

УДК 621.396

С.О. Соболенко<sup>1</sup>, В.О. Гуменюк<sup>2</sup>, В.М. Романчук<sup>1</sup><sup>1</sup>Житомирський військовий інститут Національного авіаційного університету, Житомир<sup>2</sup>Об'єднане оперативне командування, Київ

## МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ НАВІГАЦІЙНИХ ВИЗНАЧЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ КОНТРОЛЬНО-КОРЕГУЮЧИХ СТАНЦІЙ З ІНВАРІАНТНОЮ АНТЕННОЮ РЕШІТКОЮ В СКЛАДНІЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІЙ ОБСТАНОВЦІ

*Пропонується метод підвищення точності навігаційних визначень, що враховує виявлені недоліки. Для покращення точності навігаційних визначень можливо застосовувати антенну решітку з просторовою фільтрацією сигналів, що реалізує метод просторової обробки, інваріантний до частоти завад, шляхом покращення відношення сигнал-завада на виході схеми обробки сигналу за рахунок формування максимуму діаграми спрямованості в напрямку на космічний апарат та мінімуму діаграми спрямованості в напрямку завад.*

**Ключові слова:** контрольно-корегуюча станція, навігаційні визначення, точність.

### Вступ

**Постановка проблеми та аналіз літератури.** Процес створення та введення в дію на території України системи космічного навігаційно-часового забезпечення (СКНЧЗ) (в тому числі розгортання мережі контрольно-корегуючих станцій (ККС)) супроводжується рядом робіт по зменшенню впливу електромагнітних перешкод на точність навігаційних визначень. На сьогоднішній день ці роботи спрямовані на застосування спеціальних видів антен у вигляді багатoelementної антенної решітки (АР) з діаграмоутворюючою схемою (ДУС), що реалізує алгоритм просторової фільтрації. Аналіз літератури показав [4, 5], що застосування вище зазначених антен наряду з позитивними має і негативні результати, а саме:

- залежність діаграми спрямованості (ДС) фазованої антенної решітки (ФАР) від частоти, що пов'язано з використанням фазообертувачів або зумовлена геометрією решітки;
- необхідність часу на адаптацію;
- низька стійкість ДУС до зовнішніх впливів (самозбудження), що пов'язано з складністю алго-

ритмів адаптації;

- інформативні втрати, що пов'язано з самим принципом адаптації [8];
- погіршення геометричного фактору [5] та інші.

**Мета статті** – розробити метод підвищення точності навігаційних визначень.

### Постановка задачі і викладення матеріалів дослідження

Відомо [7], що для виконання навігаційних вимірів необхідно забезпечити бачення як мінімум чотирьох навігаційних космічних апаратів (НКА). Після повного розгортання сузір'я НКА в довільній точці Землі можуть бути видні від 5 до 12 НКА в довільний момент часу (при комплексуванні супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) кількість видимих супутників збільшується). Сучасні GPS приймачі мають від 5 до 12 каналів і більше, тобто можуть одночасно приймати сигнали від такої кількості НКА [1, 6]. 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. Точність навігаційних визначень визначається як [7]:

$$\sigma = K\sigma_{\text{ПВ}},$$

де  $K$  – геометричний фактор;  $\sigma_{\text{ПВ}}$  – точність визначення псевдовідстані.

Точність визначення псевдовідстані можливо визначити наступним чином [5]:

$$\sigma_{\text{ПВ}} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_c^2 + \sigma_{\text{тр}}^2 + \sigma_{\text{іон}}^2 + \sigma_{\text{бп}}^2 + \sigma_3^2}, \quad (1)$$

де  $\sigma_e, \sigma_c, \sigma_{\text{тр}}, \sigma_{\text{іон}}, \sigma_{\text{бп}}, \sigma_3$  – середньоквадратичні помилки визначення псевдовідстаней за рахунок помилок ефемеридних вимірів, синхронізації, незнання швидкостей розповсюдження радіохвилі в іоносфері та тропосфері, багатопроблемності та завад відповідно.

Оскільки похибки, що зумовлені завадами, являються найбільш значимими [7], то завдання з підвищення точності навігаційних визначень будемо вирішувати шляхом зменшення середньоквадратичної помилки визначення псевдовідстані за рахунок завад.

