

УДК 681.518.2

О.В. Шульга, О.В. Шефер

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, Полтава

## ГЕОМЕТРИЧНИЙ ЧИННИК ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ПОХИБКУ ВИЗНАЧЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ У ПСЕВДОСУПУТНИКОВІЙ РАДІОСИСТЕМІ

Доведено, що співвідношення між похибками визначення первинних та вторинних навігаційних параметрів залежить тільки від вигляду матриці градієнтів споживача (С), тобто від геометрії взаємного розташування псевдосупутників (ПС) та споживача С. Проведений аналіз показав, що у загальному вигляді вираз для геометричного чинника (ГЧ) може бути записано як відношення  $GDOP = \sigma_q / \sigma_D$ , де  $\sigma_q$  – середньо – квадратична похибка (СКП) визначення вектора стану споживача С;  $\sigma_D$  – СКП визначення псевдодалекостей до ПС. Визначено, що на практиці споживачів цікавить ступінь погіршення точності місцевизначення окремо у горизонтальній та вертикальній площинах відносно поверхні Землі, а також ступінь погіршення точності визначення поправок часу.

**Ключові слова:** геометричний чинник, псевдосупутник, споживач, псевдо далекість, стільникова структура, кут височіння, елементарна чарунка, пряма видимість, геодезична віддаль.

### Вступ

Навігаційна задача, яка вирішується у апаратурі споживачів (С) псевдосупутникової радіонавігаційної системи (ПС РНС), у найпростішому випадку полягає у визначенні просторово-часових координат  $P = \|x \ y \ z \ D\|^T$ .

На точність визначення споживачем ПС РНС координат місцезнаходження, висоти, швидкості, часу та інших параметрів впливає велика кількість факторів. Вони пов'язані з особливостями первинних та вторинних навігаційних вимірювань, з характеристиками сигналів, які використовуються, середовища розповсюдження та ін.

Розглянемо основні джерела похибок стосовно до псевдодалекомірного метода навігаційних вимірювань.

У ПС РНС як і в супутникових радіонавігаційних системах (СРНС) реалізується псевдодалекомірний метод визначення точки знаходження С зі збереженням точки початку відліку на борту навігаційного супутника (НС), який відрізняється від далекомірного на величину

$$w = cT',$$

де  $c$  – швидкість розповсюдження радіохвиль,  $T'$  – різниця між часом навігаційної апаратури споживача (НАС) та системним часом РНС).

**Мета статті.** Вивчення загальних закономірностей структури ПС РНС, яку доцільно подати у вигляді сукупності тетрадрів, для чого побудувати стільникову структуру, обравши у якості елементарної чарунки «трикутник з центральною точкою», в якій для наземного С дальність прямої видимості ПС обумовлюється також мінімальним кутом височіння ПС.

### Основна частина

Для переходу від геоцентричної системи координат (ГСК) до топоцентричної системи координат (ТСК) застосовується афінний перехід:

$$A_k = \begin{bmatrix} \cos \lambda \sin \phi & \sin \lambda \sin \phi & -\cos \phi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ \cos \lambda \cos \phi & \sin \lambda \cos \phi & \sin \phi \end{bmatrix},$$

де  $\phi$  та  $\lambda$  – геодезичні координати споживача С [1].

Кореляційна матриця  $K_q$  перераховується у ТСК за допомогою формули

$$K_{qTCK} = A_k \Gamma_{KK} A_k^T,$$

де  $\Gamma_{KK}$  – блок матриці  $K_q$ , який відповідає похибкам координат

$$K_q = \begin{bmatrix} \Gamma_{KK} & \Gamma_{Kt} \\ \Gamma_{Kt} & \Gamma_{tt} \end{bmatrix}.$$

Таким чином, геометричні чинники погіршення точності при визначенні місця у просторі – PDOP, у плані (горизонтальній площині) – HDOP, по висоті – VDOP та часу – TDOP запишуться відповідно у вигляді.

$$PDOP = (y_{11} + y_{22} - y_{33})^{1/2},$$

$$HDOP = (y_{11} + y_{22})^{1/2},$$

$$VDOP = (y_{33})^{1/2},$$

$$TDOP = (y_{44})^{1/2},$$

де  $y_{ij}$  є елементами матриці  $K_q = A^{-1}$ .

У багатьох джерелах, зокрема у [2, 3], показано, що мінімальних значень ГЧ можна досягти, коли С знаходиться у центрі правильного тетраедра. Для наземного С мінімальне значення досягається тоді, коли один НС знаходиться у зеніті, а

три інших НС рівномірно розташовані у горизонтальній площині.

Таким чином, для мінімізації GDOP необхідно максимізувати об'єм тетраедра.

Виходячи з цього, структуру ПС РС доцільно подати у вигляді сукупності тетраедрів, для чого побудувати стільникову структуру, обравши у якості елементарної чарунки “трикутник з центральною точкою” (рис. 1).

