

Д.П. Велешук, асист.

Житомирський державний технологічний університет

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СУПУТНИКОВОЇ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ GPS З ВРАХУВАННЯМ ВНУТРІШНЬОСИСТЕМНИХ ЗАВАД

(Представлено д.ф.-м.н., проф. Москвіним П.П.)

*На основі побудованої математичної моделі встановлено збільшення похибки місцевизначення внаслідок внутрішньосистемних завад. Встановлено неоптимальність вибору робочого сузір'я супутників за мінімумом значення геометричного фактора. Запропоновано нове правило вибору робочого сузір'я супутників та перевірено його ефективність.*

**Постановка проблеми.** Сьогодні основними джерелами інформації про місцезнаходження об'єктів є супутникові радіонавігаційні системи (СРНС), в основі принципу роботи яких лежить прийом та обробка супутникових радіосигналів. Важливою особливістю утворених таким чином радіоліній, є наявність значних послаблень радіосигналу, що спричинені великою відстанню між приймачем (ПРМ) та космічним апаратом (КА). Достовірність та точність визначення місцеположення споживача залежить від багатьох чинників. Одним з них є кількість супутників, що знаходяться у зоні радіовидимості. Зі збільшенням цієї кількості зростає можливість вибору оптимального робочого сузір'я для забезпечення мінімального значення похибки місцевизначення. З самого початку створення СРНС GPS вибір робочого сузір'я проводився за мінімумом значення геометричного фактора [1]. На сьогодні, незважаючи на збільшення різноманіття структури приймачів на ринку апаратури споживачів (АС) СРНС, цей метод є найбільш розповсюдженим. Важливим недоліком цього методу є неврахування енергетичних співвідношень у радіотрактах АС, тобто відношення сигнал-шум. АС призначена для цивільного використання має відносно низьку заводо захищеність, що підтверджено у ряді робіт, наприклад [2]. Найбільшого впливу на АС завдають гармонічні коливання, частота яких близька до частоти несучого коливання радіосигналу грубої точності. У СРНС GPS використовується кодове розділення сигналів різних супутників, тобто значення несучої частоти є однаковим для всіх супутників, на відміну від системи ГЛОНАСС. Таким чином, виникають внутрішньосистемні завади, що впливають на точність місцевизначення. Тому виникає необхідність врахування дії цих завад та пошуку оптимального правила вибору робочого сузір'я. Можливо довести, що сигнали різних КА на вході ПРМ не є рівноправними, а вибір робочого сузір'я за критерієм максимальної точності місцевизначення може залежати не тільки від геометричного фактора, а і від взаємного впливу сигналів різних КА. Такі дослідження є актуальними, оскільки точність місцевизначення у будь-якій радіонавігаційній системі часто виступає визначальним фактором.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Моделюванню СРНС присвячено багато праць, наприклад [2, 3], але відомостей про взаємний вплив випромінювань КА та оптимальність вибору робочого сузір'я КА недостатньо. Характерною особливістю робіт у даному напрямку є відсутність комплексного підходу до процесів у СРНС. Роботи присвячені висвітленню особливостей розповсюдження радіохвиль у СРНС, як, наприклад у [2], або побудові математичної моделі вузлів приймача АС як в [3], чи якісному аналізу процесів. Питанням заводостійкості та електромагнітній сумісності СРНС також завжди приділялась значна увага. Наприклад, в [2] представлено норми заводостійкості СРНС у разі гармонійної, шумоподібної та імпульсної завад. Після аналізу наведених в [2] матеріалів можна зробити висновки, що найбільший вплив на роботу СРНС мають звичайні синусоїдальні та шумоподібні коливання. Слід зазначити, що деякі норми на заводостійкість радіоканалів СРНС призначені для цивільних споживачів і не розраховані на влаштування навмисних завад. Цим можна пояснити відсутність норм на заваду, яка є копією сигналів, випромінюваних супутниками.

