

УДК 621.396:621.372

Е.О.Ковалевський, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.**В.В.Конін**, д-р техн. наук, проф.**О.С.Погурельський**, мол. наук. співроб.

ВИКОРИСТАННЯ СИГНАЛІВ РІЗНИХ ЧАСТОТ СУПУТНИКА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАВІГАЦІЙНИХ ВИЗНАЧЕНЬ

Проаналізовано можливість підвищення точності навігаційних визначень за рахунок обробки сигналів супутника, що передаються на різних частотах. Наведено результати моделювання.

The possibility for positioning accuracy increase due to processing satellite signal that is transmitted at different frequencies is analyzed. The simulation data is shown.

Постановка проблеми

Упровадження технологій супутникової радіонавігації в повсякденну практику має масштабний характер. Свідченням цьому є використання систем GPS, ГЛОНАСС та проекти, запроваджені EGNOS, Galileo.

В Україні роботи в цьому напрямі як концептуально [1; 2; 3], так і у сфері наукових досліджень проводять науково-виробничі структури Києва, Харкова, Сміли.

Проблемні питання – підвищення завадостійкості, точності навігаційних визначень, забезпечення контролю достовірності інформації, що передається користувачеві.

У цій роботі досліджується можливість підвищення точності навігаційних визначень (НВ) за рахунок обробки сигналів супутника, що передаються на різних частотах.

Аналіз точнісних характеристик навігаційних визначень

Як відомо з роботи [4], завдання НВ математично зводиться до розв'язання системи лінеаризованих рівнянь:

$$X = X_0 + A \cdot D, \quad A = (H^T \cdot H)^{-1} \cdot H^T, \quad (1)$$

де X – вектор оцінюваних параметрів;

X_0 – початкова оцінка вектора X ;

D – вектор відхилень виміряних псевдовіддалей до супутника від їх початкової оцінки;

H – матриця напрямляючих косинусів.

Система (1) передбачає обробку сигналів від усіх навігаційних супутників (НС), що перебувають у зоні видимості. Кількість НС, що спостерігаються, визначає кількість рядків матриці H .

Якість НВ прийнято характеризувати геометричним фактором, який за певного нормування визначають виразом [4]:

$$K_G = \left\{ \text{tr}[H^T \cdot H]^{-1} \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

де $\text{tr}[\cdot]$ – слід матриці.

Відомо, що геометричний фактор поліпшується зі збільшенням кількості видимих НС. Система рівнянь (1) формується виходячи з припущення незалежності сигналів НС під час їх обробки. Ідея використання сигналу НС на іншій частоті як незалежного джерела ґрунтується на таких засадах:

– рефракція сигналу НС в іоносфері залежить від частоти;

– шуми в радіоканалах навігаційного приймача для сигналів різних частот незалежні.

Обґрунтуємо твердження про поліпшення якості НВ у разі використання сигналу НС іншої частоти. Дослідимо квадратичну форму виразу (2):

$$B = H^T \cdot H.$$

Легко показати, що детермінант матриці B дорівнює

$$|B| = |H|^2. \quad (3)$$

Подамо матрицю H у вигляді

$$H = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix},$$

де a_{ij} , $i=1..4$, $j=1..4$ – напрямні косинуси для чотирьох НС.

Введемо матрицю H_1 розміром 5×4 , в якій останній рядок – повторення останнього рядка H .

У блочному поданні

$$H_1 = \begin{bmatrix} H \\ S \end{bmatrix},$$

де S – рядок a_{4j} , $j=1..4$.

Квадратична форма B_1 дорівнює

$$B_1 = H_1^T \cdot H_1 = H^T \cdot H + S^T \cdot S. \quad (4)$$

З формул (3), (4) випливає, що

$$|B_1| > |B|. \quad (5)$$

Аналітичні розрахунки з матрицями

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, M_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, M_2 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

показали, що

$$L_i = M_i^T \cdot M_i, i = 1, 2,$$

$$L_1 = 2|M|, L_2 = 3|M| \quad (6)$$

для будь-яких a_{ij} .

Результати розрахунків формул (6) підтвердили вираз (5) і показали, що для розглядуваної матриці додавання одного рядка, аналогічного останньому, збільшує детермінант вдвічі, а двох рядків – утричі. Це дозволяє припустити, що детермінант матриці збільшується з кожним рядком, який додається, на одне значення детермінанта початкової матриці для будь-якого вигляду матриці H :

$$|Mn| = |M| + n \cdot |M|, \quad (7)$$

де n – кількість рядків, що додаються в матрицю M .

