

УДК 621.396:621.372

Е.О. Ковалевський, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

ВИКОРИСТАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ СУПУТНИКІВ ДЛЯ НАВІГАЦІЙНИХ ВИЗНАЧЕНЬ

Запропоновано метод навігаційних визначень з використанням апріорної інформації про невидимі супутники. Досліджено ефективність методу за допомогою математичного моделювання.

Methods of navigational determinations with using of a priori information about non visible satellites are offered. Effectiveness of this method investigated with the help of mathematical modeling.

Вступ

Точність навігаційних визначень (НВ) залежить, передусім, від кількості видимих навігаційних супутників (НС) та їх геометричного розміщення відносно до користувача [1].

Вплив взаємно просторового розміщення робочого сузір'я НС і користувача на точність НВ характеризується геометричним фактором. Його вимірюють коефіцієнтом, який є мірою зменшення точності навігаційних визначень залежно від просторового розташування НС.

У монографії [2] наведено дані, які свідчать про зменшення значень геометричного фактора та підвищення точності визначень зі зростанням кількості видимих супутників.

З різних причин (рельєф місцевості, час сеансу, несправність НС) кількість робочих супутників може стати мінімальною.

У той же час в навігаційному приймачі періодично оновлюється альманах, який дає апріорну інформацію про всі діючі супутники сузір'я.

У цій роботі за допомогою математичного моделювання досліджується можливість використання апріорної інформації про невидимі супутники для поліпшення навігаційних визначень.

Опис моделі

Уявімо, що один із видимих користувачу супутників знаходиться в точці R , а один із супутників, розміщених поза зоною видимості (віртуальних), у точці V .

Місце розміщення користувача позначимо точкою P (див. рисунок).

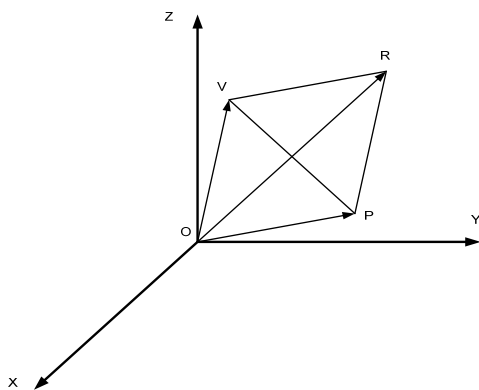


Схема розміщення НС користувача

Положення вказаних об'єктів у геоцентричній системі координат $[X, Y, Z]$ визначається векторами $OR(X_R, Y_R, Z_R)$, $OV(X_V, Y_V, Z_V)$, $OP(X_P, Y_P, Z_P)$.

Відстань між точками P та R вимірюється навігаційним приймачем як псевдовіддаль до i -го супутника:

$$pD_R = \sqrt{(X_R - X_P)^2 + (Y_R - Y_P)^2 + (Z_R - Z_P)^2} + \xi_R, \quad (1)$$

де ξ_R – випадкова величина, зумовлена похибками шкал часу, ефемеридного забезпечення, розповсюдження за трасою навігаційний супутник – користувач та навігаційного приймача.

Вимірювана відстань pD_R є різницею векторів OP та OR :

$$pD_R = OP - OR$$

з чого випливає, що

$$OP = OR + pD_R.$$

Відстань від користувача до віртуального супутника V може бути визначена як

$$D_{PV} = OV - OP.$$

Координати вектора D_{PV} знаходимо відповідно до виразів

$$X_{PV} = X_V - X_P;$$

$$Y_{PV} = Y_V - Y_P;$$

$$Z_{PV} = Z_V - Z_P.$$

Координати вектора OP можна отримати з виразів

$$X_P = X_R + pD_R \cos \alpha_1;$$

$$Y_P = Y_R + pD_R \cos \alpha_2; \quad (2)$$

$$Z_P = Z_R + pD_R \cos \alpha_3,$$

де $\cos \alpha_1$, $\cos \alpha_2$, $\cos \alpha_3$ – напрямні косинуси, що їх оцінюють у процесі розв'язання задач НВ за видимими супутниками.

З урахуванням виразів (2) координати вектора D_{PV} запишемо у вигляді

$$\begin{aligned} X_{PV} &= X_V - X_R - pD_R \cos \alpha_1; \\ Y_{PV} &= Y_V - Y_R - pD_R \cos \alpha_2; \\ Z_{PV} &= Z_V - Z_R - pD_R \cos \alpha_3. \end{aligned} \quad (3)$$

У загальному випадку вирази (3) подамо у вигляді

$$\begin{aligned} X_{pj} &= X_j - X_i - D_{pi} \cos \alpha_1 \\ Y_{pj} &= Y_j - Y_i - D_{pi} \cos \alpha_2 \\ Z_{pj} &= Z_j - Z_i - D_{pi} \cos \alpha_3, \end{aligned}$$

де j та i – номер віртуального та видимого супутника відповідно.