**Формулювання цілей статті.** Метою статті є аналіз процесів прийому та обробки радіонавігаційних сигналів у СРНС GPS з врахуванням явища впливу випромінювань КА, що знаходяться в зоні радіовидимості, на точність місцевизначення. Також частковою метою є формулювання правила оптимального вибору робочого сузір'я КА за критерієм мінімуму похибки місцевизначення.

**Викладення основного матеріалу.** Використовуючи відомості про СРНС GPS можливо провести розрахунок енергетики радіолінії "КА-АС". Основним рівнянням, яке використовується для визначення рівня потужності радіосигналу на вході приймача є [4]:

$$P_{IDi}(\beta) = P_{IDA} + \eta_{IDA} + G_{IDA} + F_{IDA}(\varphi) + L(\beta) + L_{A\dot{o}i}(\beta) + F_{IDi}(\beta) + G_{IDi} + \eta_{IDi}, \quad (1)$$

де  $\beta$  – кут над лінією горизонту під, яким спостерігається КА з точки розташування АС;  $P_{ПРД}$  – потужність бортового передавача, розміщеного на КА, яка становить 50 Вт [5];  $\eta_{ПРД}$ ,  $\eta_{ПРМ}$  – значення послаблення радіосигналу в антеннофідерних трактах передавача та приймача, значення яких може бути прийнятим  $-2,7$  дБ [5];  $G_{ПРД} = 14,7$  дБ,  $G_{ПРМ} = 51$  дБ – коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен;  $\varphi$  – кут між лінією, що з'єднує КА та підсупутникову точку і напрямком на приймач з КА;  $F_{ПРД}(\varphi)$ ,  $F_{ПРМ}(\beta)$  – діаграми направленості передавальної та приймальної антен;  $L(\beta)$ ,  $L_{АТМ}(\beta)$  – значення згукань електромагнітних хвиль у вільному просторі та в атмосфері.

Враховуючи те, що середнє значення температури АС зазвичай може бути прийнятим  $17^\circ\text{C}$ , то користуючись методикою з [4] можливо визначити еквівалентне значення шумової температури приймача  $= 386$  К. Тоді рівень потужності шуму на вході приймача:

$$P_{\phi} = k \cdot T_{\Sigma} \cdot \Delta f_{IDi} = 140, \tag{2}$$

де  $k$  – стала Больцмана;  $\Delta f_{ПРМ} = 2$  Мгц – ширина смуги пропускання приймача GPS [7].

Завдяки виразам (1) та (2) можливо визначити рівень потужності корисного сигналу, від одного КА, на вході приймача та відношення сигнал–шум при довільному розташуванні КА над лінією горизонту. На рисунку 1 надано залежність відношення сигнал–шум на вході приймача при прольоті КА над споживачем через точку зеніту. При моделюванні вважається, що у зоні радіовидимості знаходиться тільки один КА. Як приймальну антену, використана антена TOKO DAK 1575MS50, яка має типові для GPS антен, значення параметрів. Як функції діаграм направленості передавальної та приймальної антен, використані апроксимуючі поліноми шостого та четвертого степеня відповідно. Абсолютна похибка апроксимації не перевищує  $0,2$  дБ, для функції ДН передавальної антени та  $0,6$  дБ – для приймальної антени. Згукання в атмосфері розраховане за методикою описаною в [6, 4] і враховує згукання в парах води та кисні, при значенні частоти несучого колювання радіосигналу грубої точності й значенні абсолютної вологості атмосфери, що становлять  $f_0 = 1,575$  ГГц та  $\rho = 7$  г/м<sup>3</sup> відповідно.