Середньоквадратична помилка визначення псевдовідстані за рахунок завад та власних шумів приймача визначається як [1]:

$$\sigma_3 = T_{\text{екв}} \sqrt{\Delta f_{\text{ст}} / (2q)},$$

де  $T_{\text{екв}}$  – еквівалентна довжина С/А коду (коду вільного доступу) ( $T_{\text{екв}} \approx 293$  м);  $\Delta f_{\text{ст}}$  – ширина смуги пропускання ланцюга стеження ( $\Delta f_{\text{ст}} \approx 1$  Гц).

Відношення потужності корисного сигналу до суми потужностей завад та шумів визначається як

$$q = P_{\text{сигн}} / (P_{\text{завад}} + P_{\text{шумів}}),$$

де  $P_{\text{сигн}}$  – потужність корисного сигналу;  $P_{\text{завад}}$  – потужність завад;  $P_{\text{шумів}}$  – потужність шумів.

В загальному випадку потужність сигналу, що передається прийнятною антеною в узгоджене навантаження, розраховується як [9]:

$$P = S \frac{\lambda^2}{4\pi} G_{\text{max}} F^2(\theta, \phi),$$

де  $S$  – щільність потоку потужності сигналу в точці приймання;  $\lambda$  – довжина хвилі сигналу;  $G_{\text{max}}$  – максимальне значення коефіцієнта підсилення приймальної антени;  $F(\theta, \phi)$  – значення ДС приймальної антени в напрямку супутника або джерела завади.

Із аналізу вище зазначених виразів слідує, що за рахунок використання направлених властивостей приймальної антени можливо підвищувати потужність корисного сигналу з одночасним зменшенням потужності завад.

Найбільш доцільно підвищення точності навігаційних визначень в складній електромагнітній обстановці здійснити через покращення  $q$  шляхом формування  $S$  – кількості ДС, що формують  $S$  максимумів на всі видимі супутники (збільшення поту-

жності корисного сигналу) та  $P$  провалів в напрямку завад (зменшення потужності завад) (рис. 1).

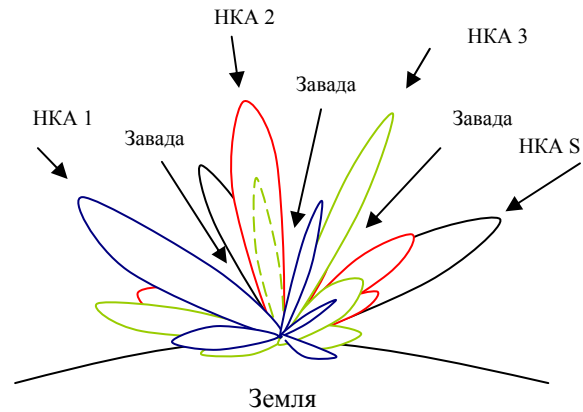


Рис. 1. Схема електромагнітної обстановки

Аналіз літератури показав [2, 3], що для захисту радіотехнічних та гідроакустичних систем від впливу електромагнітних завад на ряду з адаптивними методами можливо застосовувати і інваріантні методи (інваріантні антенні решітки (ІАР)). Оскільки місцевизначення та навігація за сигналами супутникових радіонавігаційних систем (СРНС) відносяться до числа задач, що вирішуються пасивним методом приймання широкопasmових шумоподібних фазокодуємих сигналів з системною синхронізацією, то для їх рішення можливо застосувати ІАР (або антенні решітки, інваріантні до завад).

Отже для формування необхідної кількості ДС, що керуються в двох площинах і формують  $S$  променів на всі видимі супутники та  $P$  провалів в напрямку завад, застосуємо плоску антенну решітку, на базі якої синтезуємо  $S$  інваріантних антенних решіток, синтез якої розглянуто в [3].

