

УДК 621.317.08

А.В. Рудик, к.т.н.

## МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ КООРДИНАТ ТА ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ СУПУТНИКОВИХ РАДІОНАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Національний авіаційний університет, andrey05011971@mail.ru

*В статті показано, що основним змістом навігаційної задачі в супутникових радіонавігаційних системах є визначення просторових координат контрольованого об'єкту, складових векторів його швидкості та прискорення, а також поточного часу. Проаналізовано методи вимірювання координат та параметрів руху об'єктів з використанням супутникових радіонавігаційних систем; визначено їх основні переваги та недоліки. З'ясовано та проаналізовано складові оцінки швидкості (вимірної псевдошвидкості) при застосуванні різновидів доплерівського та псевдодоплерівського методів.*

**Ключові слова:** *переміщення, швидкість, прискорення, дальність, псевдодальність, вектор стану, псевдошвидкість, метод вимірювання, навігаційний параметр.*

### Вступ

Прискорення – динамічна характеристика об'єкта. Згідно з другим законом Ньютона воно виникає тільки після прикладення до об'єкта будь-якої сили. Переміщення об'єкта, його швидкість, прискорення та різкість є взаємопов'язаними фізичними величинами: швидкість – це перша похідна від переміщення, прискорення його друга похідна, а різкість – третя. Проте взяти похідну сильно зашумленого сигналу практично неможливо, оскільки це призводить до виникнення дуже великих похибок навіть при використанні порівняно складних схем обробки.

Швидкість руху може бути або кутовою, або лінійною. Вона показує, наскільки швидко об'єкт рухається по прямій лінії або наскільки швидко він обертається. Вимірювання швидкості залежить від розмірів об'єкту і може виражатися, наприклад, в мм/с або км/год. В даний час розроблені глобальні системи навігації (*GPS – Global Positioning System* та ГЛОНАСС), що дозволяє визначати швидкість і положення порівняно великих об'єктів, таких як наземні і морські транспортні засоби, за допомогою радіосигналів від великої кількості супутників, які обертаються навколо Землі. Визначення швидкості та положення таких об'єктів обчислюється за часовими затримками між сигналами, отриманими від різних супутників.

Основним змістом навігаційної задачі в супутникових радіонавігаційних системах (СРНС) є визначення просторових координат контрольованого об'єкту, складових векторів його швидкості та прискорення, а також поточного часу. Тому в результаті розв'язання навігаційної задачі має бути визначений розширений вектор стану контрольованого об'єкту в інерціальній геоцентричній системі координат.

Елементи вектора стану не можна безпосередньо виміряти за допомогою радіотехнічних засобів. У прийнятого радіосигналу зазвичай вимірюються затримка або доплерівський зсув частоти. Параметр радіосигналу, що вимірюється для навігації, є радіонавігаційним (РНП), а відповідний йому геометричний параметр – навігаційним (НП). Тому затримка сигналу  $\tau$  та доплерівський зсув частоти  $f_D$  є радіонавігаційними параметрами, а відповідні їм дальність до контрольованого об'єкта  $D$  та радіальна швидкість зближення об'єктів  $V_P = \dot{D}$  є навігаційними параметрами, зв'язок між якими виражається співвідношеннями

$$D = c\tau, \quad V_P = f_D\lambda,$$

де  $c$  – швидкість світла;  $\lambda$  – довжина хвилі випроміненого навігаційного сигналу.

Для розв'язання навігаційної задачі, тобто для знаходження вектора стану, використовують навігаційні функції, які залежать від типу НП, характеру руху навігаційного супутника (НС) та контрольованого об'єкту, а також вибраної системи координат. Навігаційні функції для просторових координат та складових вектора швидкості контрольованого об'єкту можна отримати за допомогою різних різновидів дальномірних, різницево-дальномірних та радіальних методів, а також їх комбінацій.

Метою статті є аналіз методів вимірювання координат та параметрів руху об'єктів з використанням супутникових радіонавігаційних систем, а також складових похибки визначення швидкості (псевдошвидкості).