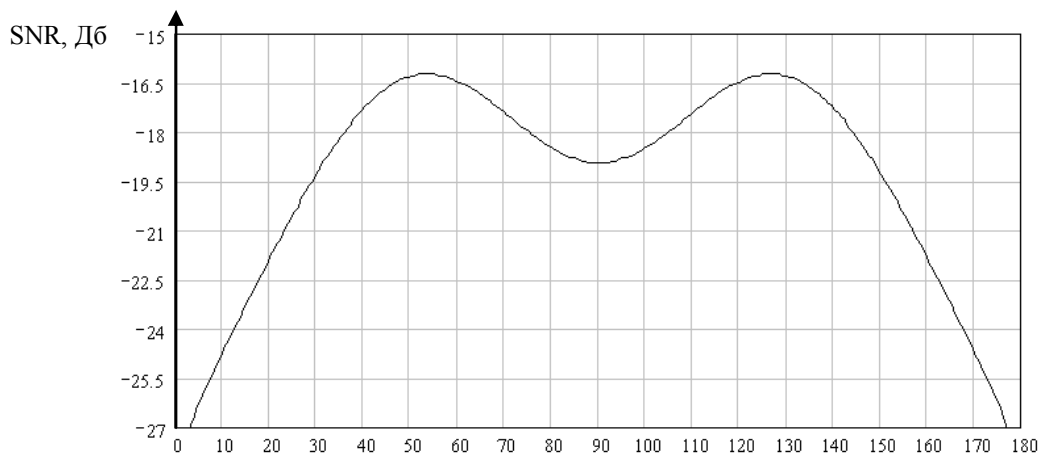


Рис. 1. Залежність відношення сигнал–шум на вході приймача при прольоті КА над ПРМ через зеніт

Характерний центральний провал у отриманій характеристиці є наслідком використання на КА спеціальної фазованої антенної решітки [5].

Внаслідок наявності шумів у радіотрактах АС, виникає шумова похибка виміру квазідальності до кожного  $i$ -го супутника [7]:

$$\varepsilon_{ш}^2 = (c \cdot \tau)^2 \frac{0,5 B_{CC3}}{SNR_i \cdot \Delta f_{ПРМ}}, \tag{3}$$

де  $c$  – швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль у вільному просторі;  $\tau = 0,978$  мкс тривалість одного символу коду Голда;  $B_{CC3} = 1$  Гц ширина смуги пропускання схеми слідкування за затримкою [7];  $SNR_i$  – значення відношення сигнал–шум;

При цьому, похибка місцевизначення [1, 2]:

$$\sigma' = \sigma_{\kappa} \cdot GDOP, \tag{4}$$

де  $\sigma_k = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \varepsilon_{IIIi}^2}$  при статистичній незалежності вимірів квазідальності до чотирьох КА;  $GDOP$  – значення просторово-часового геометричного фактора.

Якщо вважати статистичний розподіл значень похибок місцевизначення нормальним, то можливо стверджувати, що сфера радіусом  $R = \sigma = 3\sigma'$  вміщує точку розміщення користувача з ймовірністю 0,997.

У роботах [8, 9] представлено вирази, що дають можливість врахування міжканальних завад при кодовому розподілі сигналів у системі. Еквівалентне значення рівня шуму, для системи GPS, з врахуванням міжканальних завад:

$$P'_{III} = P_{III} + 0,5 \sum_{i=1}^{N-1} P_{PPMi}(\beta_i). \quad (5)$$

Тоді еквівалентне значення відношення сигнал–шум:

$$SNR' = P_{PPM} - P'_{III}. \quad (6)$$

Слід зазначити, що внаслідок залежності значення відношення сигнал-шум від положення КА над лінією горизонту шумова похибка виміру квазідальності також є функцією кута  $\beta$ . Отже при виборі робочого сузір'я необхідно враховувати не тільки геометричне розташування КА, а й рівні потужності їх сигналів на вході ПРМ. Аналітичний вираз для правила, за яким можливо зробити вибір робочого сузір'я, можна записати так:

$$K = 0,1GDOP \sqrt{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{SNR'_i}}. \quad (7)$$

Згідно з правилом (7), робочим треба вибирати те сузір'я, для якого значення  $K$  є мінімальним.

Таким чином, завдяки виразам (1)–(7) можливо дослідити вплив міжканальних завад на точність місцевизначення та перевірити оптимальність запропонованого критерію.

