

УДК 621.396

В.О. Гуменюк

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАВІГАЦІЙНИХ ВИЗНАЧЕНЬ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ЦИФРОВИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК З ВРАХУВАННЯМ ГЕОМЕТРИЧНОГО ФАКТОРУ ТА СКЛАДНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ОБСТАНОВКИ

Проводиться аналіз впливу геометричного фактору на точність навігаційних визначень в космічних навігаційних системах при застосуванні цифрових антенних решіток. Пропонується метод підвищення точності навігаційних визначень, що враховує геометричний фактор.

навігаційні визначення, цифрові антенні решітки, електромагнітна обстановка

Вступ

Постановка проблеми та аналіз літератури. Супутникові радіонавігаційні системи (СРНС) типу GPS (США) та ГЛОНАСС (Росія) являються системами масового обслуговування, які ґрунтуються на високій технології глобального координатно-часового забезпечення (КЧЗ).

При створенні загальногромадської глобальної СРНС типу GNSS ці СРНС вибрані в якості базових як для Європи (проект EGNOS, GALILEO), так і для створюємої системи КЧЗ України шляхом доповнення існуючих СРНС національними (регіональними) наземними та космічними апаратними і програмно-алгоритмічними засобами контролю рівнів цілісності, надійності та доступності навігаційної інформації. Наряду з цим науково-технічні заходи підтримання регіональної стійкості КЧЗ в умовах дестабілюючих факторів – електромагнітних перешкод різної природи при прийнятті навігаційної інформації СРНС апаратурою користувачів являються важливою та актуальною задачею. В реальній завадовій обстановці часто складаються обставини, коли без застосування спеціальних заходів захисту завади повністю або частково подавляють корисний сигнал, і рішення навігаційної задачі стає неможливим або реалізується з недопустимими помилками [1, 3]. Тому задача підвищення точності навігаційних визначень в складній електромагнітній обстановці є актуальною для багатьох відповідальних користувачів СРНС, включаючи контрольно-коректуючі станції, які складають основу національних КЧЗ.

Процес створення та введення в дію на території України системи космічного навігаційно-часового забезпечення (СКНЧЗ) (в тому числі розгортання мережі контрольно-коректуючих станцій) супроводжується рядом робіт по зменшенню впливу електромагнітних перешкод на точність навігаційних визначень. В основному ці роботи направлені на застосування цифрових антенних решіток (ЦАР), які автоматично визначають напрямок приходу завади та формують нуль в цьому напрямку, тим самим збільшують відношення сигналу до перешкоди [3]. Застосування таких методів має і негативні наслідки, оскільки нулі, що сформовані в напрямках

завад, частково або повністю можуть закривати навігаційні космічні апарати (НКА). При цьому кожна нова електромагнітна перешкода розстроює антенну решітку. Чим більше напрямків приходу електромагнітних перешкод, тим більша зона “небачення” НКА і, відповідно, гірший геометричний фактор та нижча точність навігаційних визначень.

Мета статті – провести аналіз впливу геометричного фактору на точність навігаційних визначень в космічних навігаційних системах при застосуванні цифрових антенних решіток. Розробити метод підвищення точності навігаційних визначень, що враховує геометричний фактор.

Постановка задачі і викладення матеріалів дослідження

Відомо, що для виконання навігаційних вимірів необхідно забезпечити бачення як мінімум чотирьох НКА. Після повного розгортання сузір'я НКА в довільній точці Землі можуть бути видні від 5 до 12 НКА в довільний момент часу. Сучасні GPS приймачі мають від 5 до 12 каналів і більше, тобто можуть одночасно приймати сигнали від такої кількості НКА [2, 5]. В перших зразках апаратури споживача вирішувалась задача вибору найкращого за деяким критерієм сузір'я із 4-х НКА. В сучасній апаратурі зазвичай вирішується перевизначена система рівнянь число яких більше 4-х. При цьому використовується ітеративний метод вивішених найменших квадратів, коли знаходиться рішення на основі використання співвідношення [5]:

$$\eta_k = \eta_{k-1} + (H_{GM}^T R_D^{-1} H_{GM})^{-1} H_{GM}^T R_D^{-1} (D_B - D_{k-1}), \quad (1)$$

де $\eta^T = [X \ Y \ Z \ T]^T$, $D_B = [D_{1B} \dots D_{NB}]^T$, D_{k-1} – оцінка D_B (оцінка псевдовідстані). Матриця H_{GM} утворюється частковими похідними $\frac{\partial D}{\partial \eta}$; R_D –

варіаційна матриця шумів вимірів D_B або вагова матриця, яка використовується для обробки нерівноточних вимірів.