Визначимо структурну схему ІАР ККС, що забезпечить рішення навігаційної задачі при дії завад. В цьому випадку можливі такі варіанти побудови схеми:

- схема ІАР ККС при наявності апріорної інформації про положення НАКА та джерел завад у просторі;

- схема ІАР ККС при відсутності апріорної інформації про положення НАКА у просторі але при наявності апріорної інформації про положення джерел завад у просторі;

- схема ІАР ККС при наявності апріорної інформації про положення НАКА у просторі але при відсутності апріорної інформації про положення джерел завад у просторі;

- схема ІАР ККС при відсутності апріорної інформації про положення НАКА та джерел завад у просторі.

Розглянемо плоску антенну решітку з прямокутним розкритом, елементи якої розташовані в вузлах прямокутної сітки в площині  $xy$ . У напрямку осі  $x$  решітка має  $N$  елементів, у напрямку осі  $y$  має  $M$  елементів з відстанями між ними відповідно  $d_x, d_y$  (рис. 2).

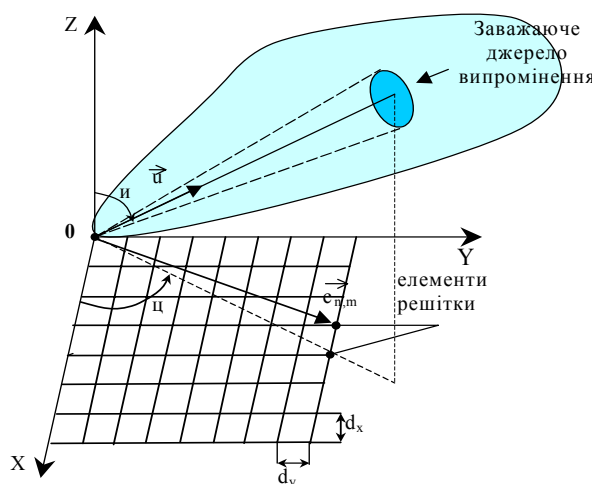


Рис. 2. Плоска антенна решітка з прямокутним розкритвом

В такому випадку діаграма спрямованості плоскої АР з прямокутним розкритвом, що складається з ізотропних елементів, буде мати вигляд [3]:

$$F(\bar{u}, \bar{u}_{\max}, \omega) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} A_{n,m} e^{j \left[ \frac{\omega}{c} \bar{r}_{n,m} \cdot (\bar{u} - \bar{u}_{\max}) \right]}, \quad (2)$$

де  $N, M$  – кількість елементів по осях  $x, y$  відповідно;  $n, m$  – номер елемента по осях  $x, y$  відповідно;  $A_{n,m}$  – амплітудний розподіл на відповідних елементах;  $c$  – швидкість розповсюдження радіохвиль;  $\omega$  – колова частота сигналу;  $\bar{r}_{n,m} = i n d_x + j m d_y$  – радіус-вектор від початку координат до  $n, m$  елемента;  $\bar{u} = i \sin \theta \cos \phi + j \sin \theta \sin \phi + k \cos \theta$  – одиничний вектор, що характеризує напрямок спостереження;  $\bar{u}_{\max}$  – одиничний вектор, що характеризує напрямок головного максимуму ДС АР.

Якщо на основі зазначеної АР побудуємо  $S$  ІАР, то схема ІАР ККС при наявності апріорної інформації про положення НКА та джерел завад у просторі буде мати вигляд, зображений на рис. 3.

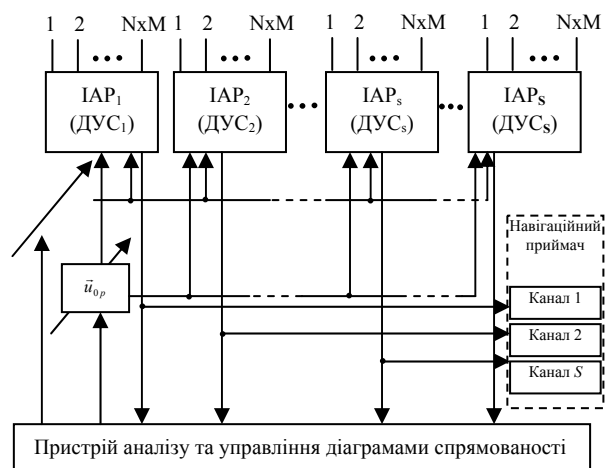


Рис. 3. Схема ІАР ККС при наявності апріорної інформації про положення НКА та джерел завад