Процес моделювання виконано для інтервалу часу 12 годин (період одного оберту КА). Кожні півгодини було проведено розрахунок похибки місцевизначення для сузір'я з мінімальним значенням просторово-часового геометричного фактора та сузір'я з мінімальним значенням  $K$ . Моделювання проведено на проміжок місцевого часу 15<sup>00</sup>, 25 травня 2011 року, по 3<sup>00</sup>, 26 травня 2011 року. Координати точки розміщення споживача становлять 50° 15' західної широти та 28° 40' східної довготи. Висота над рівнем моря 230 м.

На рисунку 2 надано залежність значення похибки місцевизначення у часі без врахування міжканальних завад, на рисунку 3 – залежність значення похибки місцевизначення у часі з врахуванням міжканальних завад. З рисунків видно, що у певні моменти часу сузір'я з мінімальним значенням геометричного фактора не є оптимальним, за критерієм мінімуму похибки місцевизначення.

Застосувавши методи статистичної обробки до отриманих у результаті досліджень вибірок можливо навести значення похибок місцевизначення з надійністю 0,95. Середнє значення, за півдоби, похибки місцевизначення при використанні, як робочих, сузір'їв з мінімальним значенням просторово-часового геометричного фактора становить 29±2 м, без врахування міжканальних завад і 30±3 м з врахуванням міжканальних завад. При використанні робочих сузір'їв з мінімальним значенням  $K$ , з врахуванням і без врахування міжканальних завад, середнє значення похибки місцевизначення, за півдоби, становить 28±2 м. При цьому в певні фіксовані моменти часу використання сузір'я супутників з мінімальним  $K$  дає суттєвий вигравш у точності. Це спостерігається у моменти 1 год. 30 хв., 7 год. 0 хв. та 11 год. 30 хв. після початку моделювання.

$\sigma(t)$ , м

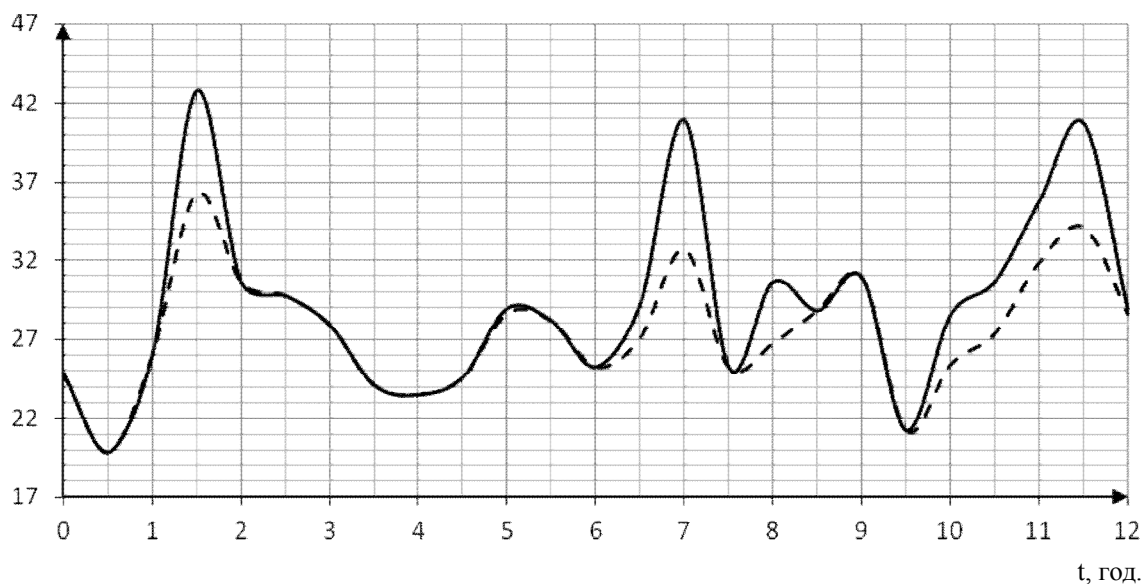


Рис. 2. Значення похибки місцевизначення. Суцільна крива – сузір'я обрані за мінімальним GDOP, штрихова крива – сузір'я обрані за мінімальним  $K$