### Дальномірні методи

Найбільш простий дальномірний метод при радіонавігаційних вимірюваннях [1, 2] оснований на вимірюванні дальності  $D_i$  між  $i$ -м НС та контрольованим об'єктом.

В цьому методі навігаційним параметром є дальність  $D_i$ , а поверхнею положення – сфера з радіусом  $D_i$  та центром, розташованим в центрі мас  $i$ -го НС. Рівняння сфери має вигляд

$$D_{i(1)} = \sqrt{(X_{ef.i} - X)^2 + (Y_{ef.i} - Y)^2 + (Z_{ef.i} - Z)^2}. \quad (1)$$

В співвідношенні (1) прийнято такі позначення:  $X_{ef.i}$ ,  $Y_{ef.i}$ ,  $Z_{ef.i}$  – відомі на момент вимірювання координати  $i$ -го НС (з врахуванням його переміщення за час поширення сигналу);  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – координати контрольованого об'єкту.

Місцезнаходження контрольованого об'єкту, тобто координати  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , визначаються як координати точки перетину трьох поверхонь положення (трьох сфер). Тому для реалізації дальномірного методу необхідно виміряти дальність за співвідношенням (1) для трьох НС.

Таким чином, для дальномірного методу навігаційна функція є системою з трьох рівнянь виду (1). Тому що така система рівнянь є нелінійною, виникає проблема неоднозначності визначення координат контрольованого об'єкту, яка виключається за допомогою відомої додаткової інформації (орієнтовні координати об'єкту, його радіальна швидкість і т.і.).

### Псевдодальномірний метод

В супутникових РНС внаслідок великого розкиду передавальної та приймальної позицій фіксація моментів випромінювання та приймання сигналу не може проводитися в одній шкалі часу, тому що випромінювання сигналу з борту НС визначається за бортовою шкалою часу (БШЧ)  $t_{випр}^{БШЧ}$ , а час приймання сигналу – за шкалою часу контрольованого об'єкту (ШЧКО)  $t_{пр}^{ШЧКО}$ . При цьому в СРНС розв'язується задача визначення тривалості інтервалу між моментами часу ( $t_{випр}^{БШЧ}$  – момент випромінювання деякої фази дальномірного коду з борту НС та  $t_{пр}^{ШЧКО}$  – момент прийому тої самої фази дальномірного коду контрольованим об'єктом), заданими в різних шкалах. Для такого інтервалу часу використовується термін «псевдозатримка». Якщо  $T_{пр}(t_{пр}^{ШЧКО})$  – значення часу за шкалою часу контрольованого об'єкту в момент часу  $t_{пр}^{ШЧКО}$ , а  $T_{випр}(t_{випр}^{БШЧ})$  – значення часу за бортовою шкалою часу в момент часу  $t_{випр}^{БШЧ}$ , то значення псевдозатримки визначається як

$$\hat{\tau}(t_{пр}^{ШЧКО}) = T_{пр}(t_{пр}^{ШЧКО}) - T_{випр}(t_{випр}^{БШЧ}). \quad (2)$$

Якщо тепер визначити лінійну величину за співвідношенням

$$\hat{D}(t_{пр}^{ШЧКО}) = c \hat{\tau}(t_{пр}^{ШЧКО}), \quad \hat{D} = c \hat{\tau}, \quad (3)$$

то співвідношення (3) буде мати розмірність дальності (відстані), однак параметр  $\hat{D}$  не буде дальністю у звичному розумінні, тобто відстанню між двома точками у просторі. Тому для параметра  $\hat{D}$ , що визначається за (1) та (3), використовують термін «псевдодальність» [3].

Однак у співвідношеннях (2) та (3) моменти часу  $t_{випр}^{БШЧ}$  та  $t_{пр}^{ШЧКО}$  не є незалежними – вони взаємопов'язані через одну і ту саму фазу дальномірного коду радіосигналу (на випромінювання та при прийомі).