Псевдовіддаль до j -го віртуального супутника визначається як

$$D_j = [X_{pj}^2 + Y_{pj}^2 + Z_{pj}^2]^{1/2}. \quad (4)$$

У математичній моделі здійснюються такі операції.

Задають:

- параметри сузір'я супутників;
- координати користувача;
- апріорні значення координат користувача та відхилення шкали часу;
- допуски на похибки навігаційних визначень;
- характеристики випадкових величин, які обумовлюють формування псевдовіддалі;
- кількість реалізацій.

Визначають кількість NS та номер видимих супутників.

Вибирають номер i видимого супутника, відносно якого розраховують псевдовіддаль D_j .

Задають число NK загальної кількості видимих та віртуальних супутників.

Відкривають цикл з реалізацій.

У циклі виконують такі операції.

Формують псевдовіддалі до видимих супутників відповідно до виразу (1) за заданого нормального закону зміни випадкової величини $\xi - [m\xi, \sigma\xi]$.

Проводять навігаційні розрахунки в ітераційному режимі відповідно до виразів [1]:

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

де X_p – вектор параметрів користувача, що обчислюються;

X_0 – апріорні параметри користувача;

D – вектор відхилення вимірюваних псевдовіддалей від початкових значень;

H – матриця напрямних косинусів.

На кожній ітерації X_0 замінюється розрахованим X_p доти, доки D не потрапить у поле допусків.

Розраховують матрицю напрямних косинусів G .

За фіксованого i визначають

$$pD_i \cos \alpha_1, \quad pD_i \cos \alpha_2, \quad pD_i \cos \alpha_3.$$

Відповідно до виразу (4) формують псевдовіддалі до віртуальних супутників.

З урахуванням псевдовіддалей як видимих, так і вертикальних супутників, розв'язується задача НВ. Фіксуються відхилення та квадрати відхилень, розрахованих координат користувача від точних і засилаються в суматор.

Після закінчення циклу з реалізацій розраховують середньоквадратичні відхилення (СКВ) σ_x ,

σ_y , σ_z координат користувача від істинних для НВ як щодо видимих, так і щодо всіх супутників.

Результати моделювання

Експеримент 1. Задаємо значення

$$m\xi = 10^{-8} \text{ км},$$

$$\sigma\xi = 7,2 \cdot 10^{-3} \text{ км},$$

$$NS = 4.$$

Матрицю G визначають без похибок.

Змінюємо кількість віртуальних супутників і тим самим значення NK . Проводимо експеримент і визначаємо статистики усередненні за $KR = 10^4$ реалізаціям.

Результати моделювання наведено в табл. 1.

Експеримент 2. На відміну від експерименту 1, під час визначення напрямних косинусів враховуються похибки НВ у вигляді добавок до розрахункових відстаней супутник – користувач нормально розподіленої випадкової складової з параметрами $[m\eta, \sigma\eta] - m\eta = 10^{-8}$ км, $\sigma\eta = 2 \cdot 10^{-3}$ км. Результати наведено в табл. 2.

Експеримент 3. Під час розрахунку псевдовіддалей відповідно до виразу (4) враховуємо похибки ефемеридного забезпечення та альманаху у вигляді адитивної випадкової складової з нормальним розподілом $[m\eta, \sigma\eta] - m\eta = 10^{-8}$ км, $\sigma\eta = 10^{-3}$ км.

Результати подано в табл. 3.

Експеримент 4. Якщо $NK = 10$, змінюємо кількість NS видимих супутників.

Останні характеристики такі, як і в експерименті 2. Результати наведено в табл. 4.

Експеримент 5.

Проводимо НВ тільки з видимими супутниками, змінюючи їх кількість.

Результати моделювання подано в табл. 5.

Аналіз даних табл. 1–5 дозволяє констатувати таке.

Додавання до сигналів видимих супутників апріорної інформації про віртуальні супутники дозволяє підвищити точність навігаційних визначень.

Ступінь підвищення точності визначень залежить від кількості та положення віртуальних супутників. Вона також залежить від вибору опорного видимого супутника для розрахунку псевдовіддалей до віртуальних супутників.

Якщо 4 видимі супутники додавання від 1 до 6 віртуальних дозволило підвищити точність визначення координат від 2,5 до 10 разів в горизонтальній площині і до 1,5 разу по вертикалі.