Аналіз процедур обернення матриць B та B_1 показує, що, з огляду на значне збільшення детермінанта $|B_1|$, порівняно з $|B|$ та меншою мірою збільшення алгебричних доповнень обернених матриць

$$\text{tr} [B_1^T \cdot B_1]^{-1} < \text{tr} [B^T \cdot B]^{-1}. \quad (8)$$

Отже, згідно з виразом (2), зменшується K_T , що покращує якість НВ. Справедливість виразу (8) легко доводиться аналітично для матриць M та M_1 .

Для апробації отриманих результатів проводимо розрахункові експерименти та математичне моделювання.

Результати розрахункових експериментів та математичного моделювання

Як початкові дані візьмемо ефемеридну інформацію про супутники, що спостерігаються з відміткою часу GPS-тиждень 1414 секунда 131904. Обираємо чотири з дев'яти супутників, задаємо вектор X_0 , власне місцезнаходження та розраховуємо матрицю напрямних косинусів A :

$$A = \begin{bmatrix} 0.331 & 0.732 & -0.596 & 1 \\ -0.526 & -0.625 & -0.577 & 1 \\ -0.942 & -0.274 & -0.192 & 1 \\ -0.559 & -0.804 & -0.201 & 1 \end{bmatrix}.$$

Обираємо інші чотири супутники і для тих самих X_0 знаходимо

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.667 & 0.021 & -0.512 & 1 \\ -0.211 & -0.534 & -0.836 & 1 \\ 0.222 & 0.794 & -0.790 & 1 \\ 0.749 & -0.493 & -0.596 & 1 \end{bmatrix}.$$

Розраховуємо відповідно до виразу (2) значення K_T для різних комбінацій матриць H та H_1 і відповідні значення детермінантів $|B|$ і $|B_1|$.

Розглядаємо такі приклади:

- 1) у матрицю H_1 додається останній рядок матриці $H = A$;
- 2) у матрицю H_1 додається останній рядок матриці $H = A_1$;
- 3) матриця H формується з перших двох рядків матриці A і останніх двох рядків матриці A_1 , у матрицю H_1 додається останній рядок матриці H ;
- 4) на відміну від прикладу 3 в матрицю H_1 додається перший рядок матриці H ;
- 5) на відміну від прикладу 3 в матрицю H_1 додається другий рядок матриці H ;
- 6) на відміну від прикладу 3 в матрицю H_1 додається третій рядок матриці H ;
- 7) на відміну від прикладу 1 в матрицю H_1 додається перший рядок матриці H ;
- 8) на відміну від прикладу 1 в матрицю H_1 додається другий рядок матриці H ;
- 9) на відміну від прикладу 1 в матрицю H_1 додається третій рядок матриці H ;
- 10) в матрицю H_1 додається перший рядок матриці $H = A_1$;
- 11) на відміну від прикладу 10 в матрицю H_1 додається другий рядок матриці H ;
- 12) на відміну від прикладу 10 в матрицю H_1 додається третій рядок матриці H ;
- 13) на відміну від прикладу 10 в матрицю H_1 додається перший і останній рядки матриці H .

В усіх прикладах значення детермінантів $|B|$ і $|B_1|$ відповідали співвідношенню (7).

Аналіз даних табл. 1 дозволяє зробити такі висновки:

- подання НС, що випромінює сигнали на двох різних частотах як два незалежні НС, призводить до поліпшення геометричного фактора;
- ступінь поліпшення залежить від обраного сузір'я супутників і для прикладів, що розглядались, збільшився максимально в 1,17 разу;
- поліпшення геометричного фактора залежить від того, який супутник у певному сузір'ї обрано, щоб використати як два незалежні;
- подання двох НС як чотири незалежні джерела навігаційних сигналів порівняно зі звичайним у розглядуваних прикладах принесло максимальний вииграш у 1,14 разу.

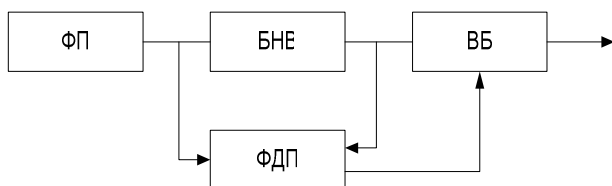
Таблиця 1

Отримані значення K_T

Номер прикладу	H	H_1	$\frac{H}{H_1}$
1	5	4,44	1,13
2	4,86	4,56	1,07
3	9	8,88	1,014
4	9	7,72	1,17
5	9	8,98	1,002
6	9	7,96	1,13
7	5	4,97	1,006
8	5	4,47	1,12
9	5	4,88	1,02
10	4,86	4,43	1,1
11	4,86	4,32	1,12
12	4,86	4,78	1,02
13	4,86	4,19	1,16

Дослідимо математичну модель, до складу якої входять (див. рисунок):

- формувач псевдовіддалей (ФП);
- блок навігаційних визначень (БНВ);
- формувач диференціальних поправок (ФДП);
- вихідний блок (ВБ).



