

УДК 621.317.08

А.В. Рудик, к.т.н.

## ОЦІНКА ТОЧНОСТІ НАВІГАЦІЙНО-ЧАСОВИХ ВИЗНАЧЕНЬ В СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Національний авіаційний університет, andrey05011971@mail.ru

*В статті показано, що іоносферна та тропосферна похибки при навігаційно-часових визначеннях мають як систематичну, так і випадкову складові. Величина іоносферної похибки визначається електронною концентрацією в іоносфері, не залежить від розташування супутників та впливає на точність визначення висоти і відхилення бортового годинника від системного часу. Затримка сигналу в тропосфері істотно залежить від кута місця розташування навігаційного супутника. Для зменшення похибок бортової апаратури використовують апаратні методи підвищення стабільності шкали та алгоритмічні методи, основані на відомих математичних моделях поведінки бортових еталонів, що дозволяє прогнозувати відхилення. Основним джерелом шумових та динамічних похибок приймального пристрою є схеми стеження за затримкою оригінальної та носійного сигналу, а також опорний генератор, основним впливовим чинником якого є короткочасна нестабільність частоти. Складено бюджет похибок визначення псевдодальності і псевдошвидкості та з'ясовано їх потенційні значення (відповідно 6.3 м та 0.09 м/с).*

**Ключові слова:** навігаційно-часові визначення, багатопроменеве поширення сигналу, тропосферне та іоносферне запізнення сигналу, релятивістський та гравітаційний ефекти, похибка вимірювання, псевдодальність, псевдошвидкість, ефемеридне забезпечення.

### Вступ

Навігаційно-часовими визначеннями (НЧВ) є формування оцінок координат, складових швидкості мобільного об'єкту та поточного часу в результаті обробки радіосигналів, прийнятих від навігаційних супутників (НС). Зазвичай точність НЧВ визначається двома типами похибок: похибками, що виникають на етапі первинної обробки, та похибками, що відповідають етапу вторинної обробки. Тому що при первинній обробці формуються оцінки дальностей (псевдодальностей) та швидкостей (псевдошвидкостей), то похибками для даного етапу є похибки визначення псевдодальності та псевдошвидкості. Складові похибки, що виникають на етапі первинної обробки, при визначенні псевдодальності дальномірним методом розглянуті в [1], а складові похибки етапу первинної обробки визначення псевдошвидкості – в роботах [1, 2]. На етапі вторинної обробки оцінки псевдодальності та псевдошвидкості перераховуються в оцінки координат мобільного об'єкта, тому похибки цього етапу визначаються факторами, які впливають на ефективність перерахунку.

Похибку, що виникає на етапі вторинної обробки, можна розділити на такі складові:

- похибки, що виникають внаслідок неповного врахування умов поширення радіохвиль (вплив тропосфери та іоносфери на запізнення сигналу, вплив релятивістських та гравітаційних ефектів, вплив багатопроменевого поширення сигналу);
- похибки бортової апаратури та апаратури мобільного об'єкта;
- похибки, що вносяться на етапі розв'язання навігаційної задачі;
- похибки ефемеридного забезпечення.

Метою статті є аналіз та оцінка складових похибки, що виникає на етапі вторинної обробки навігаційно-часових визначень.

**Постановка задачі.** В статті необхідно:

- 1) проаналізувати складові похибки, що виникає на етапі вторинної обробки навігаційно-часових визначень;
- 2) скласти бюджет похибок визначення псевдодальності і псевдошвидкості та з'ясувати їх потенційні значення для реальної апаратури

**Розв'язок задачі.** Проведемо аналіз складових похибки, що виникає на етапі вторинної обробки НЧВ.

### Похибки, що виникають внаслідок неповного врахування умов поширення радіохвиль

Похибки, що виникають на трасі поширення сигналу, є найменш передбачуваними і тому можуть суттєво впливати на точність місцевизначення. Атмосфера Землі здатна впливати на поширення радіохвиль, при цьому цей вплив не завжди підлягає прогнозуванню. Рефракція радіохвиль, яка проявляється у викривленні шляху поширення, також вносить додаткові затримки сигналу.

