

УДК 621.396.98

А.О. Ткаченко, Ю.В. Резніков, В.М. Дейнеко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

ОСОБЛИВОСТІ АЛГОРИТМІВ РІШЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ ЗАДАЧІ В НАЗЕМНИХ ЛОКАЛЬНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ НАВІГАЦІЇ

Проведений аналіз основних проблем практичного використання існуючих супутникових радіонавігаційних систем (СРНС). Запропоновано створення наземних локальних радіонавігаційних систем на основі псевдосупутників, визначені особливості рішення навігаційної задачі, показана різниця у величині значень похибки лінеаризації при використанні псевдосупутників по відношенню до випадку використання СРНС.

Ключові слова: локальна радіонавігаційна система, псевдосупутник, похибка лінеаризації.

Вступ

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасний стан розвитку систем навігаційного забезпечення різноманітного призначення характеризується широким використанням супутникових навігаційних технологій. Внаслідок цього важливі об'єкти не можуть коректно функціонувати при відсутності можливості прийняття сигналів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) (GPS, ГЛОНАСС та ін.). До таких об'єктів відносяться аеродромні системи, системи навігації кораблів, системи контролю функціонування та управління залізничного транспорту, функціонування мобільного зв'язку тощо.

Поряд з перевагами СРНС, такими як висока точність, глобальність, незалежність від погодних умов, існує ряд недоліків, які є суттєвими при вирішенні завдань більшості навігаційних споживачів [1]. До таких недоліків у першу чергу відносять низький рівень сигналів СРНС, що робить приймачі СРНС сигналів уразливими до подавлення сигналами інших радіотехнічних засобів (телебачення, сигнали запиту дальності радіотехнічних систем ближньої навігації, радіолокаційні станції управління внутрішніх справ тощо), а також навмисними перешкодами. Низька ціна та доступність портативних пристроїв постановки перешкод СРНС через Internet свідчить про зростання ризику постановки перешкод існуючим СРНС у коротко та середньостроковій перспективі. Таки пристрої здатні подавляти приймачі сигналів всіх існуючих СРНС на площі більше десятків квадратних кілометрів або на відстані до 50 км. Згідно [2], кількість інцидентів застосування навмисних перешкод для прийому сигналів СРНС безперервно зростає, що унеможливує гарантовану та безпечну роботу критичних об'єктів інфраструктури навігаційних споживачів.

Ще одним недоліком СРНС є залежність від політики країн до яких належать ці системи. Навіть у провідних країнах світу, які самі володіють СРНС,

обговорюються та вирішуються питання щодо подолання цих недоліків. Для зменшення залежності від СРНС значна увага приділяється перспективним технологіям, таким як псевдосупутники (ПС), а також інерційні системи на базі цифрових карт місцевості і лазерних радарів, які призначені для створення високоточних військових систем.

Крім вказаних недоліків використання СРНС для рішення задач навігаційного забезпечення суттєво обмежено за умов утруднення прийому супутникових навігаційних сигналів внаслідок впливу перешкод, що пов'язані з особливостями рельєфу місцевості. Так, в гірських районах, в районах щільної забудови сигнали супутників блокуються природними чи штучними об'єктами і тому надійна супутникова навігація в таких районах не може бути забезпечена без прийняття спеціальних заходів.

Одним з можливих шляхів подолання недоліків СРНС є розробка та створення наземних локальних радіонавігаційних систем (ЛРНС) на основі псевдосупутників [3]. Такі системи призначені для створення стабільного та високоточного навігаційного поля у локальному районі та забезпечення високоточної навігації навіть в умовах відсутності СРНС-сигналів внаслідок дії ненавмисних або навмисних перешкод. Разом з тим, значна різниця у відстані від апаратури споживачів навігаційної інформації ЛРНС до ПС, з одного боку, та СРНС супутників, з іншого, визначає деякі особливості рішення навігаційної задачі для забезпечення високоточного позиціонування. Тому **метою статті** є дослідження процедур місцевизначення навігаційних споживачів при використанні інформації псевдосупутників з урахуванням особливостей їх функціонування.