Математична модель

Псевдовіддалі формуються згідно з виразом

$$R_i = \left[(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 \right]^{1/2} + \xi_i,$$

де x_i, y_i, z_i – координати i -го супутника;

x_0, y_0, z_0 – координати користувача;

ξ – компонент, що містить суму складових систематичних та випадкових похибок визначення віддалі.

У блоці навігаційних визначень проводяться розрахунки згідно з виразом (1) в ітераційному режимі та за заданими межами похибок результатів.

Формувач диференціальних поправок визначає різницю між псевдовіддальми та розрахованими віддальми до НС.

Вихідний блок видає параметри з урахуванням диференціальних поправок.

Координати НС беремо з тих самих ефемерид, що використовувались у розрахункових експериментах.

Складові ξ_i (зсув шкал часу, іоносферні, тропосферні похибки, шуми приймача, похибки багатопроменевого поширення) формуємо з параметрами, що відповідають даним, наведеним у роботі [4].

Проводимо такі експерименти:

- 1) обираємо чотири супутника з матрицею напрямних косинусів $H = A$;
- 2) до чотирьох супутників позиції 1 додаємо до сузір'я повторно 4-й супутник;
- 3) на відміну від позиції 2 додаємо повторно 3-й супутник;
- 4) на відміну від позиції 3 додаємо повторно 2-й супутник;
- 5) на відміну від позиції 4 додаємо повторно 1-й супутник;
- 6) на відміну від позиції 1 до сузір'я вводимо 1-й супутник двічі, а також 3-й та 4-й;
- 7) на відміну від позиції 1 вводимо 1, 4 та 2-й супутники двічі;
- 8) на відміну від позиції 1 вводимо 1, 2 та 3-й супутники двічі;
- 9) на відміну від позиції 1 вводимо 1, 2 та 4-й супутники двічі.

Фіксуємо середні оцінки визначення координат користувача $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ з усередненням по 10^4 реалізацій.

За даними табл. 2 можна зробити такі висновки:
 – якщо використані сигнали НС, що випромінюються на двох частотах як від двох незалежних супутників під час роботи в диференціальному режимі, точність визначення координат зростає;
 – навіть у разі роботи з трьома НС з використанням двох сигналів одного з них точність навігаційних визначень достатня для певних навігаційних застосувань.

Таблиця 2

Результати моделювання

Номер експерименту	Помилка, км		
	ΔX	ΔY	ΔZ
1	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$-1,8 \cdot 10^{-4}$	$9,3 \cdot 10^{-4}$
2	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$-1,37 \cdot 10^{-4}$	$-1,4 \cdot 10^{-4}$
3	$-1,3 \cdot 10^{-5}$	$-6,5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
4	$-1,5 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$-1,5 \cdot 10^{-5}$
5	$-2,1 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$-1 \cdot 10^{-5}$
6	-2,7	-2,2	-14
7	-0,34	0,21	0,065
8	0,4	-0,24	0,67
9	-0,11	0,067	0,021

Висновки

Проведений аналіз, розрахункові експерименти і математичне моделювання підтвердили гіпотезу про можливість використання сигналів НС, що випромінюються на різних частотах, як сигнали додаткових супутників для поліпшення навігаційних визначень. Доцільність конструювання апаратури з організацією спільної обробки такої сукупності сигналів може бути визначена після додаткових досліджень.

Література

1. *Кривовяз А.Т.* Проблемы оптимального выбора навигационного оборудования // Матеріали VII Між-нар. наук.-техн. конф. «Авіа-2006». – К.: НАУ, 2006. – Т. I. – С. 21.80 – 21.84.
2. *Загоруйко В.В., Конин В.В.* Обеспечение точных заходов на посадку методами спутниковой навигации // Косм. наука і технологія. – 2001.– Т. 7, № 4. – С. 25–30.
3. *Концепция создания системы навигационного обеспечения Украины / А.П. Верещак, В.В. Пискорж, А.А. Жалило и др.* // Косм. наука і технологія. – 1998. – Т. 4, № 5/6. – С. 46–55.
4. *Глонавс.* Принципы построения и функционирования. – 3-е изд. / под ред. А.И. Перова, В.И. Харисова. – М.: Радиотехника, – 2005. – 688 с.

Стаття надійшла до редакції 28.11.07.