На поширення радіохвиль впливають тропосфера, розташована біля поверхні Землі та до висоти 12...18 км, та іоносфера, яка є шаром атмосфери від 60...100 км та до 500...1000 км.

Тропосферна складова похибки вимірювань обумовлена наявністю тропосферної рефракції. Затримка сигналу в тропосфері може складати величину 8...80 нс, що відповідає похибці вимірювання псевдодальності 2,4...24 м.

Для зменшення впливу атмосферних похибок рекомендується виключати з навігаційних розрахунків результати вимірювань за сигналами НС, кут місця яких менший 10°. Однак такий підхід приводить до зменшення кількості НС, доступних для проведення вимірювань.

Тому що для діапазону робочих частот навігаційних систем типу GPS та GLONASS тропосферна рефракція не залежить від частоти сигналу, виключити цю затримку двочастотним способом неможливо. Однак значення тропосферної похибки залежить від факторів, які досить точно можна визначити: атмосферного тиску, температури та вологості повітря, а також кута місця НС (кута підняття над горизонтом).

Тропосферна складова похибки вимірювання псевдодальності  $T$  складається з двох компонент – перша ( $T_d$ ) визначається впливом сухої атмосфери, а друга ( $T_w$ ) залежить від вмісту водяних парів в атмосфері:  $T = T_d + T_w$ .

Для компенсації тропосферної похибки вимірювання псевдодальностей використовують різні моделі [3], найбільш поширеними з яких є моделі Хопфілда та Саастмоїнена. Модель тропосфери Саастмоїнена є залежністю виду

$$T = \frac{0.002277}{\cos z} \left( p + \left( \frac{1255}{t} + 0.05 \right) \cdot e - t g^2 z \right), \tag{1}$$

де  $z$  – зенітний кут, град;  $p$  та  $e$  – атмосферний та парціальний тиск, мб;  $t$  – температура, К.

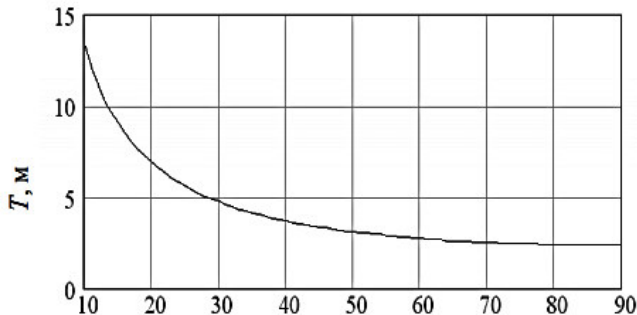
Згідно моделі Хопфілда тропосферні складові похибки визначаються таким чином:

$$T_d = \frac{1.5528 \cdot 10^{-5} \cdot p}{\sin \sqrt{\gamma^2 + 6.25}} \cdot t \cdot [40136 + 148.72 \cdot (t - 273.16)]; \tag{2}$$

$$T_w = 0.0022 \cdot \frac{e \cdot (3.718 \cdot 10^{-5} - 12.96t)}{t^2 \sin \sqrt{\gamma^2 + 2.25}}, \tag{3}$$

де  $\gamma$  – кут місця НС.

Як показують розрахунки, при однакових вхідних параметрах моделі Саастмоїнена та Хопфілда дають однакові величини похибки. На рис. 1 наведена залежність тропосферної складової похибки вимірювання псевдодальностей від кута місця при типових даних  $p = 1003$  мб,  $t = 289.65$  К,  $e = 8$  мб, що відповідає  $t = 16.5$  °С, відносній вологості 46% та атмосферному тиску 103 кПа [3]. Чутливість моделі тропосфери до варіацій її параметрів визначається при розкладанні співвідношення (1) в ряд Тейлора:



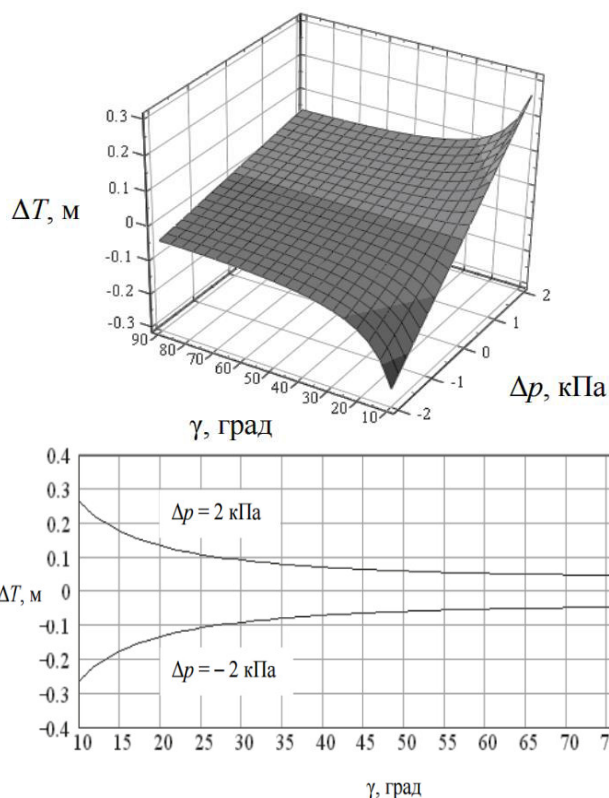
$$\Delta T \approx \left. \frac{\partial T}{\partial p} \right|_{p_0, e_0, t_0} \cdot \Delta p + \left. \frac{\partial T}{\partial e} \right|_{p_0, e_0, t_0} \cdot \Delta e + \left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{p_0, e_0, t_0} \cdot \Delta t = S_p \Delta p + S_e \Delta e + S_t \Delta t =$$

$$= \frac{0.002277}{\cos(90 - \gamma)} \cdot \left\{ \Delta p + \left( \frac{1255}{t} + 0.05 \right) \cdot \Delta e - \frac{1255 \cdot e}{t^2} \cdot \Delta t \right\},$$

$\Delta p$ ,  $\Delta e$  та  $\Delta t$  – відповідно похибки вимірювання атмосферного тиску, парціального тиску водяної пари та температури;  $p_0$ ,  $e_0$ ,  $t_0$  – точні значення параметрів моделі тропосфери;  $S_p$ ,  $S_e$ ,  $S_t$  – функції чутливості моделі тропосфери до похибок вимірювання відповідно атмосферного тиску, парціального тиску водяної пари та температури. Якщо значення похибок вимірювання метеопараметрів не перевищують значень  $\Delta p = \pm 2$  кПа;  $\Delta e = \pm 2\%$ ;  $\Delta t = \pm 2$  °С, то другий та третій доданки у співвідношенні (4) не будуть суттєво впливати на величину  $\Delta T$ .

Таким чином, тільки похибка вимірювання атмосферного тиску буде суттєво впливати на похибку визначення тропосферної складової похибки вимірювання псевдодальностей [3], тобто

$$\Delta T \cong \frac{0.002277}{\cos(90 - \gamma)} \cdot \Delta p \text{ (рис. 2).}$$



**Рис. 2. Похибка визначення тропосферної складової похибки вимірювання псевдодальності в залежності від кута місця НС та похибки вимірювання атмосферного тиску**

Максимальні значення похибки  $\Delta T$  можна визначити за рис. 3. Проведені розрахунки дозволяють зробити висновок, що якщо максимальна похибка вимірювання атмосферного тиску не перевищує 2 кПа, то похибка визначення тропосферної похибки вимірювання псевдодальності не перевищує 0.3 м при куті місця НС більше  $10^\circ$ , що можна вважати достатнім результатом.