Якщо для шкал часу  $t^{БШЧ}$  та  $t^{ШЧКО}$  збігаються одиниці часу, ідеально синхронізовані моменти початку однієї події, а також ідентичні значення часу для однакових моментів часу, то такі шкали часу є ідентичними. Однак реально шкали часу відрізняються, тобто відмінність характеристик ШЧКО та БШЧ приводить до виникнення похибки  $T'(t_{пр}) = T_{ШЧКО}(t_{випр}) - T_{БШЧ}(t_{випр})$ , а співвідношення для визначення псевдозатримки можна записати як

$$\hat{\tau}(t_{пр}) = T_{ШЧКО}(t_{пр}) - T_{ШЧКО}(t_{випр}) - T'(t_{пр}) = \tau_{\delta}(t_{пр}) - T'(t_{пр}), \quad (4)$$

де  $\tau_{\delta}(t_{пр})$  – дійсне значення оцінки затримки, що визначається за одною шкалою часу (наприклад,

ШЧКО).

Для випадку, коли БШЧ для всіх НС ідентичні, що досягається в результаті взаємної синхронізації цих шкал та корекції показів часу за ними, з врахуванням співвідношень (2) та (4) формулу для визначення псевдодальності  $\hat{D}(t_{np}^{ШЧКО})$  відносно  $i$ -го НС можна записати у вигляді [4]:

$$\begin{aligned} \hat{D}_i(t_{np}^{ШЧКО}) &= \hat{D}_{i,diich}(t_{np}^{ШЧКО}) + D' = \\ &= D' + \sqrt{\left\{X_i(t_{випр}^{БШЧi}) - X(t_{np}^{ШЧКО})\right\}^2 + \left\{Y_i(t_{випр}^{БШЧi}) - Y(t_{np}^{ШЧКО})\right\}^2 + \left\{Z_i(t_{випр}^{БШЧi}) - Z(t_{np}^{ШЧКО})\right\}^2}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $D' = cT'(t_{np}^{ШЧКО})$ .

Співвідношення (5) є основою псевдодальнометричного методу визначення координат контрольованого об'єкту та відрізняється від (1) наявністю додаткового параметра  $D'$  та різними моментами часу, для яких визначаються координати контрольованого об'єкта та НС.

Тому що псевдодальномірний метод оснований на вимірюванні псевдодальностей, навігаційним параметром є  $\hat{D}_i$ . Поверхнею положення, як і в дальномірному методі, є сфера з центром в точці центра мас НС, однак радіус цієї сфери змінений на невідому величину  $D'$ . Вимірювання псевдодальностей до трьох НС приводить до системи трьох рівнянь з чотирма невідомими:  $X, Y, Z, D'$ . При розв'язанні цієї системи рівнянь виникає невизначеність, для виключення якої необхідно провести додаткове вимірювання, тобто виміряти псевдодальність до четвертого супутника (отримана при цьому система чотирьох рівнянь має точний розв'язок). Таким чином, місцезнаходження контрольованого об'єкту при вимірюваннях псевдодальностей визначається як точка перетину чотирьох поверхонь положення.

Необхідність знаходження у зоні видимості чотирьох НС ставить доволі жорсткі вимоги до структури мережі НС, які виконуються тільки для середньоорбітальних СРНС. При використанні низькоорбітальних СРНС параметри орбітального групування НС (висота орбіт, кількість супутників, їх розташування) зазвичай забезпечують періодичну видимість в зоні контрольованого об'єкту лише 1...2 НС, тому визначення місцезнаходження в таких СРНС відбувається не в реальному часі, а лише після проведення послідовних вимірювань декількох ліній положення за сигналами одного НС.

Псевдодальномірний метод не накладає жорстких обмежень на значення параметра  $D' = ct'$  (пропорційного зміщенню ШЧКО) та дозволяє одночасно з визначенням місцезнаходження обчислювати зсув шкали часу контрольованого об'єкту.

#### Різницево-дальномірний та псевдорізницево-дальномірний методи

Такі методи основані на вимірюванні різниці дальності або псевдодальності від контрольованого об'єкта до декількох НС [3].