Виклад основного матеріалу

З точки зору позиціонування ПС може розглядатися як "наземний супутник", оскільки він передає СРНС подібний сигнал. Тому загальновідомі підходи до високоточного супутникового позиціонування можуть бути застосовані у випадку інтегрованих

СРНС – псевдосупутникових ЛРНС. Частота сигналу ПС може бути різною, відомі дослідження [4] показують, що використання частот, відмінних від частот СРНС, дозволяє більш ефективно вирішувати проблему "близько-далеко". Незалежно від частоти випромінювання навігаційного сигналу ПС, без втрати загальності, математична модель псевдодалекості та фази несучої ПС може бути представлена як:

$$R_k^p = \rho_k^p + c \cdot (dt^p - dt_k) + T_k^p + dr_k^p + dm_k^p + \varepsilon_k^p, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \phi_k^p &= \frac{1}{\lambda_p} \rho_k^p + \frac{c}{\lambda_p} (dt^p - dt_k) + N_k^p + \\ &+ \frac{1}{\lambda_p} T_k^p + \frac{1}{\lambda_p} dr_k^p + \delta m_k^p + e_k^p, \end{aligned} \quad (2)$$

де R_k^p та ϕ_k^p – вимірювані псевдодалекість та фаза несучої від приймача k до ПС p відповідно; λ_p – довжина хвилі несучої частоти ПС; ρ_k^p – реальна відстань між приймачем k та ПС; c – швидкість світла; dt^p – зсув шкали часу ПС; dt_k – зсув шкали часу приймача; N_k^p – невизначеність фази; T_k^p – тропосферна затримка; dr_k^p – похибка місцевизначення ПС; dm_k^p та δm_k^p – похибка багатопроменевості для псевдодалекості та фази несучої відповідно; ε_k^p та e_k^p – похибка вимірювання псевдодалекості та фази несучої відповідно.

Відмінність умов проходження сигналів ПС та СРНС полягає у тому, що сигнал ПС не проходить через іоносферу, а розповсюджується у нижній тропосфері, тому вирази (1) та (2) не містять корекції іоносферної затримки. Тропосферна затримка у випадку ПС має розраховуватися за спеціальною моделлю компенсації або розраховуватися з вимірювань ПС [5, 6]. Тропосферна корекція вимірювань ПС подібна до тої, що використовується в пристрої електронного визначення відстані [7].

При високоточному позиціонуванні використовуються процедури подвійних різниць для виключення зсувів шкал часу ПС, супутників та приймача. Для ПС, що мають відмінну від СРНС частоту сигналу, об'єднання вимірювальної інформації виконується за процедурами, подібними до об'єднання GPS та ГЛОНАСС вимірювань. Такі процедури можуть застосовуватися при комбінуванні ПС з будь-якими СРНС (GPS, ГЛОНАСС, Galileo).

Ще одна особливість позиціонування в ЛРНС на основі ПС пов'язана із значною різницею у відстанях від приймача до ПС та супутників. У випадку винятково супутникового позиціонування похибки місцевизначення, які пов'язані з лінеаризацією нелінійних рівнянь вимірювань, є незначущими. Але у випадку використання ПС ці похибки, можуть стати

суттєвими.

Алгоритми вирішення навігаційної задачі переважно базуються на методі найменших квадратів та передбачають лінеаризацію рівнянь, таких як (1) та (2), в яких вимірювані псевдодалекості та фаза несучої нелінійно пов'язані з координатами приймача та випромінювача у визначеній системі координат.

Покажемо величину остаточної похибки лінеаризації для випадків супутникового та псевдосупутникового сигналів. При розкладанні нелінійної функції $F(\mathbf{x})$ в ряд Тейлора та обмежуючись елементами першого порядку маємо:

$$F(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}_0) + A\delta\mathbf{x} + R, \quad (3)$$

де \mathbf{x}_0 – приближене значення вектору параметрів \mathbf{x} ;

$A = \left. \frac{\partial F}{\partial \mathbf{x}} \right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_0}$ – вектор часткових похідних, розрахованих в точці \mathbf{x}_0 ; $\delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_0$;

R – остаточної член другого порядку:

$$R = \frac{1}{2} \delta\mathbf{x}^T \frac{\partial^2 F(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j} \delta\mathbf{x}, \quad (4)$$

де $\frac{\partial^2 F(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j}$ – матриця часткових похідних другого порядку (матриця Гессе), розрахована в точці $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + t \cdot \delta\mathbf{x}$, $0 < t < 1$.