**Рис. 3. Похибка визначення тропосферної складової похибки вимірювання псевдодальності в залежності від кута місця НС**

Рефракція в іоносфері обумовлена неоднорідностями та зміною діелектричної проникності в залежності від висоти. Затримку сигналу з частотою  $f$  можна апроксимувати співвідношенням

$$\Delta t_i = \frac{a}{f^2} + \frac{b}{f^3} + \frac{c}{f^4} + \dots \approx \frac{a}{f^2}.$$

(5)

Експериментально доведено [4], що другим та третім доданками можна знехтувати. Для робочої частоти GPS значення затримки сигналу оцінюється величиною 0.25 нс. Основна проблема при компенсації іоносферної затримки полягає в тому, що значення затримки дуже змінюється в залежності від регіону, в якому розташований приймальний пристрій, часу доби та року, а також сонячної та геомагнітної активності. Затримка може складати приблизно 10 нс (3 м) вночі та доходити до 50 нс (15 м) вдень. Для невеликих кутів місця  $\alpha = 0 \dots 10^\circ$  додаткова затримка сигналу, обумовлена впливом іоносфери, може збільшитися до 3 разів у порівнянні з випадком поширення сигналу з точки зеніту та складає від 30 нс (9 м) вночі та до 150 нс (45 м) вдень.

Іоносферні затримки необхідно враховувати, якщо потрібно досягти точності визначення координат менше 8 м. В СРНС GPS для цього використовується постійний моніторинг стану іоносфери, який включає спостереження за сонячною активністю, прямі та непрямі методи вимірювання концентрації вільних електронів в іоносфері, а також апаратне вимірювання затримки сигналу на різних станціях стеження. Розрахунок складної параметричної моделі в стаціонарних умовах дозволяє зменшити вплив іоносферної похибки на 60...70%. Коефіцієнти моделі іоносфери оновлюються раз на 10 днів, але можуть оновлюватися і частіше у періоди підвищеної сонячної активності [5].

В таблиці 1 наведені похибки координат та математичні очікування (МО) похибки вимірювання координат, отримані при експериментальних дослідженнях [1].

Таблиця 1

*Складові похибки вимірювання координат та їх математичне очікування*

Складові похибки	Складові похибки вимірювання координат			Математичне очікування похибки вимірювання координат		
	СКВ без врахування іоносфери та тропосфери $\sigma_1$ , м	СКВ з врахуванням іоносфери та тропосфери $\sigma_2$ , м	$\frac{\sigma_1}{\sigma_2}$	МО без врахування іоносфери та тропосфери $m_1$ , м	МО з врахуванням іоносфери та тропосфери $m_2$ , м	$\left  \frac{m_1}{m_2} \right $
широті X	5.38	3.90	1.38	-4.64	-3.14	1.48
висоті Y	12.91	5.14	2.51	12.02	-3.91	3.1
довготі Z	5.23	4.74	1.10	-4.74	-4.5	1.05

Таким чином, за результатами експериментальних досліджень показано, що врахування впливу іоносфери

та тропосфери при визначенні координат за сигналами GPS дозволяє зменшити середньоквадратичне відхилення (СКВ) визначення висоти у 2...3 рази та МО похибки у 2,5...6 разів. Однак іоносфера та тропосфера слабко впливають на похибку визначення координат в горизонтальній площині (широта та довгота) – зменшення СКВ не перевищило 1.5 рази.

Середньоорбітальні СРНС є технічними системами, на характеристики яких суттєвий вплив мають закони загальної та спеціальної теорій відносності Ейнштейна. Пов'язано це з такими причинами [3, 4]:

- НС рухаються за орбітами з достатньо високими швидкостями;
- різниця гравітаційних потенціалів в точках знаходження НС та мобільного об'єкту така, що нею не можна знехтувати;
- Земля з мобільним об'єктом, що на ній знаходиться, обертається відносно інерціальної системи координат, в якій задається рух НС.

Розрахунки, проведені в [1] для параметрів Землі та орбіт НС ГЛОНАСС приводять до такого результату:  $\frac{f - f'}{f'} \approx 4.36 \cdot 10^{-10}$ . Таким чином, з точки зору спостерігача, що знаходиться на Землі,

частота опорного генератора НС  $f$  буде здаватися більшою, ніж частота  $f'$ , яку фіксує спостерігач, що знаходиться на НС.

Номінальне значення частоти бортового опорного генератора для наземного спостерігача має відповідати  $f_{oz.0} = 5.0 \text{ МГц}$ . Тоді реальна частота опорного генератора, який знаходиться на борту НС, дорівнює  $f'_{oz} = (1 - 4.36 \cdot 10^{-10}) \cdot f_{oz.0} = 4999999,99782 \text{ Гц}$ , тобто на 2.18 мГц менше номінального значення  $f_{oz.0}$ . Компенсація даного релятивістського ефекту здійснюється відповідним зміщенням частоти опорного генератора при його настроюванні на Землі.