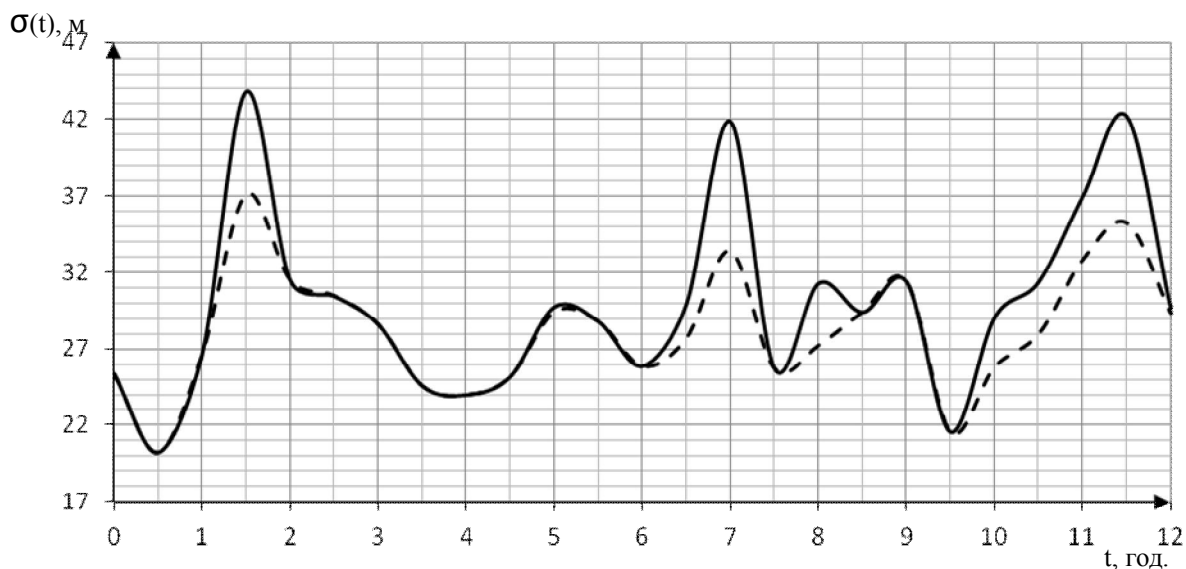


Рис. 3. Значення похибки місцевизначення з врахуванням міжканальних завад. Суцільна крива – сузір'я обрані за мінімальним GDOP, штрихова крива – сузір'я обрані за мінімальним  $K$

Слід зазначити, що отримані результати справедливі для одноканальної АС, яка працює за робочим сузір'ям з чотирьох КА, або для чотириканальної АС, яка не використовує обробку збиткових вимірів та не проводить статистичного накопичення вимірів у часі. Тобто використовується АС з пониженим енергоспоживанням, яка вимірює своє місцеположення кожні півгодини з автоматичним переходом у режим “сну” на протязі часу між вимірами.

На рисунку 4 наведено залежність значення погіршення точності місцевизначення, внаслідок наявності міжканальних завад у часі.