При використанні дальностей (1) в різницево-дальномірному методі формуються три різниці  $\Delta D_{ij} = D_i - D_j$  до трьох НС. Навігаційним параметром в цьому випадку є  $\Delta D_{ij}$ . Поверхні положення визначаються за умови  $\Delta D_{ij} = const$  і є поверхнями гіперболоїда обертання, фокусами якого є координати опорних точок  $i$  та  $j$  (центрів мас  $i$ - та  $j$ -го НС). Відстань між цими опорними точками є базою вимірювальної системи. Якщо відстань від опорних точок (НС) до контрольованого об'єкту значно більше розмірів бази, то гіперболоїд обертання в околицях точки контрольованого об'єкту практично збігається зі своєю асимптотою – конусом, вершина якого збігається з серединою бази.

При використанні псевдодальностей (5) також формуються три різниці  $\Delta D_{ij}(t_{np}^{ШЧКО}) = \hat{D}_i(t_{np}^{ШЧКО}) - \hat{D}_j(t_{np}^{ШЧКО})$ , для яких псевдодальності  $\hat{D}_i(t_{np}^{ШЧКО})$  та  $\hat{D}_j(t_{np}^{ШЧКО})$  визначаються в приймальній пристрої в один момент часу  $t_{np}^{ШЧКО}$ , однак моменти випромінювання  $t_{випр}^{ШЧКОi}$  та  $t_{випр}^{ШЧКОj}$  відповідних сигналів для різних НС не однакові. В цьому випадку метод називають псевдорізницево-дальномірним.

Точність визначення координат контрольованого об'єкту при використанні псевдорізницево-дальномірного методу збігається з точністю визначення цих координат псевдодальномірним методом.

Недоліком методу є те, що в ньому не можна виміряти зміщення  $D'$  та зміщення шкали часу контрольованого об'єкту.

#### Радіально-швидкісний (доплерівський) метод

Метод призначений для визначення складових вектора швидкості контрольованого об'єкту та оснований на вимірюванні доплерівських зсувів частот сигналів, прийнятих від трьох НС:  $f_{Д.і} = \frac{\dot{D}_i}{\lambda_i}$ ,  $i = \overline{1, 3}$ , де  $\lambda_i$  – довжина хвилі носійного коливання  $i$ -го радіосигналу;  $\dot{D}_i$  – радіальна швидкість зближення контрольованого об'єкту та  $i$ -го НС.

В класичній механіці співвідношення для радіальної швидкості отримують диференціюванням (1) за часом:

$$\dot{D}_i = \frac{(x_i - x)(\dot{x}_i - \dot{x}) + (y_i - y)(\dot{y}_i - \dot{y}) + (z_i - z)(\dot{z}_i - \dot{z})}{D_i} = C_i^T (V_i - V), \quad (6)$$

де  $V_i = |\dot{x}_i \ \dot{y}_i \ \dot{z}_i|^T$  – вектор швидкості  $i$ -го НС;  $V = |\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}|^T$  – вектор швидкості контрольованого об'єкта;

$C_i = \left| \frac{x_i - x}{D_i} \ \frac{y_i - y}{D_i} \ \frac{z_i - z}{D_i} \right|^T$  – вектор напрямних косинусів, що характеризує напрямок на  $i$ -ий НС з місця розташування контрольованого об'єкту.

При відомих векторах  $C_i$ ,  $V_i$ ,  $i = \overline{1, 3}$  та трьох вимірюваннях  $\dot{D}_i$  з (6) однозначно визначається вектор швидкості контрольованого об'єкту  $V$ .

Вектор напрямних косинусів можна визначити, наприклад, за дальномірними вимірюваннями (1).

Інший підхід оснований на вимірюванні радіальних швидкостей  $\dot{D}_i$  протягом деякого інтервалу часу  $\Delta t$  та їх інтегруванні:

$$N_i(t) = \int_t^{t+\Delta t} \dot{D}_i(t) dt = D_i(t + \Delta t) - D_i(t). \quad (7)$$