Другий тип релятивістського ефекту пов'язаний з відмінністю траєкторії НС від кругової, що характеризується ексцентриситетом орбіти  $e$ . Для некругових орбіт швидкість НС у перигеї більше, ніж в апогеї, а гравітаційний потенціал – менше. Це приводить до того, що бортовий годинник йде повільніше в перигеї та швидше в апогеї. Часова поправка до часу бортового годинника, яка відповідає руху НС за круговою орбітою, розраховується таким чином [6]:

$$\delta t_e = \frac{2r(t_g) \cdot v(t_g)}{c^2} = \frac{2\sqrt{\mu a} e \sin\{E(t_g)\}}{c^2}, \quad (6)$$

де  $r(t_g)$  та  $v(t_g)$  – радіус-вектори відповідно положення та швидкості НС на момент часу  $t_g$  випромінювання сигналу;  $E(t_g)$  – значення ексцентричної аномалії на той самий момент часу;  $a$  – більша піввісь орбіти НС;  $\mu$  – геоцентрична гравітаційна стала Землі.

В роботі [7] зазначається, що похибка (6) може складати 70 нс (21 м). Тому такий релятивістський ефект необхідно компенсувати для отримання високоточних НЧВ, що може бути реалізовано в приймальній апаратурі на основі даних, які містяться в навігаційному повідомленні.

Ще один релятивістський ефект пов'язаний з обертанням Землі. При цьому відповідна часова поправка

$$\delta t_{\Omega} = \frac{\Delta r \cdot v}{c^2} = \frac{(r_n - r_{nc}) \cdot (\Omega_z \times r_n)}{c^2}, \quad (7)$$

де  $r_n$  та  $r_{nc}$  – радіус-вектори мобільного об'єкту та НС в момент випромінювання сигналу;  $\Omega_z$  – вектор кутової швидкості обертання Землі відносно інерціальної системи координат.

Якщо приймач рухається відносно Землі з вектором швидкості  $v_0$ , то в співвідношенні (7) замість вектора швидкості  $v = \Omega_z \times r_n$  потрібно використовувати вираз  $v = \Omega_z \times r_n + v_0$ .

Похибка, обумовлена обертанням Землі, може складати величину до 100 нс (30 м), тобто її також необхідно компенсувати для отримання високої точності НЧВ [8].

При роботі приймальної частини СРНС у міських умовах, а також у будь-яких інших ситуаціях, для яких характерні відбиття сигналу від навколишніх предметів, на вхід приймача, окрім сигналів НС, надходять перевідбиті від навколишніх об'єктів сигнали. Такі сигнали мають меншу, ніж у прямого сигналу, амплітуду, додаткову затримку оригінальної та додатковий фазовий зсув, які можуть змінюватися з часом. Додавання всіх прийнятих сигналів на вході приймача приводить до утворення підсумкового сигналу, у якого амплітуда, фаза та затримка оригінальної є флукуаційними змінними, що приводить до виникнення похибки оцінювання псевдодальності та псевдошвидкості. Крім того, спотворюються форми дискримінаційних характеристик дискримінаторів затримки та фази (або частоти), що також негативно впливає на точність сформованих оцінок.

Тому що в приймальному пристрої відбувається кореляційна обробка сигналів, то затримка оригінальної відбитого сигналу на величину, більшу або рівну тривалості символу дальномірного коду (2 мкс), не впливає на роботу приймального пристрою. Це можна використовувати для грубої оцінки максимально можливої помилки оцінки псевдодальності, обумовленої багатопроменевим поширенням сигналу:

$$\delta \hat{D}_{\text{оцінка, макс}} = c \cdot \delta t_{\text{оцінка, макс}} = 3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 600 \text{ м.}$$

Якщо сигнал надходить від НС, розташованого в зеніті, то умов для його перевідбиття виникає суттєво менше, ніж при отриманні сигналу від НС, що знаходиться під низьким кутом місця. Тому одним з методів боротьби з багатопроменевим поширенням є відмова від роботи за сигналами НС з малим кутом місця. Для цього використовують маскування сигналів НС з кутом місця менше  $10^\circ$ , що вирішується при проектуванні антен приймачів таким чином, щоб для кутів, менших кута маски, коефіцієнт підсилення антени був меншим, ніж для іншого сектора кутів.