В стандартних процедурах місцевизначення цей остаточної член ігнорується і, таким чином, він визначає похибку нелінійності моделі вимірювань. Границі такої похибки можуть бути визначені згідно [8] як:

$$\frac{1}{2} \lambda_{\min} |\delta\mathbf{x}|^2 \leq R \leq \frac{1}{2} \lambda_{\max} |\delta\mathbf{x}|^2, \quad (5)$$

де λ_{\min} , λ_{\max} – найменше та найбільше характеристичні числа матриці $\frac{\partial^2 F(\mathbf{x})}{\partial x_i \partial x_j}$.

Для моделі відстані між двома точками \mathbf{x}_i , \mathbf{x}_j з координатами, (x_i, y_i, z_i) та (x_j, y_j, z_j) відповідно:

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}, \quad (6)$$

позначивши $x_{ij} = x_i - x_j$, $y_{ij} = y_i - y_j$, $z_{ij} = z_i - z_j$,

матриця Гессе має вигляд:

$$\frac{\partial^2 d_{ij}}{\partial \mathbf{x}} = \begin{vmatrix} y_{ij}^2 + z_{ij}^2 & -x_{ij}y_{ij} & -x_{ij}z_{ij} \\ -x_{ij}y_{ij} & x_{ij}^2 + z_{ij}^2 & -y_{ij}z_{ij} \\ -x_{ij}z_{ij} & -y_{ij}z_{ij} & x_{ij}^2 + y_{ij}^2 \end{vmatrix} \quad (7)$$

з екстремальними характеристичними числами:

$$\lambda_{\min} = 0, \quad \lambda_{\max} = \frac{1}{d_{ij}}. \quad (8)$$

З виразу (5) границі похибки лінеаризації визначаються як:

$$0 \leq R \leq \frac{|\delta\mathbf{x}|^2}{2d_{ij}}. \quad (9)$$

При сумісному СРНС та ПС позиціонуванні, відстані d_{ij} варіюються від 20000 км між приймачем та супутником, до сотень метрів між приймачем та ПС.

На рис. 1, 2 показана максимальна похибка місцевизначення, пов'язана з лінеаризацією рівнянь вимірювань.

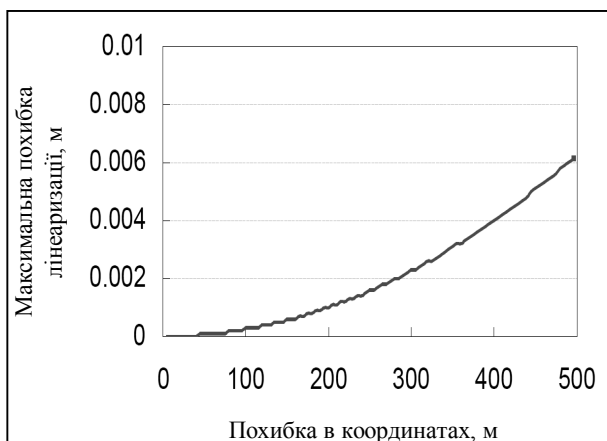


Рис. 1. Максимальна похибка лінеаризації як функція похибки координат для випадку супутникового сигналу (відстань 20000 км)