В результаті визначаються «нові еквівалентні вимірювання»  $N_i(t)$ , що відповідають різницево-дальномірному методу, однак при цьому різниці дальностей формуються за вимірюваннями дальностей для одного НС для різних моментів часу. В цьому випадку отримують співвідношення, аналогічне (6):

$$\dot{D}_i(t_2) = C_i^T(t_2) [V_i(t_1) - V(t_2)], \quad (8)$$

де

$$C_i(t_2) = \left| \frac{x_i(t_1) - x(t_2)}{D_i(t_2)} \ \frac{y_i(t_1) - y(t_2)}{D_i(t_2)} \ \frac{z_i(t_1) - z(t_2)}{D_i(t_2)} \right|^T. \quad (9)$$

Радіальній швидкості зближення відповідає доплерівський зсув частоти

$$f_{Д.і}(t_2) = -\frac{\dot{D}_i(t_2)}{\lambda_i} = -\frac{C_i^T(t_2) [V_i(t_1) - V(t_2)]}{\lambda_i} \quad (10)$$

прийнятого сигналу відносно номінального значення  $f_i$  частоти носійного коливання.

#### Псевдорадіально-швидкісний (псевдодоплерівський) метод

Так само, як і в різницево-дальномірному та псевдорізницево-дальномірному методах, при відсутності єдиної шкали часу в точках випромінювання та прийому радіосигналу в точці випромінювання сигналу використовується бортова шкала часу ( $t_{випр}^{БШЧі}$ )  $i$ -го НС, а в точці прийому сигналу – шкала часу контрольованого об'єкту ( $t_{np}^{ШЧКО}$ ). При цьому в СРНС співвідношенням (5) вводиться поняття псевдодальності  $\hat{D}_i(t_{np}^{ШЧКО})$ . Тоді співвідношення для псевдошвидкості можна записати як

$$\dot{\hat{D}}_i(t_{np}^{ШЧКО}) = C_i^T(t_{np}^{ШЧКО}) [V_i(t_{випр}^{БШЧі}) - V(t_{np}^{ШЧКО})] + V'(t_{np}^{ШЧКО}). \quad (11)$$

Параметр  $\dot{\hat{D}}_i(t_{np}^{ШЧКО}) = \hat{V}_i(t_{np}^{ШЧКО})$  є псевдошвидкістю, а відповідний їй параметр

$$\hat{f}_{Д.і} = \frac{\hat{V}_i(t_{np}^{ШЧКО})}{\lambda_i} \quad (12)$$

– псевдодоплерівським зсувом частоти.

Можна показати, що

$$\hat{f}_{Д.і}(t_{np}^{ШЧКО}) = f_i^{БШЧ} \frac{d\hat{\tau}(t_{np}^{ШЧКО})}{dt_{np}^{ШЧКО}}, \quad (13)$$

де  $f_i^{БШЧ}$  – номінальне значення частоти носійного коливання  $i$ -го НС в його шкалі часу.

Проінтегрувавши співвідношення для псевдошвидкості (11) на інтервалі  $\Delta t$ , отримуємо різницю псевдодальностей, що відповідають двом моментам часу. Якщо на інтервалі часу  $\Delta t$  можна знехтувати зміною зміщення  $D'$ , то отриманий після інтегрування результат буде дорівнювати різниці дальностей, що відповідають двом моментам часу, тобто отримуємо той самий результат, що і в різницево-дальномірному методі.

#### Різницево-радіально-швидкісний метод

Сутність даного методу полягає у визначенні трьох різниць  $\Delta \dot{D}_{ij} = \dot{D}_i - \dot{D}_j$  двох радіальних швидкостей НС. Враховуючи співвідношення (6), отримаємо

$$\Delta \dot{D}_i = C_i^T (V_i - V) C_j^T (V_j - V). \quad (14)$$

При цьому різниці можна обчислювати відносно одного або відносно різних НС. Необхідно зазначити, що при обчисленні різниць можна використовувати псевдошвидкості  $\dot{D}'_i$ , тому що при такому відніманні компенсується невідоме зміщення  $\dot{D}'_i$  (якщо вважати, що це зміщення однакове для різних супутників).

Поверхнями положення є поверхні тіла обертання, фокусами яких є координати центрів мас  $i$ -го та  $j$ -го НС.

Як і для дальномірних методів, точність визначення складових вектора швидкості в різницево-радіально-швидкісному методі збігається з точністю визначення тих самих складових в псевдорадіально-швидкісному методі.