Інший метод боротьби оснований на тому, що з НС випромінюється сигнал з круговою поляризацією. При перевідбитті сигналу від місцевих об'єктів змінюється характер його поляризації. Тому використання приймальних антен, узгоджених з поляризацією прямого сигналу, послаблює вплив перевідбитих сигналів приблизно на 3 дБ за потужністю. Крім того, відомі розробки спеціальних антен, що знижують вплив багатопроменевого поширення сигналів [7]. Природним методом боротьби з багатопроменевим поширенням є підняття антени приймача на максимально можливу висоту відносно найбільш інтенсивно відбиваючих об'єктів. Для нерухомих приймачів зменшення впливу багатопроменевого поширення сигналів на точність визначення псевдодальності може бути вирішено за рахунок додаткових вимірювань фазових параметрів сигналів (до основних кодових вимірювань).

### Похибки бортової апаратури

Похибки частотно-часового забезпечення виникають при зв'язі та зберіганні бортової шкали часу (БШЧ) НС. Ці похибки безпосередньо та досить суттєво впливають на визначення відстані до супутника. Наприклад, зсув випромінюваних дальномірних кодів та міток часу на 10 мкс відповідає похибці вимірювання дальності у 3 км. Стабільність БШЧ залежить від стабільності бортового еталону частоти ("атомний годинник"). СКВ зсуву БШЧ за добу після корекції складає 25.4 нс для цезієвих та 108 нс для рубідієвих еталонів частоти. Однак вимоги до СРНС такі, що СКВ зсуву БШЧ має бути не більше 10 нс.

Крім апаратних методів підвищення стабільності шкали використовують алгоритмічні методи, оснований на відомих математичних моделях поведінки бортових еталонів, що дозволяє прогнозувати відхилення. Непрогнозовані відхилення БШЧ можуть складати 1 нс на інтервалі в 1 год. В сучасних СРНС проводиться постійне спостереження за бортовими еталонами кожного НС і для кожного з них розраховується індивідуальний алгоритм корекції (в якості моделі зазвичай використовується поліном другого степеню) [1].

До дальномірних похибок відносяться також і похибки, що вносяться груповою затримкою навігаційного сигналу в апаратурі супутника. Групова затримка є інтервалом часу між вихідним навігаційним сигналом в фазовому центрі передавальної антени та вихідним сигналом бортового еталону частоти та часу. Систематична складова групової затримки вимірюється при зборці та калібруванні апаратури супутника, вона індивідуальна для кожного НС та передається у складі його службового повідомлення. Випадкова складова входить до складу дальномірної похибки і зазвичай не перевищує 3 нс. Достовірність частотно-часових поправок залежить від їх "віку", тобто від часу, що минув з моменту завантаження до пам'яті бортового обчислювача. В ситуації, коли відбувається затінення супутника, корекція ефемерид (таблиць небесних координат Сонця, Місяця та інших астрономічних об'єктів, обчислених через рівні інтервали часу, наприклад, на північ кожної доби) супутника тривалий час неможлива. Для зменшення залежності від інтервалу між оновленнями даних використовується режим міжсупутникових вимірювань, реалізований в GPS на супутниках типу Block IIR.

### Похибки апаратури мобільного об'єкту

Основним джерелом похибок прийомоіндикатора є схеми стеження за затримкою оригінальної та носійної сигналу, при цьому розрізняють шумові та динамічні похибки. Оригінальною сигналу НС є двійкові параметри системи передавання (ПСП). Шумова похибка некогерентної схеми стеження за затримкою ПСП має СКВ, що визначається формулою [9]:

$$\sigma = \tau_s \sqrt{\frac{B_t}{P/N_0} + \frac{B_t B_r}{(P/N_0)^2}}, \quad (8)$$

де  $\tau_s$  – тривалість елементарного символу ПСП;  $B_t$  та  $B_r$  – ширина одnobічної смуги пропускання відповідно схеми стеження за затримкою та тракту проміжної частоти;  $P/N_0$  – відношення потужності

сигналу до спектральної густини шуму на вході приймача.