Діаграма спрямованості  $s$ -ої ІАР формується з  $L$  антенних підрешіток (АПР), що фізично побудовані на базі однієї плоскої АР, задається у вигляді визначника (3):

$$F_{IARl}(\bar{u}, \bar{u}_{0p}, \omega) = \begin{vmatrix} F_{11} & F_{12} & \dots & F_{1l} & \dots & F_{1L} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \dots & \dots & \dots & \Phi_{2L} \\ \dots & \dots & \dots & \Phi_{pl} & \dots & \dots \\ \Phi_{L1} & \Phi_{L2} & \dots & \dots & \dots & \Phi_{LL} \end{vmatrix} \quad (3)$$

де  $F_{ll}$  – ДС  $l$ -ї АПР  $s$ -ї ІАР;  $\Phi_{p,l}$  – ЧХ базових фільтрів (БФ),  $p = 2 \dots L, l = 1 \dots L$ .

Максимум ДС  $s$ -ї ІАР вибирається у напрямку одного із видимих НКА. При зміні положення НКА у просторі за командами пристрою аналізу та управління діаграмою спрямованості здійснюється зміна затримки на  $n, m$  елементі, що відповідає напрямку сигналу, який приходить з головного максимуму  $s$ -ї ІАР. Окрім того, пристрій аналізу та управління діаграмою спрямованості здійснює розподіл ІАР по НКА. Таким чином здійснюється супровід НКА та забезпечення прийняття корисного сигналу максимальної потужності. З іншої сторони, у випадку наявності завад в ДУС змінюється затримка на  $n, m$  елементі базового фільтра [2, 3], що відповідає напрямку  $p$ -го нуля.

В даному випадку кількість ІАР повинна дорівнювати максимально-можливій кількості видимих НКА ( $S$ ), а кількість сформованих нулів  $K=L-1$ .

Нехай на базі плоскої АР побудовано  $S$  ІАР, які в свою чергу утворюють  $M$  сумарно-різницевих каналів (рис. 4). Кількість утворених сумарно-різницевих каналів виберемо по кількості каналів в ККС. Оскільки сумарно-різницевий канал утворений двома ІАР, то  $S=2M$ .

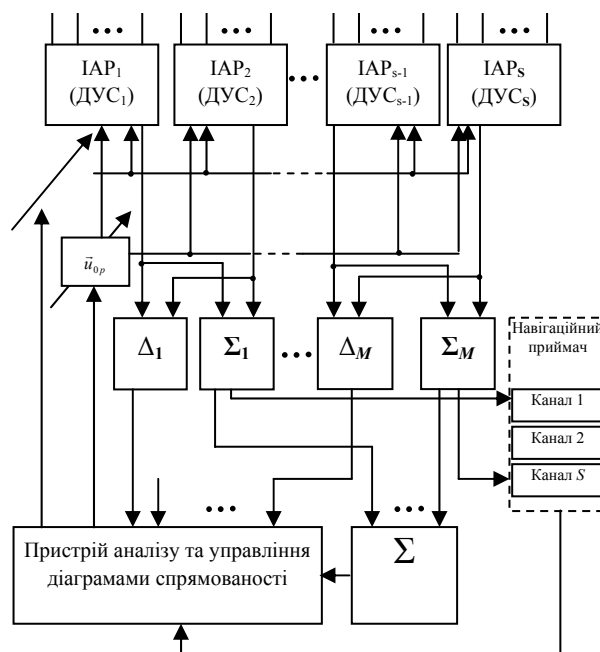


Рис. 4. ІАР, побудовані на базі плоскої АР

Діаграма спрямованості кожної пари ІАР по різницевому каналу забезпечить пошук одного із видимих НКА, а по сумарному – супровід та отримання сигналу від даного навігаційного космічного апарата.

Для рис. 4 напрямки максимумів підрешіток, наприклад в площині зміни кута  $\theta$ , будуть визначатись

$$\begin{aligned}\theta_{\max 1} &= \theta_{\text{НКА1}} - \Delta\theta; \\ \theta_{\max 2} &= \theta_{\text{НКА1}} + \Delta\theta,\end{aligned}\quad (4)$$

де  $\Delta\theta$  буде обиратись, виходячи з умови перетинання ДС на рівні половинної потужності.

Таким чином представлено схему побудови ІАР контрольно-корегуючих станцій при відсутності апріорної інформації про положення навігаційних космічних апаратів у просторі але при наявності апріорної інформації про положення джерел завад у просторі. Комбінація схем, представлених на рис. 3 та 4, дасть можливість реалізувати інші варіанти побудови ІАР контрольно-корегуючих станцій.

### Висновки

Для покращення точності навігаційних визначень можливо застосовувати антенну решітку з просторовою фільтрацією сигналів, що реалізує метод просторової обробки, інваріантний до частоти завад, шляхом покращення відношення сигнал-завада на виході схеми обробки сигналу за рахунок формування максимуму діаграми спрямованості в напрямку на космічний апарат та мінімуму діаграми спрямованості в напрямку завад.

### Список літератури

1. 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.
2. Коваленко М.В. Синтез інваріантних антенних решіток // Вісник ЖІТІ. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – №6. – С. 178 – 184.
3. Коваленко М.В., Колос Ю.О., Соболенко С.О., Романчук В.М. Синтез плоскої інваріантної антенної решітки // Збірник наукових праць ЖВІРЕ. – Житомир: ЖВІРЕ, 2003. – №9. – С. 102-113.
4. Скорик Е.Т., Крюков А.В. Адаптивная компенсация помех в спутниковых радионавигационных системах // Космична наука та технологія. – 2001. – Т. 7, №4. – С. 126-132.
5. Гуменюк В.О. Метод підвищення точності навігаційних визначень при застосуванні цифрових антенних решіток з врахуванням геометричного фактору та складної електромагнітної обстановки // Проблеми управління, навігації та зв'язку. – 2007. – № 6. – С. 48-56.
6. Соловьев Ю.А. Спутниковая навигация и ее приложения. – М.: Эко-Трендз, 2003. – 326 с.:ил.
7. Організація балістико-навігаційного забезпечення управління космічними апаратами: Підручник / О.Б. Захаров, В.О. Гуменюк, Р.М. Залужний та ін.; Під заг. ред. М.С. Січова. – К.: НАОУ, 2007. – 512 с.
8. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки. – М.: Радио и связь, 1986. – 446 с.
9. Шифрин Я.С. Антенны. – Х.: ВИРТА, 1976. – 407 с.

Надійшла до редколегії 5.05.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. наук. співр. Г.В. Худов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ КОНТРОЛЬНО-КОРРЕКТИРУЮЩИХ СТАНЦИЙ С ИНВАРИАНТНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКОЙ В СЛОЖНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКЕ

С.А. Соболенко, В.А. Гуменюк, В.М. Романчук

*Предлагается метод повышения точности навигационных измерений, свободный от недостатков известных методов. Для улучшения точности навигационных определений возможно применять антенную решетку с пространственной фильтрацией сигналов, которая реализует метод пространственной обработки, инвариантный к частоте помех, путем улучшения отношения сигнал-помеха на выходе схемы обработки сигнала за счет формирования максимума диаграммы направленности у направления на космический аппарат и минимума диаграммы направленности в направлении помех.*

**Ключевые слова:** контрольно-корректирующая станция, навигационные определения, точность.

### METHOD OF INCREASE OF EXACTNESS OF NAVIGATION DETERMINATIONS BY THE CONTROL CORRECTINGS STATIONS WITH AN INVARIANT ARRAY IN A STICKY ELECTROMAGNETIC WICKET

S.O. Sobolenko, V.O. Gumenyuk, V.M. Romanchuk

*The method of increase of exactness of the navigation measurements, free of lacks of the known methods, is offered. For the improvement of exactness of determinations of navigations it is possible to apply an aerial grate with spatial filtration of signals, which will realize the method of spatial treatment, invariant to frequency of hindrances, by the improvement of relation signal-hindrance on the output of chart of the signal processing due to forming of a maximum of diagram of orientation at sending to the space vehicle and a minimum of diagram of orientation in the direction of hindrances.*

**Keywords:** control-correcting station, determinations of navigations, exactness.