Перевагою різницево-радіально-швидкісного методу є його нечутливість до нестабільності еталонів частоти та інших неконтрольованих зсувів частоти, а його недоліком – неможливість оцінки нестабільності еталонів частоти.

#### Комбіновані методи

Такі методи, крім СРНС, використовують додаткові вимірювачі координат контрольованого об'єкту. Наприклад, в дальномірному методі при наявності у контрольованого об'єкту вимірювача висоти  $H$  можна замість вимірювання трьох дальностей до НС обмежитися вимірюванням двох дальностей. В цьому випадку навігаційна функція буде включати два рівняння типу (1), а третє необхідне рівняння дає вимірювання висоти:

$$(R_3 + H)^2 = x^2 + y^2 + z^2, \quad (15)$$

де  $R_3$  – радіус Землі.

Інший варіант використання комбінованих методів полягає в заміні сукупності одночасних вимірювань на комбінацію одночасних та послідовних вимірювань або на сукупність тільки послідовних вимірювань, наприклад, визначення координат контрольованого об'єкту радіально-швидкісним методом. Ще одним варіантом є псевдодальномірний метод, який реалізується заміною чотирьох одночасних вимірювань за чотирма НС на два послідовних вимірювання за двома НС або на чотири послідовних вимірювання за одним НС. Аналогічні комбінації можливі і для інших методів.

#### Складові похибки визначення псевдошвидкості

В СРНС псевдошвидкість  $\hat{V}$  визначається за доплерівським зсувом частоти прийнятого сигналу. Доплерівський зсув частоти прийнятого вузькосмугового сигналу відносно частоти випроміненого сигналу обумовлений взаємним переміщенням джерела випромінювання та приймача сигналу. Якщо частота випроміненого сигналу  $f_0$ , то частота прийнятого сигналу  $f_{\Pi}$  визначається співвідношенням

$$f_{\Pi} = f_0 \left( 1 + \frac{V_P}{c} \right)^{-1} \approx f_0 \left( 1 - \frac{V_P}{c} \right), \quad (16)$$

де  $V_P$  – швидкість відносного переміщення вздовж лінії «навігаційний супутник – контрольований об'єкт», позитивне значення якої відповідає збільшенню відстані між об'єктами.

Для доплерівського зсуву частоти з співвідношення (16) отримаємо

$$f_D = f_{\Pi} - f_0 \approx -f_0 \frac{V_P}{c} = -\frac{V_P}{\lambda} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{dD}{dt}, \quad (17)$$

де  $D$  – відстань між джерелом випромінювання та приймачем.

Повна фаза прийнятого сигналу з частотою (16) при  $V_P = const$

$$\Phi_{\Pi}(t) = \varphi_0 + \int_0^t 2\pi f_{\Pi} dt = \varphi_0 + 2\pi f_0 t + 2\pi f_D t, \quad (18)$$

де  $\varphi_0$  – початкова фаза.

При відомій частоті  $f_0$  оцінку доплерівського зсуву частоти прийнятого сигналу в приймачі можна отримати, якщо сформулювати опорне коливання  $\cos(\varphi_{0, on} + 2\pi f_0 t) = \cos(\Phi_{on}(t))$ , виміряти різницю фаз:

$$\Delta\Phi(t) = \Phi_{\Pi}(t) - \Phi_{on}(t) = \varphi_0 - \varphi_{on} + 2\pi f_D t \quad (19)$$

та обчислити похідну за часом від даної різниці:

$$\hat{f}_D = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Delta\Phi(t)}{dt}. \quad (20)$$

Враховуючи співвідношення (19) та (20), отримаємо формулу для оцінки швидкості, що формується у приймачі:

$$\hat{V}_P = -\lambda \hat{f}_D = -\frac{\lambda}{2\pi} \cdot \left( \frac{d\Delta\Phi_{\Pi}(t)}{dt} - \frac{d\Delta\Phi_{on}(t)}{dt} \right). \quad (21)$$