Динамічну складову похибки прийомоіндикатора оцінюють за співвідношенням

$$\varepsilon_d = \frac{0.28 \tau}{B_t^2}, \quad (9)$$

де  $\tau$  – затримка сигналу.

При цьому діапазон похибок оцінювання псевдодальності складає 0,5...30 м, а псевдошвидкості – 0,1...10 м/с. Ці похибки обумовлені внутрішніми шумами приймача та динамікою руху мобільного об'єкту. Ще одним джерелом похибок оцінювання псевдодальності та псевдошвидкості є опорний генератор, при цьому на характеристики слідкувальних систем приймача впливає короткочасна нестабільність частоти, що приводить до нестабільності шкали часу приймача та флуктуацій фази опорного генератора.

**Похибки, що вносяться на етапі розв'язання навігаційної задачі.** Оцінки псевдодальностей та псевдошвидкостей, отримані на етапі первинної обробки за чотирма або більше видимими НС, використовуються для розрахунку оцінок координат та вектора швидкості мобільного об'єкту, що є сутністю вторинної обробки інформації в приймальному пристрої (або розв'язання навігаційної задачі). При проведенні необхідних розрахунків використовується інформація про координати та складові вектора швидкості (ефемериди) кожного НС, яка виділяється з навігаційного повідомлення. Точність цієї ефемеридної інформації безпосередньо впливає на точність НЧВ. Крім того, при перерахунку оцінок псевдодальностей в координати мобільного об'єкту відбувається перетворення похибок визначення псевдодальностей в похибки визначення координат мобільного об'єкту. При цьому відбувається погіршення точності визначення координат мобільного об'єкту у порівнянні з точністю визначення псевдодальностей, що залежить від геометрії розташування мобільного об'єкту та НС, сигнали яких приймаються до обробки.

Для кількісної оцінки даного ефекту використовується поняття геометричного фактору [10].

#### Похибки ефемеридного забезпечення

Однією з основних задач наземного контролю та керування є формування передбачених на задані моменти часу значень ефемерид усіх НС та передача їх на НС, де вони закладаються в навігаційне повідомлення. При проведенні експериментальних досліджень ефемеридними є такі похибки:  $\sigma_l$  – трансверсальна (за дотичною до траєкторії);  $\sigma_r$  – радіальна;  $\sigma_n$  – нормальна (за нормаллю до площини, утвореної векторами  $\sigma_l$  та  $\sigma_r$ ).

В роботі [9] наведені результати експериментальних досліджень ефемеридних похибок для НС GPS, тобто похибок передбачених значень ефемерид (закладених в навігаційне повідомлення) відносно точно вимірних значень:  $\sigma_l = 6.3$  м,  $\sigma_n = 3.0$  м,  $\sigma_r = 0.8$  м. Визначені ефемеридні похибки перераховують в еквівалентну похибку визначення псевдодальності, яка складає величину 1.27 м. Однак це значення відрізняється, наприклад, від аналогічного значення  $\sigma_{\hat{D}_{ef}} = 4.0$  м, наведеного в роботі [11]. Тому для аналізу прийнято середнє з двох попередніх значень 2.6 м, що і враховано в бюджеті похибок (таблиця 2).

#### Бюджет похибок визначення псевдодальності та псевдошвидкості

Підводячи підсумок аналізу похибок визначення псевдодальності та псевдошвидкості, наведемо підсумкову таблицю окремих складових загальної похибки, яку називають бюджетом похибок. В таблиці 2 покладено, що всі складові похибки є некорельованими між собою випадковими величинами з нормальним законом розподілу. Іоносферна та тропосферна похибки мають систематичну та випадкову складові (МО та СКВ). МО ігнорувати не можна, однак воно не додається, як дисперсії. Тому дисперсія загальної похибки визначається як сума дисперсій окремих складових.