Точнісні характеристики сучасних космічних навігаційних систем визначаються рівнем основних помилок, які переслідують навігаційні визначення і

геометричним розташуванням НКА, що використовуються та користувача. Тоді для вектора навігаційних параметрів

$$\eta^T = [X \ Y \ Z \ T' \ \dot{X} \ \dot{Y} \ \dot{Z} \ f'] \quad (2)$$

в допущенні гаусівського характеру розподілу основних помилок СРНС та відсутності зсуву найбільш загальною характеристикою точності визначення η буде коваріаційна (кореляційна) матриця R_g помилок $\Delta\eta$, яка в нашому випадку буде мати вигляд

$$R_g = (H_g^T R^{*-1} H_g)^{-1}. \quad (3)$$

В (3) H_g – матриця часткових похідних сукупності функцій D_{iv} та аналогічних функцій для псевдовидкостей (ПШ) за змінною (2), а R^* – коваріаційна матриця помилок визначення ПВ та ПШ. Для характеристики помилок визначення навігаційних параметрів в плані та по висоті використовується коваріаційна матриця

$$R = (H_\xi^T R^{*-1} H_\xi)^{-1}, \quad (4)$$

в якій H_ξ визначається H_g та матрицею перетворення вектора помилок $\Delta\eta$ в геоцентричній системі координат у вектор помилок ξ_1 в системі координат “північ-схід – по нормалі до дотичної площини” T_{gp} з врахуванням змінних T' та f' . Якщо $\xi_1 = T_{gp} \Delta\eta$, то $H_\xi = H_g T_{gp}^{-1}$.

Якщо обмежитись характеристиками точності визначенням координат місця, то співвідношення (4) може бути записано з використанням індексу М як

$$R_M = (H_{M\xi}^T R_{PB}^{*-1} H_{M\xi})^{-1}, \quad (5)$$

де R_{PB}^* – коваріаційна матриця визначення ПВ. Якщо похибки однієї і тієї фізичної природи для всіх каналів взаємно незалежні і мають однакові дисперсії, то дисперсія сумарної помилки може бути записана у вигляді σ_{PB}^2 , то $R_{PB}^* = \sigma_{PB}^2 I$ (I – одинична матриця). В цьому випадку

$$R_M = \sigma_{PB}^2 (H_{M\xi}^T H_{M\xi})^{-1}. \quad (6)$$

Позначивши $\Gamma = (H_{M\xi}^T H_{M\xi})^{-1}$, визначимо відповідні геометричні фактори. Так загальний геометричний фактор зміни точності визначення навігаційних параметрів B, L (в лінійній мірі) H, T' запишеться у вигляді кореня квадратного із сліду матриці

$$GDOP = \sqrt{\text{trace } \Gamma}. \quad (7)$$

Геометричні фактори зміни точності при визначенні місця у просторі – PDOP, в плані (горизонтальної площини) – HDOP (горизонтальний геометричний фактор), по висоті VDOP, часу – TDOP – запишуться відповідно у вигляді:

$$\begin{aligned} PDOP &= \sqrt{(\gamma_{11} + \gamma_{22} + \gamma_{33})}; HDOP = \sqrt{(\gamma_{11} + \gamma_{22})}; \\ VDOP &= \sqrt{\gamma_{33}}; TDOP = \sqrt{\gamma_{44}}. \end{aligned} \quad (8)$$

В співвідношенні (8) γ_{ij} являються елементами матриці Γ . Визначенні таким чином геометричні фактори являються функціями тільки геометричного розташування НКА, що використовуються, та об'єкта, що визначається. У відповідності з зазначеним середньоквадратичним відхиленням СКВ визначення планових координат та висоти запишуться як

$$\begin{aligned} \sigma_B &= \sigma_{PB} \sqrt{\gamma_{11}}; \quad \sigma_L = \sigma_{PB} \sqrt{\gamma_{22}}; \\ \sigma_H &= \sigma_{PB} \sqrt{\gamma_{33}}; \quad \sigma_T = \sigma_{PB} \sqrt{\gamma_{44}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогічні співвідношення можуть бути записані і для визначення помилок складових вектора швидкості. Середньоквадратична радіальна помилка (СРП або drms) визначення місця в плані та СКВ представляється у вигляді

$$CPO = \sigma_{PB} HDOP; \quad SKB = \sigma_{PB} PDOP. \quad (10)$$

Як видно із співвідношення (10), точність навігаційних визначень визначається як геометричним фактором, так і точністю визначення псевдовідстані.