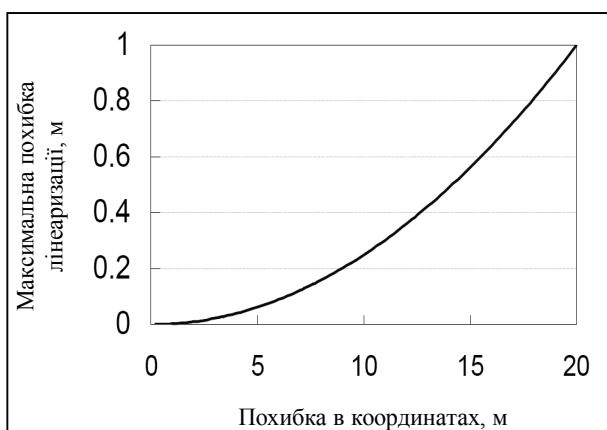


Рис. 2. Максимальна похибка лінеаризації як функція похибки координат для випадку псевдосупутникового сигналу (відстань 200 м)

ВИСНОВКИ

Для типової відстані між супутниками СРНС та наземним приймачем похибка в одній компоненті координат в 200 м має наслідком лише 1 мм похибку лінеаризації. Однак, за відстані між приймачем та ПС лише 200 м похибка в 15 м в одній компоненті координат призводить до 0,6 м похибки лінеаризації, що значно більше похибки вимірювання фази та може привести до розходження обчислювального процесу.

Список літератури

1. Будущее позиционирования: обзор технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.pcmag.ru>.
2. National PNT Advisory Board comments on jamming the GPS. – A national Security Threat: Recent Events and Potential Cures. – 2010.
3. Barltrop K.J. Local DGPS with pseudolite augmentation and implementation considerations for LAAS / K.J. Barltrop, J.F. Stafford, B.D. Elrod // Proceedings of 9th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation GPS ION-96 (17-20 Sept. 1996). – Kansas City, Institute of Navigation, 1996. – P. 449-459.
4. Galijan R.C. A suggested approach for augmenting GNSS category III approaches and landings: the GPS/GLONASS and GLONASS pseudolite system / R.C. Galijan, G.V. Lucha // Proceedings of 6th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation (22 – 24 Sept. 1993). – Salt Lake City, Institute of Navigation, 1993. – P. 157-160.
5. Morley T.G. Augmentation of GPS with pseudolites in a marine environment / T.G. Morley. – Calgary: University of Calgary, 1997. – 144 p.
6. Hein G.W. Practical investigation on DGPS for aircraft precision approaches augmented by pseudolite carrier phase tracking / G.W. Hein, B. Eissfeller, W. Werner et al. // Proceedings of 10th Int. Tech. Meeting of the Satellite Division of the U.S. Inst. of Navigation (16–19 Sept. 1997). – Kansas City, Institute of Navigation, 1997. – P. 1851-1860.
7. Rueger J.M. Electronic distance measurement / J.M. Rueger. – Berlin, New York: Springer, 1996. – 276 p.
8. Teunissen P.J. Nonlinear inversion of geodetic and geophysical data: Diagnosing nonlinearity / P.J. Teunissen, F.K. Brunner, C. Rizos // Developments in Four-Dimensional Geodesy, Springer-Verlag. – 1987. – P. 241-264.

Надійшла до редколегії 30.01.2012

Рецензент: д-р техн. наук, с.н.с. В.О. Василець, Харківський університет Повітряних Сил, Харків.

ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ В НАЗЕМНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ

А.А. Ткаченко, Ю.В. Резников, В.Н. Дейнеко

Проведен анализ основных проблем практического использования существующих глобальных навигационных спутниковых систем. Предложено создание наземных локальных радионавигационных систем на основе псевдоспутников, определены особенности решения навигационной задачи, показана разница в величине значений погрешности линейризации при использовании псевдоспутников по отношению к случаю использования существующих глобальных навигационных спутниковых систем.

Ключевые слова: локальная радионавигационная система, псевдоспутник, погрешность линейризации.

FEATURES OF POSITIONING ALGORITHMS IN LOCAL GROUND RADIONAVIGATION SYSTEMS

A.A. Tkachenko, U.V. Reznikov, V.N. Deyneko

The analysis is performed for the main problems of practical use of the present global navigation satellite systems (GNSS). It is suggested creating of a ground local pseudolite-based radionavigation system, developed particular features of positioning algorithms, showed the difference between linearization errors when using either pseudolites or present GNSS.

Keywords: local radionavigation system, pseudolite, linearization error.