. Як видно з рис. 2, різниця ходу між променями 1 та 2 становить

$$\Delta r \approx d \cos \alpha \approx d \sin \beta. \quad (1)$$

Якщо, наприклад, $\beta = 1' \approx 0,0003$ рад, а база $d = 2$ м, то як видно з виразу (1), $\Delta r = 0,6$ мм.

Коли довжина хвилі радіосигналу від супутника $\lambda = 200$ мм, то тоді різниця фаз [1], що відповідає різниці ходу променів 0,6 мм, буде такою:

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta r \cdot 360^\circ}{\lambda},$$

тобто $1^\circ 08'$.

Таким чином, щоб оцінити орієнтацію бази у просторі з похибкою приблизно $1'$, необхідно забезпечити похибку вимірювання різниці фаз близько 1° , що знаходиться в межах сучасної вимірювальної техніки.

Спробуємо визначити різницю ходу променів від двох супутників C_1 та C_2 відносно положення у просторі лінії бази A_1A_2 (рис. 3).

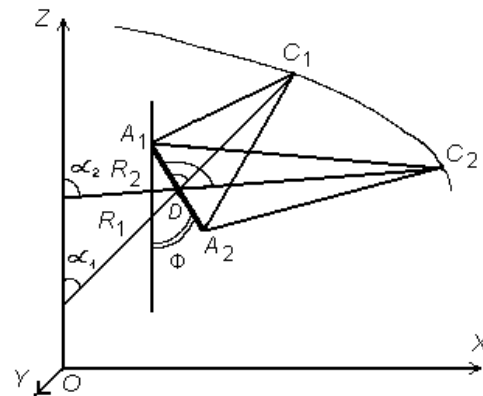


Рис. 3. Визначення азимуту бази

На рис. 3 позначено: A_1A_2 – база з центром в точці D , що лежить у площині XOY ; C_1, C_2 – супутники; R_1, R_2 – відстані від супутників до осі OZ ; θ_1 – кут між базою і C_1D ; θ_2 – кут між базою і C_2D .

Розглянемо випадок, коли $A_1A_2 = d$.

З рис. 3 видно, що відстані C_1A_1 та C_1A_2 від супутника C_1 знаходять так:

$$C_1A_1 = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + R_1^2 - dR_1 \cos \theta_1} = \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2R_1}\right)^2 - \frac{d}{R_1} \cos \theta_1}; \quad (2)$$

$$C_1A_2 = \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 + R_1^2 + dR_1 \cos \theta_1} = \sqrt{1 + \left(\frac{d}{2R_1}\right)^2 + \frac{d}{R_1} \cos \theta_1}. \quad (3)$$

Оскільки $\left(\frac{d}{2R_1}\right)^2 \leq 1$, то з рівнянь (2) та (3)

одержуємо:

$$C_1 A_1 \approx \sqrt{1 - \frac{d}{R_1} \cos \theta_1}; \quad (4)$$

$$C_1 A_2 \approx \sqrt{1 + \frac{d}{R_1} \cos \theta_1}. \quad (5)$$

Розкладаємо в ряд вирази (4) та (5) і залишаємо члени не вище другого порядку:

$$C_1 A_1 \approx 1 - \frac{d}{2R_1} \cos \theta_1 - \frac{1}{8} \frac{d^2}{R_1^2} \cos^2 \theta_1;$$

$$C_1 A_2 \approx 1 + \frac{d}{2R_1} \cos \theta_1 - \frac{1}{8} \frac{d^2}{R_1^2} \cos^2 \theta_1,$$

тобто різниця ходу променів

$$\Delta r_1 = C_1 A_2 - C_1 A_1 = d \cos \theta_1.$$

Аналогічно записуємо і для другого супутника: $\Delta r_2 = C_2 A_2 - C_2 A_1 = d \cos \theta_2$.

Знаходимо різницю між ними:

$$\Delta r_1 - \Delta r_2 = d(\cos \theta_1 - \cos \theta_2), \quad (6)$$

але враховуємо, що $\alpha_1 = \theta_1 - \Phi$; $\alpha_2 = \theta_2 - \Phi$, і підставляємо у рівняння (6). Записуємо:

$$(F_1^2 + F_2^2) \cos^2 \Phi - 2F_1 F_2 \cos \Phi + F_3^2 - F_2^2 = 0, \quad (7)$$

де $F_1 = \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2$; $F_2 = \sin \alpha_2 - \sin \alpha_1$;

$$F_3 = \frac{\Delta r_1 - \Delta r_2}{d}.$$

Кути α_1 та α_2 знаходимо за відомими координатами супутників та відомою базою, різниці Δr_1 та Δr_2 вимірюємо. Розв'язавши рівняння (7), знаходимо азимут бази Φ .

Геометрію променів від інших двох супутників C_3 та C_4 відносно положення у просторі лінії бази $A_1 A_2$ для визначення кута місця бази Ψ показано на рис. 4, на якому позначено: $A_1 A_2$ – база з центром в точці D , що лежить у площині ZOX ; C_3 , C_4 – супутники; R_3 , R_4 – відстані від супутників до осі OX ; θ_3 – кут між базою і $C_3 D$; θ_4 – кут між базою і $C_4 D$.

Виконавши аналогічні перетворення за формулами (2) – (7), одержимо остаточний вираз рівняння для кута місця бази Ψ :

$$(E_1^2 + E_2^2) \cos^2 \Psi - 2E_1 E_2 \cos \Psi + E_3^2 - E_2^2 = 0, \quad (8)$$

де $E_1 = \cos \alpha_3 - \cos \alpha_4$; $E_2 = \sin \alpha_4 - \sin \alpha_3$;

$$E_3 = \frac{\Delta r_3 - \Delta r_4}{d}.$$

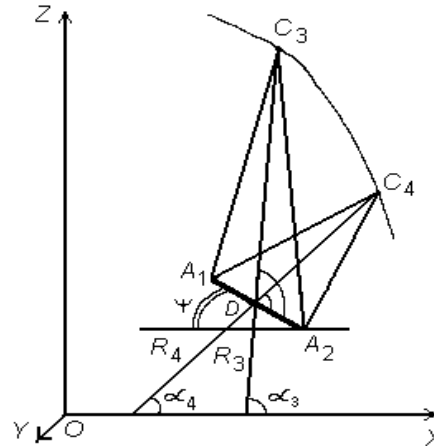


Рис. 4. Визначення кута місця бази

Висновок

Таким чином, вирази (7) та (8) дають змогу за допомогою супутникового сузір'я з чотирьох (у рідкісних випадках трьох) супутників одержати значення азимута бази Φ та значення кута місця бази Ψ на приймачі GPS цивільного користувача.

Для створення цифрових інтерферометрів необхідно виключити неоднозначність вимірювання різниці фаз від різних променів та ще й від різних супутників. Один із способів вирішення цієї проблеми – використання в межах основної бази додаткових антен, які розташовані на лінії основної бази і створюють укорочені бази, що дозволяє в процесі вимірювань, змінюючи розміри баз, враховувати кількість циклів неоднозначності.

Література

1. *Сетевые спутниковые радионавигационные системы* / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцевич и др. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
2. *Соловьев Ю. А. Системы спутниковой навигации.* – М.: Эко-Трендз, 2000. – 269 с.

Стаття надійшла до редакції 18.01.07.