Точність визначення псевдовідстані можливо визначити наступним чином [4]:

$$\sigma_{PB} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_c^2 + \sigma_{tr}^2 + \sigma_{ion}^2 + \sigma_{bp}^2 + \sigma_3^2}, \quad (11)$$

де $\sigma_e, \sigma_c, \sigma_{tr}, \sigma_{ion}, \sigma_{bp}, \sigma_3$ – середньоквадратичні помилки визначення псевдовідстаней за рахунок помилок ефемеридних вимірів, синхронізації, знання швидкостей розповсюдження радіохвилі в іоносфері та тропосфері, багатопроменевості та завад відповідно.

Виходячи з того, що середньоквадратична помилка визначення псевдовідстані за рахунок завад та власних шумів приймача визначається як

$$\sigma_3 = T_{екв} \sqrt{\frac{\Delta f_{ст}}{2q}}, \quad \text{де } T_{екв} \text{ – еквівалентна довжина}$$

С/А кода ($T_{екв} \approx 293$ м); $\Delta f_{ст}$ – ширина смуги пропускання ланцюга стеження ($\Delta f_{ст} \approx 1$ Гц); q – відношення потужності корисного сигналу до суми потужностей завад та шумів, то підвищення точності навігаційних визначень в складній електромагнітній обстановці можливо здійснити через покращення q , шляхом застосування методів завадозахисту.

В загальному випадку завдання завадозахистності апаратури користувачів (АК) вирішується застосуванням спеціальних антен у вигляді багатоелементної цифрової антенної решітки або антенної решітки з діаграмоутворюючою схемою (ДУС) з алгоритмами просторової адаптації.

Згідно визначення просторова фільтрація за допомогою ЦАР заключається в автоматичному визначенні напрямку приходу завад та формування нуля діаграми спрямованості (ДС) антенної решітки в напрямку завади, при цьому не враховується геометрія розташування супутників. Виходячи з цього, доречним буде допущення, що нулі, сформовані в напрямках завад, частково або повністю можуть закривати навігаційні космічні апарати (НКА). Чим

більше напрямків приходу завад, тим більша зона “небачення” НКА і, відповідно, гірший геометричний фактор та нижча точність навігаційних визначень. Тобто, виходячи з (10), виникають протиріччя

$$q \uparrow \rightarrow \sigma_3 \downarrow \rightarrow \sigma_{ПВ} \downarrow \rightarrow СКВ \downarrow$$

$$q \uparrow \rightarrow GDOP \downarrow \rightarrow СКВ \uparrow.$$

В табл. 1 згідно [5] представлено середні імовірності бачення визначеної кількості супутників а також відповідні їм геометричні фактори.

Таблиця 1

Середні імовірності бачення
визначеної кількості супутників

Кількість НКА	4	5	6	7	8	9
P	1	1	1	1	0,91	0,58
HDOP	1,41	1,26	1,15	1,03	0,95	0,89
VDOP	2,0	1,75	1,7	1,61	1,60	1,55
TDOP	1,13	1,03	1,03	0,95	0,93	0,91

Як видно з табл. 1, зменшення кількості видимих НКА призводить до погіршення геометричного фактору та, відповідно, до погіршення точності навігаційних визначень.

Для усунення неоднозначностей в ЦАР блок формування діаграми спрямованості повинен функціонувати у відповідності з алгоритмом управління нулями ДС, представленим на рис. 1.

Як видно з рис. 1 алгоритм управління діаграмою спрямованості ЦАР реалізує метод пошуку умовного мінімуму функції з обмеженням. Умовність визначається взаємозалежністю геометричного фактора та точністю визначення псевдовідстаней, а обмеженість визначається допустимим відношенням сигнал-шум. В алгоритмі (рис. 1) передбачається два функціональних блоки: блок розрахунку точностей навігаційних визначень для кожного варіанту формування нулів та блок вибору варіанту формування нулів, при якому забезпечується найкраща точність. Алгоритм враховує як геометричний фактор, так і точність визначення псевдовідстаней.