Розміри такого трикутника обумовлюються висотою ПС, яка, у свою чергу, обумовлює радіус ( $R$ ) зони прямої видимості С – ПС. Для наземного С дальність прямої видимості ПС обумовлюється також мінімальним кутом височіння ПС. Як правило, для СРНС цей кут складає  $5-15^\circ$  і обумовлюється кривизною земної поверхні та наявним на ній рельєфом. Залежність кута височіння ПС ( $\theta$ ), який

знаходиться на висоті 8 км, від геодезичної віддалі наземного С до його опорної точки (L) при припущенні відсутності рельєфу місцевості було проілюстровано на рис. 2.

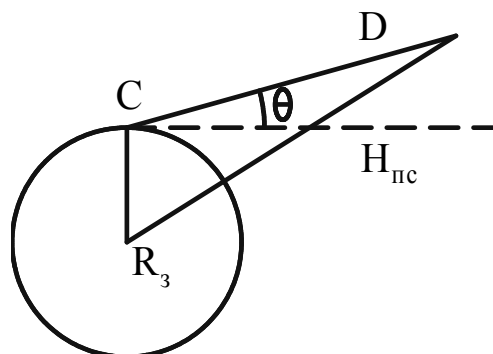


Рис. 1. Визначення дальності прямої видимості ПС з урахуванням кута височіння  $\theta$

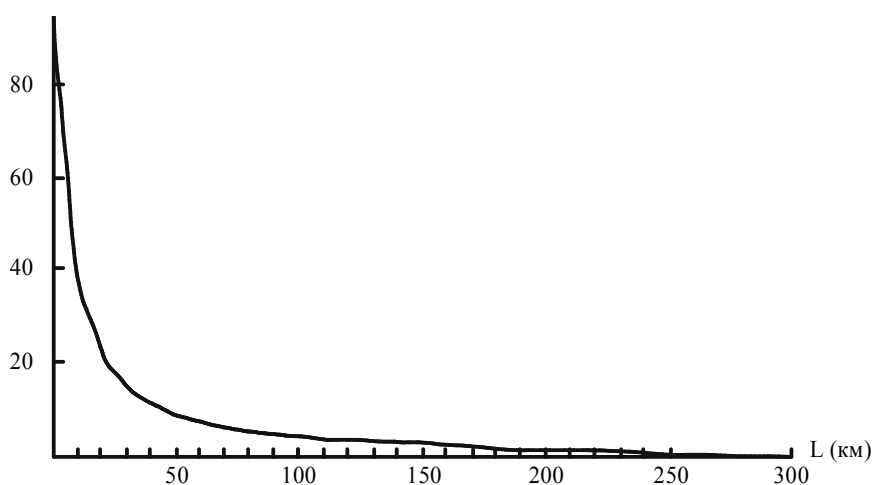


Рис. 2. Залежність кута височіння ПС від відстані С до опорної точки

З метою аналізу поля точності ПС РНС, побудованої на основі елементарної чарунки “трикутник з центральною точкою”, було обрано структуру, у якій усі ПС знаходяться на висоті 8000 м. У такому випадку довжина боків трикутника становить 70–80 км. Центр чарунки знаходиться у точці з координатами  $50,2^\circ$  пн.ш.,  $25,5^\circ$  сх.д.

Результати проведених розрахунків свідчать, що горизонтальний ГЧ (HDOP) для наземних С у межах робочої зони не перевищує 2 (рис. 3, а).

Вертикальний ГЧ (VDOP) у центрі дорівнює 1,9, а до краю зони підвищується до 12, що цілком обумовлюється співвідношенням горизонтальних та вертикальних розмірів системи.

На висоті 100 м зона прямої видимості збільшується до 250 км. HDOP у радіусі 60–80 км від центра чарунки не перевищує 10, а VDOP змінюється від 1,9 до 37 (рис. 3, б).

На перший погляд центральну РНТ у елементарній чарунці можна було б розташувати дещо нижче решти ПС, оскільки необхідний радіус дії цієї точки менший решти радіусів. Розглянемо як

зміниться поле точності у цьому випадку. Для цього розташуємо елементарну чарунку, як і раніше, трикутником, і підрахуємо значення ГЧ довкола неї. На рис.3 а,б показано поле ГЧ при розташуванні ПС на одній висоті (8 км). Рис.3, в ілюструє поле ГЧ при зменшенні висоти центрального ПС до 4,5 км, а на рис.3, г – при збільшенні висоти центрального ПС до 12 км. Як бачимо, при зміні висоти центрального ПС поле ГЧ є дуже неоднорідним, що пояснюється співвідношенням розташування деяких ПС та С, які знаходяться на окраїнах зони.

## Висновки

Проведене у рамках даної статті моделювання дає змогу зробити висновок, що при проектуванні ПС РНС характеристики її точності може бути оцінено за допомогою ГЧ, оскільки саме ГЧ є найбільш впливовим фактором, який зменшує точність вимірювань у ПС РС, тому виявляється необхідним провести дослідження неконтрольованого випромінювання джерел світла, що використовуються у якості наземної мережі псевдосупутників ПС.

