

УДК 621.396.654

Герасименко К. В., магістр. Тел.: +380 (97) 248 79 18. E-mail: c.herasymenko@gmail.com  
(Державний університет телекомунікацій, м. Київ)

## СИНТЕЗ КОМПЕНСАТОРА ЗАВАД ПРИЙМАЧАМ СУПУТНИКОВОЇ РАДІОНАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ АДАПТИВНОЇ ПРОСТОРОВОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

**Herasymenko K. V. Synthesis compensator of interference to the satellite radio navigation system receivers based on adaptive spatial filtering.** In order to achieve the specified tactical and technical characteristics is very important to study the potential spatial filter characteristics depending on the number and location of noise sources and navigation satellites. The paper proposed a method of synthesis of interference compensator to receivers of satellite radio navigation system. The method relies on an adaptive spatial filtering using adaptive antenna array with four-element antenna system and the space-time adaptation of the criterion of "minimum noise variance at the output". In addition, the method use representation of spatio-temporal filter by consistent implementation of spatial filtering – to interference suppression and time filtering – to focus on satellite navigation signals during implementation of the spatial adaptation by the quasi-optimal algorithm with reduced computational cost. Using this method allows to implement up to three sources of interference with acceptable computational cost, and to use in the resulting device for further time processing of traditional algorithms that are used in the receivers of satellite navigation systems.

**Keywords:** satellite navigation system, spatial filtering, interference compensator

**Герасименко К. В. Синтез компенсатора завад приймачам супутникової радіонавігаційної системи на основі адаптивної просторової фільтрації.** В роботі запропонована методика синтезу компенсатора завад приймачам супутникової радіонавігаційної системи на основі адаптивної просторової фільтрації. Використання методики дозволяє провести подавлення до трьох джерел завад із припустимими обчислювальними витратами та використовувати у результуючому пристрої для подальшої часової обробки традиційні алгоритми, які використовуються у приймачах супутникових радіонавігаційних систем.

**Ключові слова:** супутникова навігаційна система, просторова фільтрація, компенсатор завад

**Герасименко К. В. Синтез компенсатора помех приемникам спутниковой радионавигационной системы на основе адаптивной пространственной фильтрации.** В работе предложена методика синтеза компенсатора помех приемникам спутниковой радионавигационной системы на основе адаптивной пространственной фильтрации. Использование методики позволяет провести подавления до трех источников помех с допустимыми вычислительными затратами и использовать в результирующем устройстве для дальнейшей временной обработки традиционные алгоритмы, которые используются в приемниках спутниковых радионавигационных систем.

**Ключевые слова:** подавление, помеха, приемник, спутниковая навигационная система, пространственная фильтрация, компенсатор помех

**Вступ. Постановка задачі.** В сучасних умовах актуальними є наукові дослідження у галузі супутникової навігації, а саме, забезпечення високої ефективності процесу завадостійкості на основі апаратних та програмних засобів [1-11]. На даний час сформовано загальну теорію адаптивної просторової фільтрації, яка включає багато методів підвищення завадостійкості. На базі цих методів отримані оптимальні алгоритми обробки сигналів з виходів антенної решітки – оптимальні просторово-часові фільтри. Ці підходи забезпечують досягнення потенційних характеристик просторової обробки. Тому завдання щодо удосконалення процедури синтезу компенсатора завад приймачам супутникової радіонавігаційної системи на основі адаптивної просторової фільтрації є сучасним та актуальним.

**Основна частина.** З метою досягнення заданих тактико-технічних характеристик дуже важливим є дослідження потенційних характеристик просторових фільтрів залежно від числа і розташування джерел завад і навігаційних супутників. Серед підходів виділені наступні [6-11]:

Класичний *метод мінімуму вихідної потужності*, відповідно з яким у антенній решітці виділяють основну антену, вихід якої містить корисний сигнал і заваду, та додаткові (компенсаційні) антени, які не повинні містити корисного сигналу;

*Алгоритм оптимальної просторово-часової обробки.* За допомогою даного підходу визначаються параметри сигналу на основі багатоканального спостереження на деякому часовому інтервалі.

У літературі та на практиці найбільш часто розглядають дві антенні решітки: чотирьох- і семиелементну. Для забезпечення подавлення до 3-х джерел завад антеною системою з функцією завадозахисту достатньо використовувати чотирьохелементну антенну решітку. При цьому, для подавлення завад оптимальна відстань між елементами має дорівнювати половині довжини хвилі (для ГЛОНАСС/GPS, це близько 9 см). На Рис. 1 наведено приклад конфігурації 4-елементної системи та зв'язок якості подавлення і числа ДЗ.

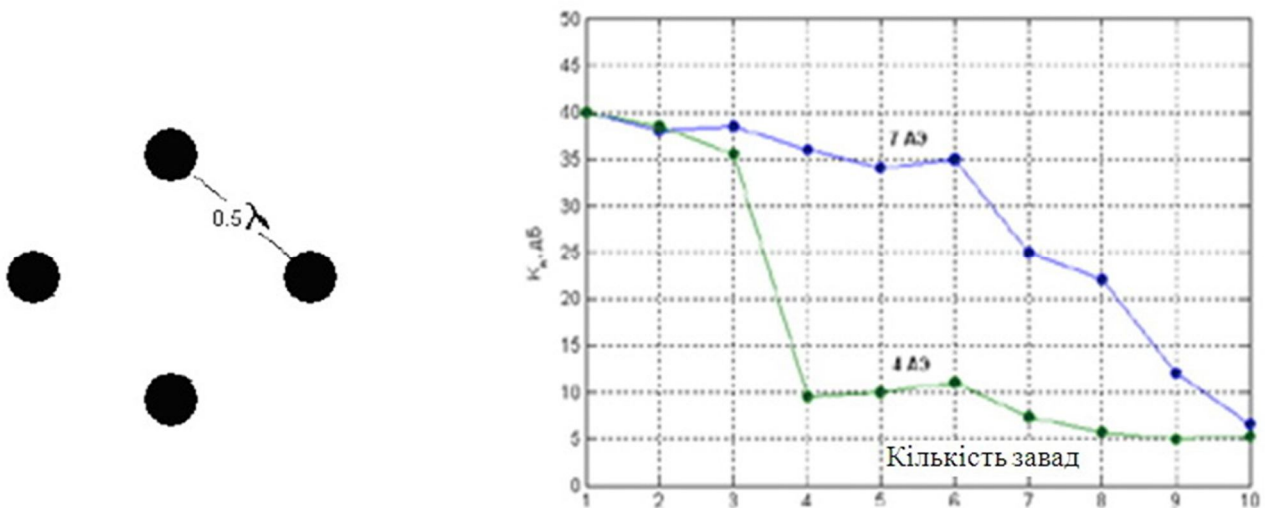


Рис. 1. Антенна система та вплив числа елементів на характеристики подавлення завад

У цілому спостереження з виходів елементів антени  $\xi_t$  входять в алгоритм об'єднаними в еквівалентне спостереження  $\eta_t$ , яке, є достатньою статистикою вектору  $\xi_t$ :

$$\xi_t = H_t s_t(\lambda_t) + \eta_t, \quad (1)$$

де  $s_t(\lambda_t)$  – сигнал з параметрами  $\lambda_t$  (навігаційними вимірюваннями);

$\tilde{\eta}_t$  – білий гаусів шум від джерел завад.

Оцінка шуканих значень навігаційних вимірювань отримується методом максимальної правдоподібності за максимумом кореляційного інтегралу

$$\hat{\lambda} = \arg \max \operatorname{Re} \left\{ \sum_{t=1}^T \eta_t s_t(\lambda_t) \right\}. \quad (2)$$

Оптимальний алгоритм просторово-часової обробки представлений на Рис. 2 у вигляді послідовно з'єднаних оптимального просторового фільтру і часового оптимального фільтру. При більш загальних постановках задачі, що включають змінні в часі параметри сигналу, змінні параметри  $H_t$  і  $V_t$ , що характеризують просторове розташування антенної решітки, навігаційних супутників і джерел завад, у структурі оптимального алгоритму змінюється тільки вид часового фільтру.

Найвідоміший з алгоритмів адаптації – простий кореляційний алгоритм Ширмана-Уїдроу:

$$\begin{cases} \alpha_{t+1} = \alpha_t - 2\mu\eta_t^* \xi_{2t}, \\ \eta_t = \xi_{1t} + \alpha_t^* \xi_{2t}. \end{cases} \quad (3)$$

Схема алгоритму (3) наведена на Рис. 3.

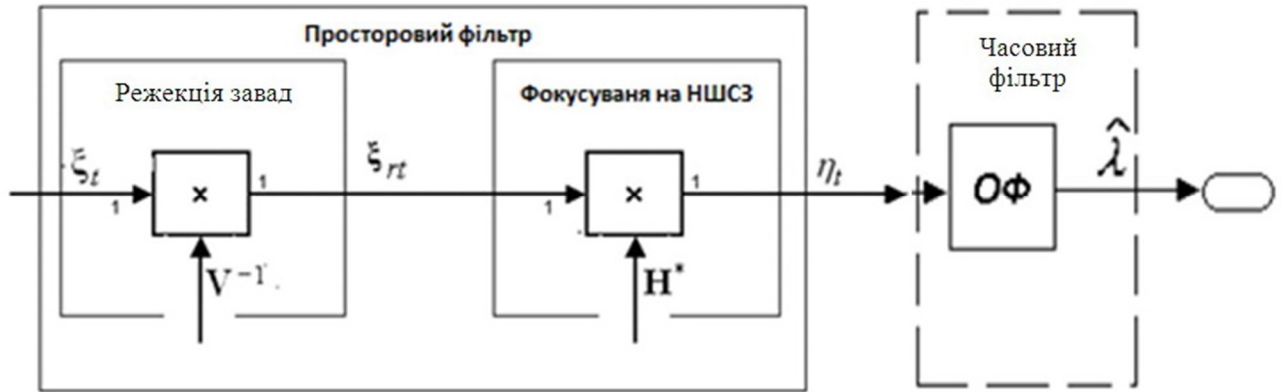
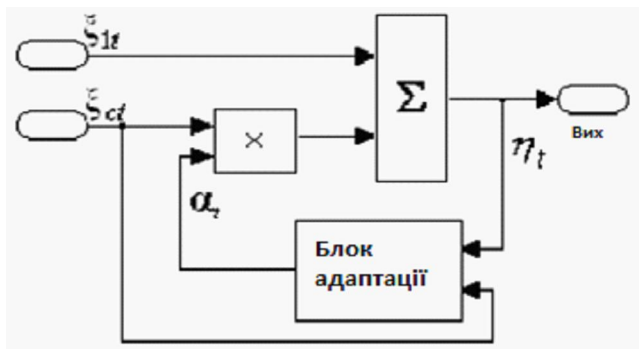


Рис. 2. Схема просторово-часового компенсатора



- $\xi_{1t}$  – вихід основної антени;
- $\xi_{2t}$  – вихід компенсаційної антени;
- $\alpha_t$  – вектор вагових коефіцієнтів;
- $\eta_t$  – вихід компенсатора завад.

Рис. 3. Структура компенсатора

Перевага схеми (Рис. 3) – простота, а головний недолік – великий час збіжності (одиниці-десятки мілісекунд).

Зменшити час збіжності можливо шляхом використання оптимального не слідкуючого алгоритму, схема якого представлена на Рис. 4, який є просторово-часовим, оскільки для обчислення статистики потрібно вести часову обробку (обчислення кореляційних інтегралів) у кожному антенному каналі. На рисунку використані позначення:

$$\tilde{W} = \sum_{v=1}^L \xi_v \xi_v^* - m \times m \text{-матриця};$$

$$Q_\lambda = \frac{1}{\sqrt{E}} \sum_{v=1}^L \xi_v s_v^*(\lambda) - m \text{-вектор};$$

$$E = \sum_{v=1}^L s_v(\lambda) s_v^*(\lambda).$$

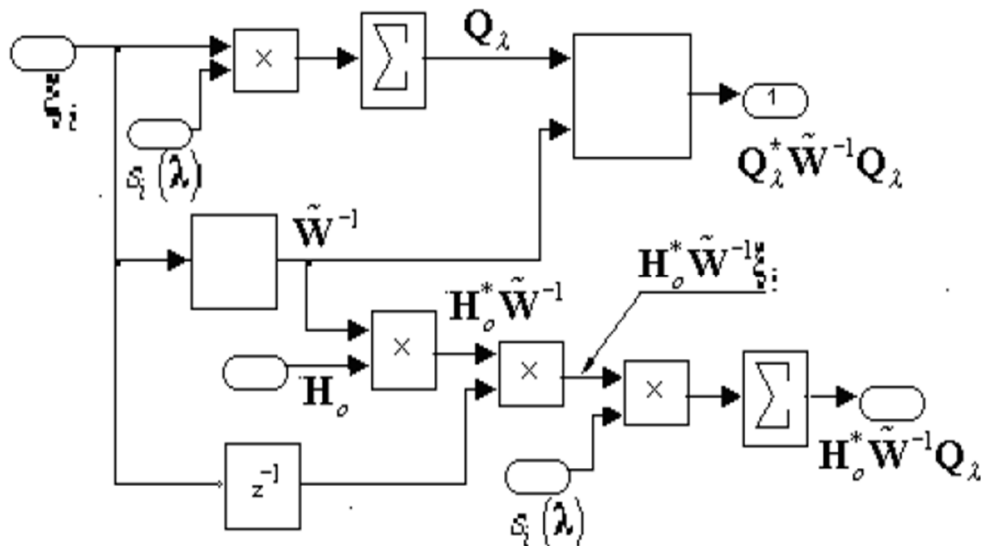


Рис. 4. Оптимальний алгоритм

Додатково зменшити часу адаптації, у порівнянні із алгоритмом (Рис. 4) є використання не слідкуючого квазіквасіоптимального алгоритму, якому відповідає схема представлена на Рис. 5.

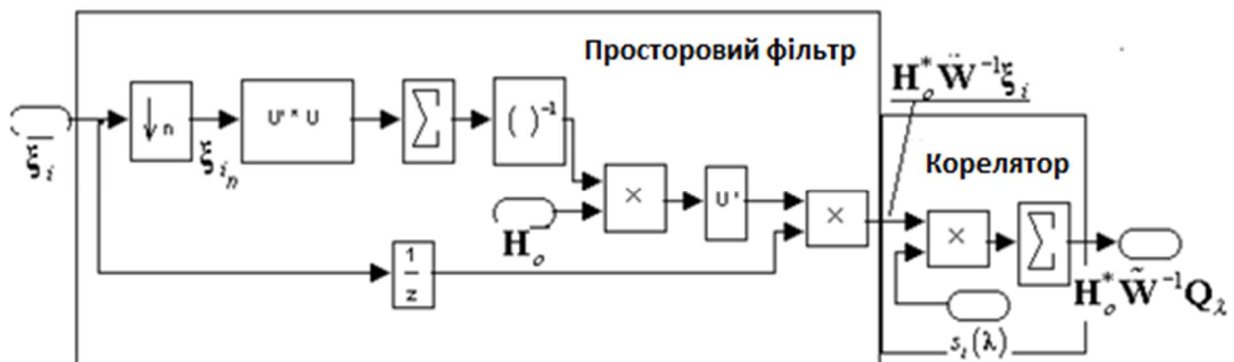


Рис. 5. Квазіоптимальний алгоритм

Вихід просторового фільтру – набір скалярів  $H_o^* \tilde{W}^{-1} \xi_i$ , що надходять на часовий скалярний фільтр – корелятор. Ця функція повністю покладається на приймач СРНС.

На Рис. 6 показані типові “криві адаптації” – залежність коефіцієнта подавлення на виході блоку просторової обробки від часу накопичення для оптимального алгоритму і для класичного компенсатора завад.

З аналізу характеристик адаптації (Рис. 6) можна побачити, що оптимальний алгоритм збігається до рівня «потенційний  $K_{\text{под}} -3\text{дБ}$ » приблизно за  $4 \times (\text{число антенних елементів})$  тактів (у даному випадку  $4 \times 4 = 16$ ), що відповідає теоретичному рівню. Класичному алгоритму потрібно близько тисячі тактів.

Узагальнюючи зазначене вище можливо записати методику синтезу компенсатора завад приймачам СРНС на основі адаптивної просторової фільтрації, яка має вигляд:

1 етап. Вибір виду антенної системи та розрахунок її параметрів. Вихідна вимога щодо подавлення – кількість завад до трьох. Обрано чотирьохелементну антенну решітку (Рис. 1).



Рис. 6. Характеристики адаптації

*2 етап. Вибір схеми просторово-часового компенсатору.* Критерій щодо компенсації завад – «мінімум дисперсії шуму на виході», який дає оптимальний просторово-часового фільтр (Рис.2). Компенсатор має блоки: просторовий, який забезпечує подавлення завади і фокусування на сигнали від СРНС, та часовий, який забезпечує виділення корисного сигналу (традиційна операція для приймачів СРНС).

*3 етап. Вибір алгоритму адаптації в антенному компенсаторі.* Критерій щодо компенсації завад (для просторового фільтру етапу 2) – задовільне подавлення завад (до рівня 40 дБ), при мінімальній обчислювальній складності результуючого алгоритму.

Реалізація адаптації за прийнятний час потребує проведення спрощення оптимального алгоритму та обумовлює вибір квазіоптимального алгоритму (Рис. 5).

*4 етап. Вибір підходів для усунення впливу факторів, що зменшують компенсацію завад, алгоритмів корекції приймальних трактів та алгоритмів компенсації вузькосмугових завад.* На цьому етапі враховуються фактори, що зменшують коефіцієнт подавлення, серед яких основними є: рівень внутрішнього шуму; неідентичність частотних характеристик каналів прийому та міжканальна розв'язка.

Для вирівнювання частотних характеристик каналів, розглянуті підходи, що зменшують вплив не ідентичності АЧХ/ФЧХ каналів – застосування коректору (еквалайзеру). Додатково, розглянуті основні спектрально-часові методи підвищення завадостійкості приймачів СРНС щодо впливу вузькосмугових завад: спектральні методи; часові методи – трансверсальні фільтри.

**Висновки.** Таким чином, в результаті досліджень удосконалено методику синтезу компенсатора завад приймачам супутникової радіонавігаційної системи на основі адаптивної просторової фільтрації, шляхом використання:

*по-перше*, адаптивної антенної решітки з чотирьохелементною антенною системою яка має відстань між елементами  $\lambda/2$  та просторово-часової адаптації за критерієм «мінімуму дисперсії шуму на виході»;

*по-друге*, поданням просторово-часового фільтру послідовним проведенням просторової фільтрації – для придушення завад, та часової фільтрації – для фокусування на сигнали навігаційних супутників, при проведенням просторової адаптації за

квазіоптимальним алгоритмом зі зменшеними обчислювальними витратами, що дозволяє провести подавлення до трьох джерел завад із припустимими обчислювальними витратами та використовувати у результуючому пристрої для подальшої часової обробки, традиційні алгоритми які використовуються у приймачах супутникових радіонавігаційних систем.

### **Література**

1. Герасименко К. В. Адаптивні антенні системи / К. В. Герасименко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. – Київ : 2010. – Ювілейний випуск. – С. 179-183.
2. Герасименко К. В. Вдосконалений BFGS-алгоритм придушення завад в сучасних навігаційних супутникових системах / К. В. Герасименко // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №3. – С. 75-80.
3. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.0. – Москва : Главкосмос, 2002. – 217 с.
4. Кравченко Ю. В. Аналіз основних способів зниження радіолокаційної помітності та можливості їх застосування до наземних та повітряних об'єктів / Ю. В. Кравченко, Т. І. Дубас // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – 2014. – №2. С. 19-25.
5. Кравченко Ю. В. Методика оцінки живучості псевдосупутникової радіонавігаційної системи зі змінною структурою / Ю. В. Кравченко, О. В. Лаврінчук, Р. М. Залужний // Труды університету. – Київ : НУОУ. – 2010. – № 98. – С. 115-120.
6. Харисов В. Н. Исследования характеристик алгоритма глубокой интеграции СРНС/ИНС / В. Н. Харисов, А. П. Горев // Радиотехника (журнал в журнале). – 2001. – №7. – С.56-63.
7. Харисов В. Н. Экспериментальные исследования алгоритма фильтрации относительных координат СРНС ГЛОНАСС с использованием фазовых измерений / В. Н. Харисов, Н. Т. Булавский // Радиотехника (журнал в журнале). – 1999. – №7. – С.40-48.
8. Харисов В. Н. Исследования одноэтапного алгоритма навигационно-временных определений для приемника СРНС / В. Н. Харисов, А. П. Горев // Радиотехника (журнал в журнале). – 2001. – №4. – С. 3-18.
9. Шатилов А. Ю. Разработка методов и алгоритмов оптимальной обработки сигналов и информации в инерциально-спутниковых системах навигации. Диссертационная работа. – Москва, МЭИ, 2007.
10. Interface Control Document: NAVSTAR GPS Space Segment // Navigation User Interfaces (ICD-GPS-200). – Rockwell International Corporation, 2003.
11. Rifkin R. Comparison of Narrowband Adaptive Filter Technologies for GPS / R. Rifkin. // MITRE Technical Report. – March 2000.

Дата надходження в редакцію: 02.07.2015 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Ю. В. Кравченко