Таблиця 1

Результати експерименту 1

СКВ	НК						
	4	5	6	7	8	9	10
σ_{x_2} , КМ	0,033	0,012	$4,2 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-3}$	4×10^{-3}	$3,3 \times 10^{-3}$	$2,89 \times 10^{-3}$
σ_{y_2} , КМ	0,026	$4,3 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-3}$	$4,1 \times 10^{-3}$	$3,96 \times 10^{-3}$	$3,94 \times 10^{-3}$
σ_{z_2} , КМ	0,011	0,011	$7,5 \times 10^{-3}$	$6,8 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-3}$	$6,9 \times 10^{-3}$	$6,88 \times 10^{-3}$

Таблиця 2

Результати експерименту 2

СКВ	НК						
	4	5	6	7	8	9	10
σ_{x_2} , КМ	0,033	0,012	$4,28 \times 10^{-3}$	$4,09 \times 10^{-3}$	$4,06 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-3}$	$2,89 \times 10^{-3}$
σ_{y_2} , КМ	0,026	0,026	$4,11 \times 10^{-3}$	$4,16 \times 10^{-3}$	$4,09 \times 10^{-3}$	$3,96 \times 10^{-3}$	$3,95 \times 10^{-3}$
σ_{z_2} , КМ	0,011	0,011	$7,5 \times 10^{-3}$	$6,86 \times 10^{-3}$	$7,1 \times 10^{-3}$	$7,2 \times 10^{-3}$	$7,08 \times 10^{-3}$

Таблиця 3

Результати експерименту 3

СКВ	НК						
	4	5	6	7	8	9	10
σ_{x_2} , КМ	0,033	0,012	$4,63 \times 10^{-3}$	$4,48 \times 10^{-3}$	$4,48 \times 10^{-3}$	$3,78 \times 10^{-3}$	$3,3 \times 10^{-3}$
σ_{y_2} , КМ	0,026	0,026	$4,3 \times 10^{-3}$	$4,31 \times 10^{-3}$	$4,27 \times 10^{-3}$	$4,18 \times 10^{-3}$	$4,15 \times 10^{-3}$
σ_{z_2} , КМ	0,011	0,011	$7,4 \times 10^{-3}$	$6,76 \times 10^{-3}$	$6,95 \times 10^{-3}$	$6,95 \times 10^{-3}$	$6,94 \times 10^{-3}$

Таблиця 4

Результати експерименту 4

СКВ	НК				
	5	6	7	8	9
σ_{x_2} , КМ	$5,39 \times 10^{-3}$	$7,11 \times 10^{-3}$	$7,08 \times 10^{-3}$	$7,44 \times 10^{-3}$	$7,32 \times 10^{-3}$
σ_{y_2} , КМ	$5,47 \times 10^{-3}$	$5,38 \times 10^{-3}$	$5,44 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-3}$	$5,24 \times 10^{-3}$
σ_{z_2} , КМ	$7,1 \times 10^{-3}$	$8,6 \times 10^{-3}$	$7,63 \times 10^{-3}$	$6,97 \times 10^{-3}$	$6,85 \times 10^{-3}$

Таблиця 5

Результати експерименту 5

СКВ	НК						
	4	5	6	7	8	9	10
σ_{x_2} , КМ	0,033	0,013	$8,66 \times 10^{-3}$	$8,29 \times 10^{-3}$	$8,24 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-3}$	$6,8 \times 10^{-3}$
σ_{y_2} , КМ	0,026	$5,62 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-3}$	$5,5 \times 10^{-3}$	$5,36 \times 10^{-3}$	$5,2 \times 10^{-3}$	$5,1 \times 10^{-3}$
σ_{z_2} , КМ	0,011	0,011	$9,4 \times 10^{-3}$	$7,6 \times 10^{-3}$	$7,45 \times 10^{-3}$	$7,2 \times 10^{-3}$	$6,3 \times 10^{-3}$

Результати навігаційних визначень майже не змінюються при врахуванні похибок обчислення напрямних косинусів із СКВ – 2 м та ефемеридного забезпечення зі СКВ – 1 м.

Отримані результати відносяться до вибраного сузір'я з 10 супутників GPS на якийсь момент часу, з яких 4 було прийнято як видимі, а 6 як віртуальні. Виходячи з того, що сузір'я вибрано довільно, можна очікувати, що якісно ефект підвищення точності НВ з додаванням віртуальних супутників притаманний взагалі для СРНС.

Висновки

Як показали дослідження, за допомогою математичного моделювання, додавання апріорної інформації про віртуальні супутники у процесі навігаційних визначень за сигналами видимих супутників дозволяє підвищити точність визначення місцеположення.

Ступінь поліпшення точності суттєво залежить від співвідношення кількості видимих і віртуальних супутників.

Має значення також, який із видимих супутників обирати як базовий для розрахунку псевдовіддалей до віртуальних супутників. Тут можна впровадити алгоритм оптимального вибору.

Указаний ефект може бути використаний при побудові апаратури користувача спеціального призначення для роботи в умовах затрудненого прийому сигналів від навігаційних супутників (вузькість, місцеві предмети).

Література

1. *Бабак В.П., Конін В.В., Харченко В.П.* Супутникова радіонавігація. – К.: Техніка, 2004. – 328 с.
2. *ГЛОНАСС.* Принципы построения и функционирования: изд. 3-е / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – М.: Радиотехника, 2005. – 688 с.

Стаття надійшла до редакції 27.06.08.