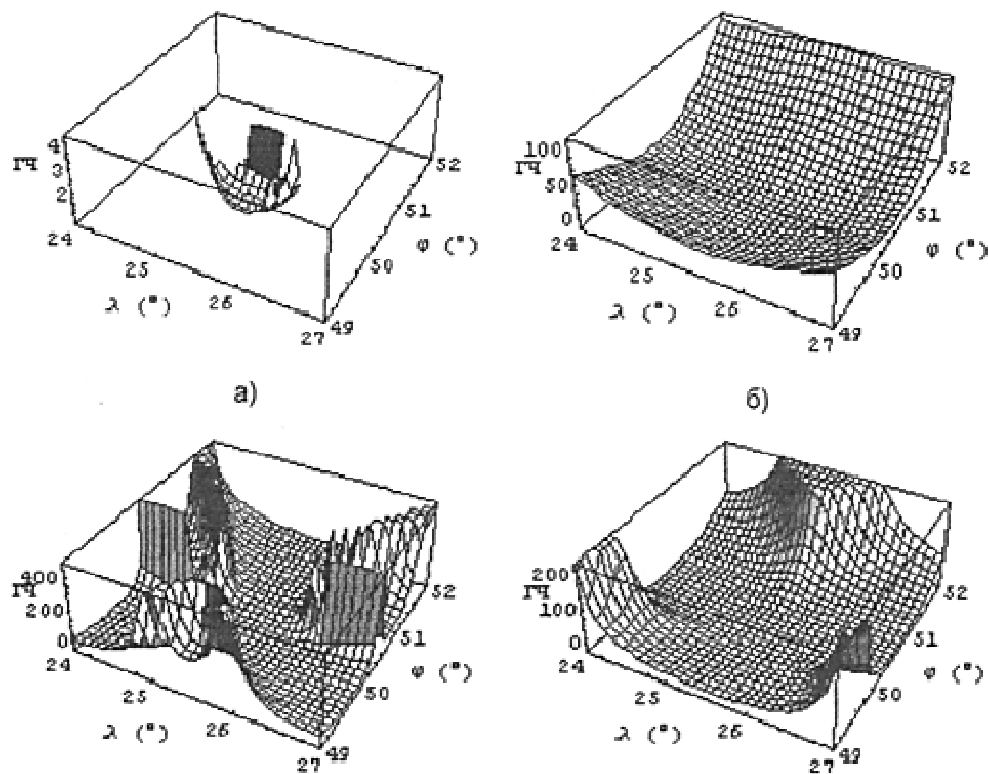


Рис. 3. Поле значень горизонтального ГЧ при різних висотах С та геометрії елементарної чарунки ПС

## Список літератури

1. Шебшаевич В.С. Введение в теорию космической навигации / В.С. Шебшаевич. – М: Сов. радио, 1971. – 296 с.
2. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации / Ю.А. Соловьев. – М: Эко-трендз, 2000. – 270 с.

3. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС / Под ред. В.Н.Харисова, А.И.Перова, В.А.Болдина. – М: ИПРЖР, 1999. – 560 с.

Надійшла до редколегії 1.12.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, Державний університет телекомунікацій, Київ.

## ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ФАКТОР И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПОГРЕШНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ В ПСЕВДОСПУТНИКОВОЙ РАДИОСИСТЕМЕ

О.В. Шульга, О.В. Шефер

Доказано, что соотношение между погрешностями определения первичных и вторичных навигационных параметров зависит только от вида матрицы градиентов потребителя (С), то есть от геометрии взаимного расположения псевдоспутников (ПС) и потребителя С. Проведенный анализ показал, что в общем виде выражение для геометрического фактора (ГЧ) может быть записано как отношение  $GDOP = \sigma_q / \sigma_D$ , где  $\sigma_q$  – среднеквадратичная погрешность (СКП) определения вектора состояния потребителя С;  $\sigma_D$  – СКП определения псевдодальностей к ПС. Определено, что на практике потребителей интересует степень ухудшения точности местоопределения отдельно в горизонтальной и вертикальной плоскостях относительно поверхности Земли, а также степень ухудшения точности определения поправок времени.

**Ключевые слова:** геометрический фактор, псевдоспутник, потребитель, псевдодальность, сотовая структура, угол возвышения, элементарная ячейка, прямая видимость, геодезическое расстояние.

## GEOMETRIC FACTOR AND ITS INFLUENCE ON NAVIGATION PARAMETERS DETERMINING ERROR IN PSEUDOSATELLITE RADIO SYSTEM

O.V. Shulga, O.V. Shefer

It is proved that the relation between errors definition of primary and secondary navigation parameters depends on the type of matrix consumer gradients (C), that is, the geometry of the mutual position of pseudosatellites (PS) and the consumer C. The analysis showed that in the general expression for the geometrical factor (MS) can be written as the ratio of  $GDOR = \sigma_q / \sigma_D$ , where  $\sigma_q$  – mean square error (MSE) of the consumer C state vector definition;  $\sigma_D$  – MSE to determine pseudorange to PS. It is determined that the practice of consumers interested in the degree of deterioration in the accuracy of positioning separate horizontal and vertical planes relative to the Earth's surface, as well as the degree of time corrections determining accuracy deterioration.

**Keywords:** geometric factor, pseudosatellite, consumer pseudorange, honeycomb structure, elevation angle, unit cell, line of sight, geodesic distance.