Похідні  $\frac{d\Delta\Phi_{\Pi}(t)}{dt}$  та  $\frac{d\Delta\Phi_{on}(t)}{dt}$  у відповідності з (21) визначають миттєві частоти  $2\pi f_{HC}(t)$  та  $2\pi f_{on}(t)$

бортового передавача та опорного генератора приймача. Тому що кожний генератор гармонічних коливань має власну визначену нестабільність частоти, то можна записати такі співвідношення:

$$f_{HC}(t) = f_0 + f'_{HC}, \quad f_{on}(t) = f_0 + f'_{on}, \quad (22)$$

де  $f'_{HC}$  та  $f'_{on}$  – відхилення частот випромінюваного сигналу та опорного коливання приймача від номінальних значень.

Таким чином, при визначенні радіальної швидкості за співвідношенням (21) виникає зміщення в оцінці швидкості  $V' = \lambda(f'_{on} - f'_{HC})$ , обумовлене розходженням частот опорних генераторів НС та контрольованого

об'єкта, тобто фактично визначається не швидкість, а псевдошвидкість  $\hat{V} = V_P + V'$ . В роботі [4] показано, що

$$\hat{V} = \frac{dD'}{dt} = c \frac{dt'}{dt}, \quad \text{де } t' - \text{розходження між БШЧ та ШЧКО.}$$

Наведені вище визначення доплерівського зсуву частоти та псевдошвидкості відповідають поширенню сигналу у вільному просторі. Реально сигнал, що випромінюється з НС, проходить шари іоносфери та тропосфери, тому необхідно враховувати ефекти, які виникають при поширенні сигналу в реальних середовищах.

Іоносфера впливає не тільки на затримку оригінального сигналу, але і на затримку його фази. При цьому додаткова затримка фази, обумовлена впливом іоносфери, в першому наближенні збігається з аналогічною затримкою оригінального  $\delta t_{ion}$  та має протилежний знак.

Однак оскільки зміна затримки  $\delta t_{ion}(t)$  з часом дуже повільна, похідна  $\frac{d\delta t_{ion}(t)}{dt}$  дуже незначна, тобто і

вплив іоносфери на визначення псевдошвидкості слабкий. Аналогічна ситуація виникає і при аналізі впливу тропосфери на визначення псевдошвидкості, тому ним також нехтують.

Вплив на точність визначення псевдошвидкості релятивістських та гравітаційних ефектів враховується відповідною складовою похибки  $\delta V_{PGE}$ .

В прийнятному пристрої оцінка доплерівського зсуву частоти прийнятого сигналу формується слідкувальною системою за фазою (або частотою), що приводить до виникнення складової похибки  $\delta f_{доплр}$ .

В результаті оцінка псевдошвидкості (виміряна псевдошвидкість) може бути записана у вигляді

$$\hat{V} = V_P + V' + \delta V_{PGE} + \lambda \delta f_{доплр} + \delta V_{in}, \quad (23)$$

де  $\delta V_{in}$  – інші складові похибки визначення псевдошвидкості, що не входять в розглянуті вище.

### Висновки

1. Показано, що основним змістом навігаційної задачі в супутникових радіонавігаційних системах є визначення просторових координат контрольованого об'єкта, складових векторів його швидкості та прискорення, а також поточного часу.

2. Проаналізовано методи вимірювання координат та параметрів руху об'єктів з використанням супутникових радіонавігаційних систем; визначено їх основні переваги та недоліки.

3. З'ясовано та проаналізовано складові оцінки швидкості (виміряної псевдошвидкості) при застосуванні різновидів доплерівського та псевдодоплерівського методів.

### Список літературних джерел

1. Резинченко В. И. Фазовый метод определения ориентации по сигналам спутниковой навигационной системы / В. И. Резинченко, А. А. Шашков // Навигация и гидрография. – 1996. – №2. С. 115 – 119.

2. Александров Е. Е. Определение ориентации наземного подвижного объекта при помощи навигационных спутников / Е. Е. Александров, Ю. А. Кузнецов, А. А. Дхахери // Радиоэлектроника. Автоматика. Управление. – 2002. – №2. С. 65 – 69.

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