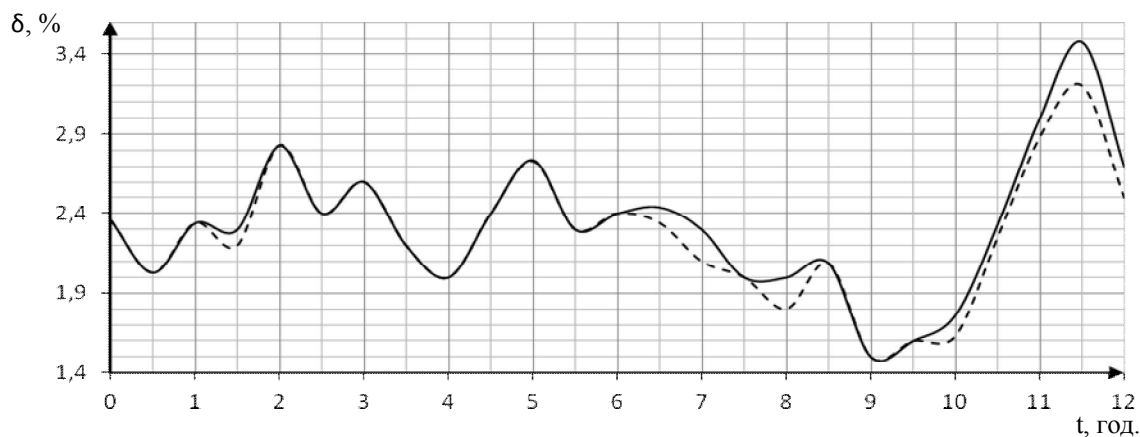


Рис. 4. Залежність значення погіршення точності місцевизначення, внаслідок наявності міжканальних завад, від часу. Суцільна крива – сузір'я обрані за мінімальним GDOP, штрихова крива – сузір'я обрані за мінімальним K

**Висновки.** У результаті проведеного аналізу встановлено, що значення похибки місцевизначення, усереднене за півдобу, може бути зменшене на два метри, за рахунок нового правила вибору робочих супутників. При цьому максимальна різниця, за півдобу, між похибками для різних варіантів правила вибору робочих сузір'їв становить 9 м. Це еквівалентно виграшу з точністю 20 % при використанні запропонованого правила. Вибір робочого сузір'я за сформульованим правилом також зменшує вплив міжканальних завад на точність місцевизначення, так як при цьому обираються супутники з більшими значеннями відношення сигнал–шум.

**Перспективи подальших досліджень у даному напрямку.** Розроблена модель може бути використана для проведення аналогічних досліджень з використанням багатоканальної АС. Актуальним напрямком досліджень є встановлення оптимальної кількості супутників робочого сузір'я та їх вибір з усієї кількості видимих КА, оскільки використання багатоканальної АС стрімко зростає.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Шкирятов В.В. Радионавигационные системы и устройства / В.В. Шкирятов. – М. : Радио и связь, 1984. – 160 с.
2. Бабак В.П. Супутникова радіонавігація / В.П. Бабак, В.В. Конін, В.П. Харченко. – К. : Техніка, 2004. – 328 с.
3. Разработка метода учёта условий распространения радиоволн в спутниковых радионавигационных системах / С.Е. Ломоносов, А.П. Рачинский, А.Л. Павловский и др. // Системы управления, навигации та зв'язку. – Евпатория : НКАУ, 2009. – Вып. 3 (11). – С. 24–26.
4. Кантор Л.Я. Спутниковая связь и вещание / Л.Я. Кантор. – М. : Радио и связь, 1988. – 345 с.
5. Parkinson B.W. Global Positioning System: Theory and applications / B.W. Parkinson, J.J. Spilker. – Vols. 1 and 2. – Washington, DC, American institute of Aeronautics. – 370 L'Enfant Promenade, SW, 1996. – 601 p.
6. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах / В.Ф. Михайлов, Т.Н. Нарытник, И.В. Браги и др. – СПб. : СПбГУАП, 2003. – 337 с.
7. Шебшаевич В.С. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П. Дмитриев, Н.В. Иванцевич ; под ред. В.С. Шебшаевича. – 2-ое изд., перераб. и доп. – М. : Радио и связь, 1993. – 408 с.
8. Ипатов В.П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / В.П. Ипатов. – СПб. : Техносфера, 2007. – 373 с.

ВЕЛЕЩУК Дмитро Петрович – асистент кафедри фізики Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання супутникових радіонавігаційних систем.

E-mail: velesh@ukr.net

Подано 19.10.2011