При формуванні ДС ЦАР в напрямку завад за вибраним варіантом формуються нулі, а в напрямку НКА формується максимум ДС. Кількість можливих варіантів формування діаграми спрямованості визначається як $C = C_N^1 + C_N^2 + \dots + C_N^N$.

Висновки

1. В ході виконання завдання підвищення точності навігаційних визначень за допомогою космічних навігаційних систем в складній електромагнітній обстановці важливу роль відіграє врахування геометричного фактору.

2. Усунути неоднозначності, що виникають під час компенсації завад, можливо за рахунок реалізації в діаграмоутворюючій схемі ЦАР запропонованого в роботі алгоритму управління нулями ДС, при якому забезпечується найвища точність.

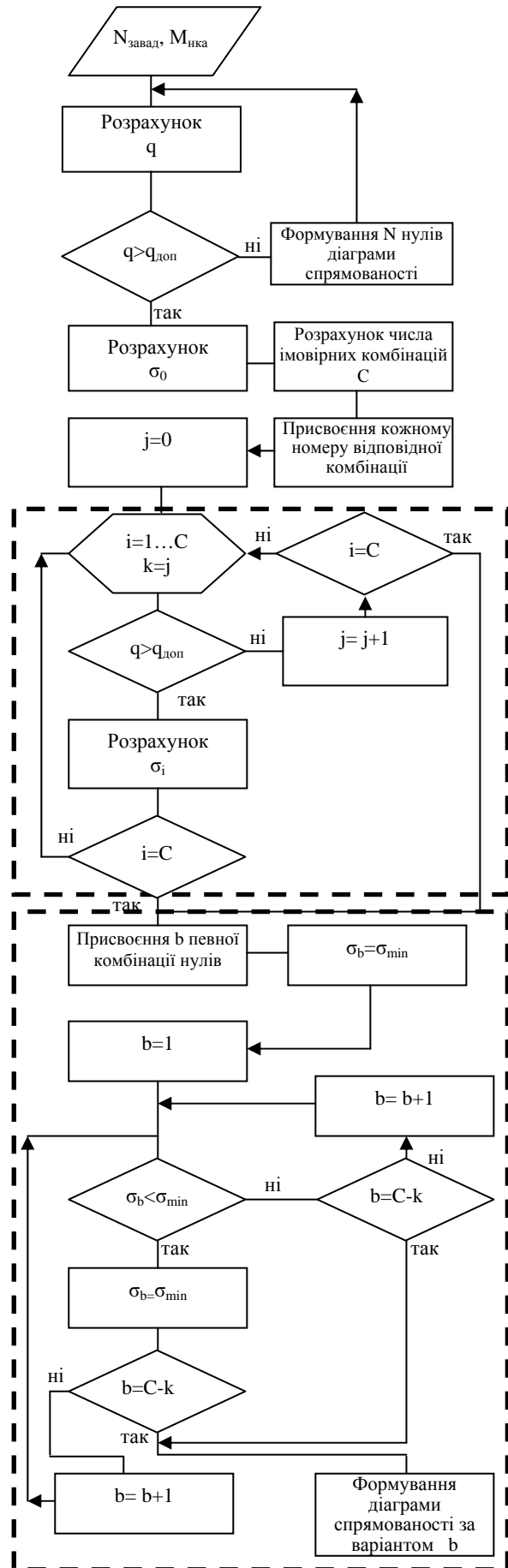


Рис. 1. Алгоритм управління

Список літератури

1. Отт Г. Методы подавления шумов и помех в электронных системах: Пер. с англ. / Под ред. М.В. Гальперина. – М.: Мир, 1979. – 317 с.
2. Глобальна система визначення місцеположення (GPS). Теорія та практика / Б. Гофмани-Велленгоф, Г. Ліхтенеггер, Д. Коллінз; Пер. з англ. третього вид. Під ред. Я.С. Яцківа. – К.: Наук. думка, 1995. – 380 с.
3. Скорик Е.Т., Крюков А.В. Адаптивная компенсация помех в спутниковых радионавигационных системах //

Космічна наука та технологія. – 2001. – Т 7, №4. – С. 126-132.

4. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. – Эко-Трендз, 2003. – 326 с.:ил.

Надійшла до редколегії 00.00.2007

Рецензент: д-р техн. наук старший науковий співробітник Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків.