

УДК 621.396.670

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

## ВДОСКОНАЛЕНИЙ BFGS-АЛГОРИТМ ПРИДУШЕННЯ ЗАВАД В СУЧАСНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМАХ

**Герасименко К. В. Вдосконалений BFGS-алгоритм придушення завад в сучасних навігаційних супутникових системах.** В роботі запропоновано підхід щодо придушення завад супутниковим радіонавігаційним сигналам, який базується на ідеї алгоритму складання сигналів від чотирьох випромінювачів з амплітудами й фазами такими, щоб сформувати нуль просторової діаграми спрямованості у бік джерела сигналу завади. Метод реалізує схему BFGS. Даний підхід враховує більшість особливостей процесу, що дозволяє значно підвищити завадозахищеність приймачів GPS сигналів.

**Ключові слова:** придушення, завада, приймач, BFGS-алгоритм, супутникові навігаційні сигнали

**Герасименко К. В. Усовершенствованный BFGS-алгоритм подавления помех в современных навигационных спутниковых системах.** В работе предложен подход к подавлению помех спутниковым радионавигационным сигналам, основанный на идее алгоритма сложения сигналов от четырех излучателей с амплитудами и фазами такими, чтобы сформировать ноль пространственной диаграммы направленности в сторону источника сигнала помехи. Метод реализует схему BFGS. Данный подход учитывает большинство особенностей процесса, что позволяет значительно повысить помехозащищенность приемников GPS сигналов.

**Ключевые слова:** подавление, помеха, приемник, BFGS-алгоритм, спутниковые навигационные сигналы

**Herasymenko K. V. Improved interference suppression BFGS-algorithm in modern satellite navigation systems.** In this paper an approach to the suppression of interference with satellite navigation signals is proposed. This approach is based on the idea of the algorithm combining the signals from four radiators with amplitudes and phases such as to form a zero spatial pattern in the direction of the interference signal source. Method implements the BFGS scheme. This approach takes into account most of the process features that can significantly improve the noise immunity of GPS signals receivers.

**Keywords:** suppression, interference, receiver, BFGS-algorithm, satellite navigation signals

**Вступ. Постановка задачі.** В сучасних умовах актуальними є наукові дослідження у галузі супутникової навігації, а саме, відносно забезпечення високої ефективності процесу завадостійкості на основі апаратних та програмних засобів. На підставі результатів аналізу досвіду експлуатації та розвитку цивільної авіації [1...5] встановлено, що в сучасних умовах зросли вимоги до безпеки польотів. Однією з важливих частин загальної проблеми безпеки польотів є підвищення ефективності системи навігаційного забезпечення польотів у процесі експлуатації та модернізації. В технічному плані система оснащена сучасними радіолокаційними, навігаційними, обчислювальними та іншими засобами, які вимагають своєчасної модернізації. Це пов'язано з постійним ростом інтенсивності польотів, а також із процесом відпрацювання ресурсу і моральним старінням, обумовленим бурхливим розвитком інформаційних технологій. Так за даними ІКАО складність управління повітряним рухом з 2009 р. до 2013 р. збільшилась на 8-11 %. В комплектуючих пристроях системи у середньому за рік експлуатації відпрацьовується від 5 % до 25 % ресурсних показників, а моральне старіння за той же період складає до 35 % [6..8].

Забезпечення завадостійкості приймачів супутникових радіонавігаційних сигналів на основі модернізації апаратних та програмних засобів вимагає наступних характеристик антенної системи:

- 1) коефіцієнт еліптичності антен повинен бути не більше 2;
- 2) діаграма спрямованості антен повинна забезпечувати одночасний прийом сигналів на заданих частотах у верхній півсфері в секторі кутів місця від 5° до 175°;
- 3) коефіцієнт підсилення випромінювачів антен (щодо ізотропного випромінювача із круговою поляризацією) не менш:
  - 2 дБ для кута місця 90° (у зеніті);
  - 0 дБ для кутів місця (у вертикальній площині) від 50° до 90°;

- мінус 4,0 дБ для кутів місця (у вертикальній площині) від 15° до 50°;
- мінус 7 дБ для кутів місця від 5° до 15°.

Таким чином, в умовах стрімкого розвитку галузі супутникової навігації загалом та якості передачі сигналів зокрема, актуальним є наукове завдання удосконалення існуючих та розробки нових моделей та методів придушення завад супутниковим навігаційним сигналам, вирішенню цього завдання і присвячена дана стаття.

**Просторово-часові методи підвищення завадостійкості приймачів навігаційної супутникової системи.** На даний час існує багато методів підвищення завадостійкості, таким чином сформувалась загальна теорія адаптивної просторово-часової фільтрації, на базі якої отримані оптимальні алгоритми обробки сигналів з виходів антенної решітки [1...5]. Ці алгоритми забезпечують досягнення потенційних характеристик просторової обробки. З метою досягнення заданих тактико-технічних характеристик дуже важливим є дослідження потенційних характеристик просторових фільтрів залежно від числа і розташування джерел перешкод і навігаційних супутників.

Серед алгоритмів слід виділити наступні [1...5]:

1. *Класичний метод мінімуму вихідної потужності ("нуль на заваду").* У класичному антенному компенсаторі перешкод виділяють основну антену, вихід якої містить корисний сигнал і завади, і додаткові (компенсаційні) антени, які не повинні містити корисного сигналу. Такий компенсатор завад часто використовується в радіолокації як компенсатор бічних пелюсток.

2. *Алгоритм оптимальної просторово-часової обробки.* За допомогою даного алгоритму визначаються параметри  $\lambda$  сигналу  $S_i(\lambda)$  на основі багатоканального спостереження  $\xi_i(t)$  на деякому часовому інтервалі  $t = \overline{1, T}$ .

Вище розглянуті алгоритми придушення завад (АПЗ) в умовах відомої сигнально-завадової обстановки. На практиці АПЗ повинен самостійно за прийнятою реалізацією знаходити найкращі вагові коефіцієнти, тобто, адаптуватися до невідомої сигнально-завадової обстановки. Алгоритми підстроювання вагових коефіцієнтів називають алгоритмами адаптації.

Алгоритми адаптації можна розділити на *прямі* і *слідкуючі*. Прямі алгоритми пов'язані з обчисленням кореляційної матриці завад, є оптимальними і забезпечують мінімальний час адаптації. Функціонування слідкуючих алгоритмів припускає відносно повільні зміни просторово-часової сигнально-завадової обстановки і зазвичай потребують більшого часу на адаптацію.

1. *Класичний алгоритм адаптації Ширмана-Уїдроу* є найвідомішим з алгоритмів адаптації, але має занадто великий час збіжності.

2. *Алгоритм адаптації з нормуванням.* Найпростіший спосіб істотно зменшити час адаптації – застосувати нормування прийнятих відліків за потужністю.

3. *Оптимальний неслідкуючий алгоритм.* Дуже проста модель цього алгоритму може адекватно описувати режим захоплення або "супроводу", якщо просторово-часовий алгоритм буде оптимальним, тобто швидким, і забезпечить захоплення на зазначеному інтервалі.

4. *Алгоритм із розділенням просторового і часового операторів,* в якому вся структура розпадається на просторовий і часовий фільтри.

Але як показали проведені дослідження, перераховані алгоритми не справляються з поставленою задачею завадопридушення в повній мірі. Деякі виконують свою задачу занадто повільно, деякі швидко, але неякісно, що недопустимо з урахуванням все зростаючої загальної проблеми безпеки польотів. Також слід мати на увазі багато факторів, що зменшують коефіцієнт придушення, серед яких основними є:

- рівень внутрішнього шуму;
- неідентичність частотних характеристик каналів прийому;

- міжканальна часова затримка поширення по розкритті антенної решітки;
- неідентичність поляризаційних характеристик антен;
- нелінійні спотворення в трактах обробки.

**Вдосконалений BFGS-алгоритм придушення завад в сучасних навігаційних супутникових системах.** Алгоритм придушення завади реалізує цифрову адаптивну чотирьохелементну антенну решітку з такою діаграмою спрямованості, щоб її нулі були орієнтовані у бік джерел сигналів завади. Передбачається, що нулі просторової діаграми спрямованості будуть глибиною не менш 40 дБ, що буде відповідати придушенню сигналів завади до аналогічного рівня. Для кожного з частотних діапазонів (L1 або L2) антенна решітка складається з чотирьох елементів (Рис. 1, 2), позначених Ант1 ... Ант4 і розташованих по сторонах квадрата на відстані  $\lambda/2$ . Всі випромінювачі мають широкую діаграму спрямованості і приймають сигнали у верхній півсфері. Для обох діапазонів алгоритм придушення однаковий.

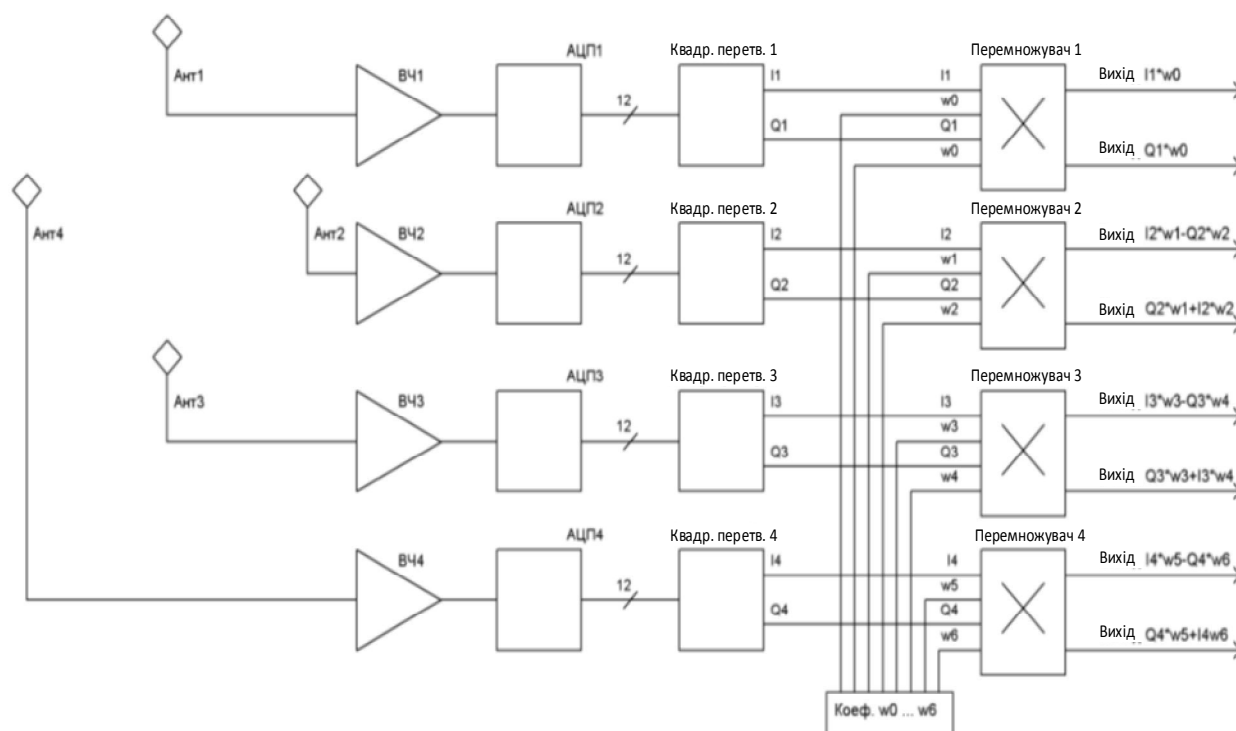


Рис. 1. Множення сигналів випромінювачів на комплексні коефіцієнти

Основна ідея алгоритму – скласти сигнали від чотирьох випромінювачів з амплітудами й фазами такими, щоб сформувати нуль просторової діаграми спрямованості у бік джерела сигналу завади. При цьому алгоритм буде підбирати амплітуди й фази кожного елемента з метою зменшення потужності сигналу завади. Амплітуди й фази на кожному елементі визначаються множенням сигналу, прийнятого від кожного випромінювача, на комплексний ваговий коефіцієнт. Комплексні коефіцієнти підбираються інерційно градієнтним квазіньютонівським методом (BFGS). Важливо, що сигнал завади на 0...60 дБ перевищує корисні навігаційні сигнали зі супутників. Крім того, супутники й джерела завад рознесені в просторі (по кутах). Тому антенна система з діаграмою спрямованості адаптивно змінюваної з метою зменшення потужності на сумарному виході (за умовою в основному на виході

присутня завада) зможе просторово її придушити. Розрахунки в MatLab це підтверджують. При цьому формована діаграма залишить більшу частину корисних сигналів від супутників, місце розташування яких не відповідає нулям діаграми спрямованості. Це дасть можливість далі визначити координати.

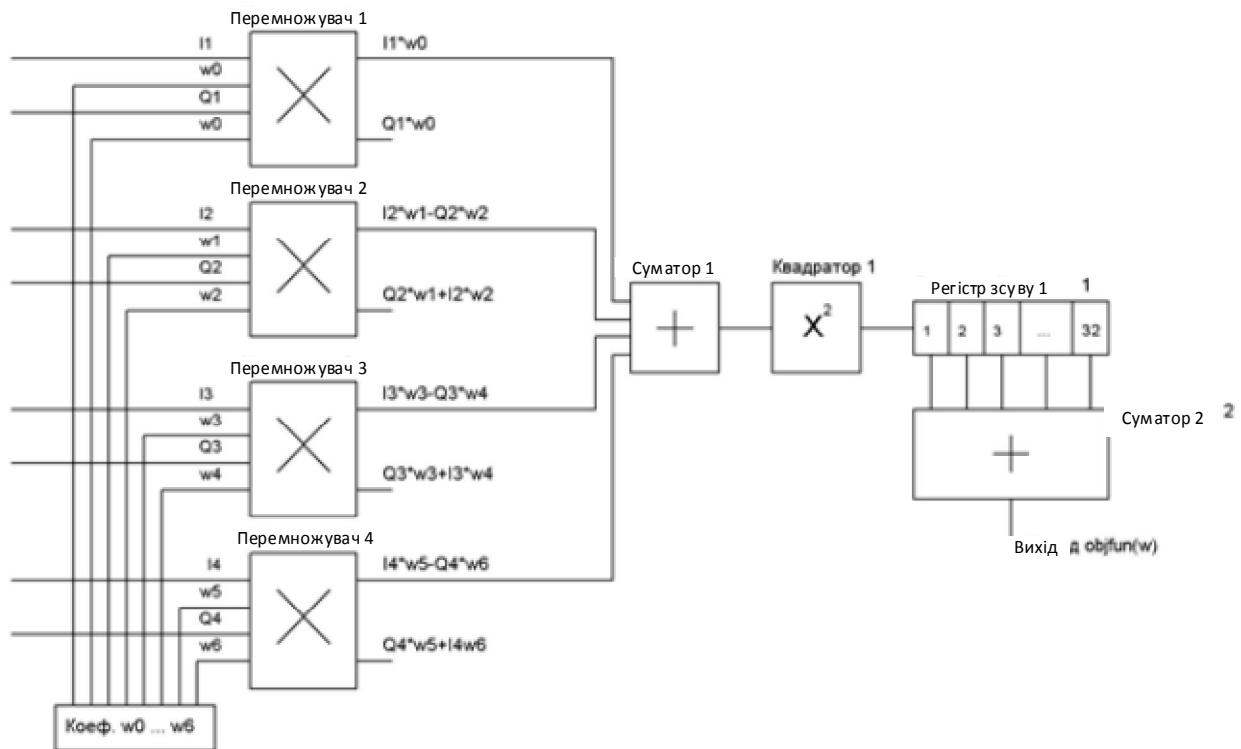


Рис. 2. Обчислення цільової функції

На Рис. 1, 2 сигнали з виходів чотирьох антенних випромінювачів після високочастотних блоків, що містять підсилювачі, змішувачі, фільтри тощо (позначені ВЧ на Рис.1), перетворюються в аналогові сигнали зі смугою порядку 15МГц.

Далі сигнал від кожного випромінювача оцифровується в АЦП, на виході кожного виходить 13-розрядний двійковий код з частотою проходження 81,25 МГц. Потім сигнал в кожному каналі розкладається на квадратурні складові I і Q (також 13-розрядні з частотою паралельного слідування 81.25 МГц).

Квадратурні складові сигналів позначені I1 Q1, I2 Q2, I3 Q3 та I4 Q4, відповідно. Ці сигнали використовуються далі як для формування сумарного сигналу на виході придушувача, так і для роботи алгоритму адаптивного придушення. На Рис. 1, 2 квадратурні складові сигнали використовуються для обчислення цільової функції objfun. При цьому алгоритм буде прагнути зменшити цю цільову функцію, відповідно зменшивши потужність завади.

**Ефективність роботи алгоритму завадопридушення на основі методу BFGS, методу сполучених градієнтів, методу найшвидшого спуску.** У рамках дослідження перевірені ефективність і швидкість роботи алгоритму завадопридушення на основі методу BFGS, методу сполучених градієнтів, методу найшвидшого спуску.

Порівняння швидкості роботи алгоритмів показане в Табл. 1...3. Метод сполучених градієнтів показує більш високу швидкість оптимізації, ніж метод BFGS, забезпечуючи після

30-40 ітерацій придушення не гірше 40 дБ. Метод найшвидшого спуску по швидкості лише трохи уступає методу сполучених градієнтів, але для випадку однієї й двох завод здатний досягти меншого рівня придушення завод. Таким чином, для заводопридушення рекомендується використовувати метод сполучених градієнтів. Зроблено висновок про те, що метод найшвидшого спуску використовує для рішення завдання оптимізації значення градієнта тільки на поточному кроці.

**Ефективність роботи алгоритмів заводопридушення для однієї заводи Табл. 1**

	Метод BFGS	Метод сполучених градієнтів	Метод найшвидшого спуску
Досягнення рівня придушення в 40 дБ, ітерацій	180-200	20-30	30-40
Досягнення максимального рівня придушення, ітерацій	300-400	150-200	40-50 (максимум менше на 15 дБ)

**Ефективність роботи алгоритмів заводопридушення для двох завод Табл. 2**

	Метод BFGS	Метод сполучених градієнтів	Метод найшвидшого спуску
Досягнення рівня придушення в 40 дБ, ітерацій	150-200	20-30	30-40
Досягнення максимального рівня придушення, ітерацій	200-250	100-150	40-50 (максимум менше на 2-4 дБ)

**Ефективність роботи алгоритмів заводопридушення для трьох завод Табл. 3**

	Метод BFGS	Метод сполучених градієнтів	Метод найшвидшого спуску
Досягнення максимального рівня придушення, ітерацій	200-250	30-40	50-60 (максимум менше на 2-4 дБ)

Метод BFGS відноситься до методів оптимізації, які засновані на нагромадженні інформації про кривизну цільової функції за спостереженнями за зміною градієнта. Метод враховує квадратичний характер цільової функції, і за рахунок цього в багатьох завданнях оптимізації є більш ефективним, ніж метод найшвидшого спуску. Недолік цього методу при його апаратної реалізації – обчислення Hessian з розмірністю  $[6 \times 6]$ . У методі сполученого градієнта (Флетчера-Рівса) будується послідовність напрямків пошуку, що є лінійними

комбінаціями поточного напрямку й попередніх напрямків, причому таких, щоб зробити напрямки пошуку сполученими. При цьому для обчислення нового напрямку пошуку використовуються тільки поточні й передостанній градієнти. Для деяких завдань оптимізації метод сполучених градієнтів більш ефективний, ніж метод BFGS.

**Висновки.** Перевірена працездатність алгоритму з реальною антенною системою. Для цього на антенну решітку в програмі, що реалізує електродинамічний розрахунок антени, подається плоска хвиля на частоті 1600,5 МГц із правою круговою поляризацією й площиною поляризації паралельної антенної решітки (нормальне падіння хвилі).

Для антен 1...4 розраховується амплітуда й фаза прийнятих сигналів. Ці дані переносяться в Matlab, де методом сполучених градієнтів розраховується необхідне значення коефіцієнтів. З урахуванням отриманих коефіцієнтів розраховується діаграма спрямованості решітки з антен 1...4. Видно, що отримані в результаті оптимізації коефіцієнти дозволяють отримати придушення завади не гірше 50 дБ.

### **Література**

1. Глобальная спутниковая навигационная система ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Редакция 5.0. – Москва : Главкосмос, 2002. – 217 с.
2. Тихонов В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов / В. И. Тихонов. – Москва : Радио и связь, 1986.
3. Харисов В. Н. Экспериментальные исследования алгоритма фильтрации относительных координат СРНС ГЛОНАСС с использованием фазовых измерений / В. Н. Харисов, Н. Т. Булавский. – Москва : Радиотехника (журнал в журнале). – 1999. – №7. – С. 40-48.
4. Харисов В. Н. Исследования характеристик алгоритма глубокой интеграции СРНС/ИНС / В. Н. Харисов, А. П. Горев. – Москва : Радиотехника (журнал в журнале). – 2001. – №7. – С. 56-63.
5. Харисов В. Н. Исследования одноэтапного алгоритма навигационно–временных определений для приемника СРНС / В. Н. Харисов, А. П. Горев. – Москва : Радиотехника (журнал в журнале). – 2001. – №4. – С. 3-18.
6. Кравченко Ю. В. Методика визначення параметрів оптимального управління випромінюванням радіонавігаційної інформації / Кравченко Ю. В., Лаврінчук О. В., Залужний Р. М. // Матеріали VI Наукової конференції Харківського університету Повітряних Сил імені І. Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору». – Харків: ХУПС, 2010. – С. 235.
7. Кравченко Ю. В. Методика оцінки живучості псевдосупутникової радіонавігаційної системи зі змінною структурою / Кравченко Ю. В., Лаврінчук О. В., Залужний Р. М. // Труды університету. – К.: НУОУ, 2010. – № 98. – С. 115-120.
8. Кравченко Ю. В. Методики синтезу просторової структури псевдосупутникової радіонавігаційної системи та програмного управління її змінною структурою / Ю. В. Кравченко, О. В. Лаврінчук // Труды університету. – К.: НУОУ, 2010. – № 100. – С. 144-154.

Дата надходження в редакцію: 22.08.2014 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О. Ю. Ільїн