*Бюджет похибок визначення псевдодальності та псевдошвидкості*

Джерело похибки	$\sigma_{\hat{D}}$ , м	$\sigma_{\hat{V}}$ , м/с
Годинник супутника	2,0	–
Іоносфера	4,0	–
Тропосфера	0,5	–
Багатопроміньове поширення	2,5	0,01
Приймальний пристрій	1,5	0,08
Бортовий опорний генератор	–	0,04
Релятивістський ефект	–	0,001
Ефемеридне забезпечення	2,6	–
Інші	2,0	0,01
Сумарна похибка	6,3	0,09

Наведені в таблиці 2 значення окремих складових відповідають залишковим значенням похибок, тобто передбачається, що в приймальному пристрої прийняті міри щодо зменшення похибок визначення псевдодальності та псевдошвидкості.

Похибка, що вноситься приймальним пристроєм, наводиться для автономного одночастотного стаціонарного пристрою з двоетапною обробкою сигналів при

прийманні сигналу від НС, що знаходиться в зеніті. Враховуючи це, величина сумарної (підсумкової) похибки в таблиці 2 має зміст потенційної, тобто гранично досяжної для реальної апаратури.

### **Висновки**

1. Точність визначення координат мобільного об'єкту при використанні різних видів дальномірних та радіальних методів практично однакова.

2. Іоносферна та тропосферна похибки мають як систематичну, так і випадкову складові (математичне очікування та дисперсію). Величина іоносферної похибки визначається електронною концентрацією в іоносфері, не залежить від розташування супутників, впливає на точність визначення висоти та відхилення бортового годинника від системного часу. Затримка сигналу в тропосфері істотно залежить від кута місця розташування навігаційного супутника.

3. Для зменшення похибок бортової апаратури використовують апаратні методи підвищення стабільності шкали та алгоритмічні методи, основані на відомих математичних моделях поведінки бортових еталонів, що дозволяє прогнозувати відхилення. Основним джерелом шумових та динамічних похибок приймального пристрою є схеми стеження за затримкою оригінальної та носійного сигналу, а також опорний генератор, основним впливовим чинником якого є короткочасна нестабільність частоти.

4. Складено бюджет похибок визначення псевдодальності і псевдошвидкості та з'ясовано потенційні значення їх сумарних похибок (відповідно 6.3 м та 0.09 м/с).

### **Список літературних джерел**

1. Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. – 260 с.

2. Рудик А.В. Обзор методів вимірювання координат та параметрів руху мобільних об'єктів з використанням супутникових радіонавігаційних систем // Вісник Інженерної академії України. – 2015. – №4. – С. 51-56.

3. Understanding GPS: Principles and Applications / Ed. by E D. Kaplan. Aitech House, Inc., Norwood, Massachusetts, 1996.

4. Global Positioning System: Theory and Application / Edited by B.W. Parkinson, J.J. Spilker Jr. – AIAA. Inc., Washington, vol. 1, 1996.

5. Яценков В. С. Основы спутниковой навигации : системы GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС / В. С. Яценков. – М., 2005. – 272 с.

6. Теоретические основы радиолокации / под ред. В. Е. Дулевича. – М. : Сов. радио, 1978. – 608 с.

7. Виноцкий А. С. Автономные радиосистемы / А. С. Виноцкий. – М. : Радио и связь, 1986. – 335 с.

8. Фатеев Ю. Л. Теоретические основы и практическая реализация угловых измерений на основе глобальных навигационных спутниковых систем : дис. д-ра техн. наук 05.12.04 / Ю. Л. Фатеев; Краснояр. гос. техн. ун-т; рук. работы Г. Я. Шайдуров. – Красноярск, 2004. – 339 с.

9. Поваляев А. А. Спутниковые радионавигационные системы: время, показания часов, формирование измерений и определение относительных координат / А. А. Поваляев. – М. : Радиотехника, 2008. – 328 с.

10. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. – Изд. 4-е, перераб. – М. : Радиотехника, 2010. – 800 с.

11. Денисов В. П. Анализ квазиоптимального алгоритма устранения неоднозначности в многошкальной фазовой измерительной системе / В. П. Денисов // Радиотехника и электроника. – 1995. – Вып. 4. – С. 7–9.