

УДК 621.391+623.62

DOI: [https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.3\(23\).62-67](https://doi.org/10.34169/2414-0651.2019.3(23).62-67)**С. Д. ЗІБІН**, науковий співробітник<https://orcid.org/0000-0002-9426-2380>**А. О. ПОПОВ**, кандидат технічних наук, доцент<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>**В. В. ТВЕРДОХЛІБОВ**, кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>(Центральний науково-дослідний інститут
озброєння та військової техніки Збройних Сил
України, м. Київ)

Забезпечення завадозахищеності приймачів сигналів GNSS шляхом використання алгоритмів просторової фільтрації

Здійснюється оцінка потрібного рівня радіоелектронного захисту приймачів сигналів супутникових радіонавігаційних систем (СРНС), що забезпечують застосування наземних платформ озброєння та військової техніки, з урахуванням можливого радіоелектронного подавлення з боку противника. Розглядається адаптивний алгоритм просторової фільтрації сигналів СРНС в умовах впливу спеціально організованих завад з боку противника, побудований на основі рекурентного методу формування оцінки зворотної кореляційної матриці. На основі даного алгоритму створюється модель функціонування завадозахищеного приймача сигналів СРНС в умовах впливу активних завад. За допомогою створеної моделі оцінюється ефективність функціонування завадозахищеного приймача сигналів СРНС в умовах радіоелектронного подавлення.

Ключові слова: завадозахищеність, супутникові радіонавігаційні системи, радіоелектронний захист, радіоелектронне подавлення, кругова антенна решітка, просторова фільтрація сигналів, вектор вагових коефіцієнтів, рекурентний метод формування оцінки зворотної кореляційної матриці

Осуществляется оценка необходимого уровня радиоэлектронной защиты приемников сигналов спутниковых радионавигационных систем (СРНС), которые обеспечивают применение наземных платформ вооружения и военной техники, с учетом возможного радиоэлектронного подавления со стороны противника. Рассматривается адаптивный алгоритм пространственной фильтрации сигналов СРНС в условиях воздействия специально организованных помех со стороны противника, построенный на основе рекуррентного метода формирования оценки обратной корреляционной матрицы. На основе данного алгоритма создается модель функционирования помехозащищенного приемника сигналов СРНС в условиях воздействия активных помех. С помощью созданной модели оценивается эффективность функционирования помехозащищенного приемника сигналов СРНС в условиях радиоэлектронного подавления.

Ключевые слова: помехозащищенность, спутниковые радионавигационные системы, радиоэлектронная защита, радиоэлектронное подавление, круговая антенная решетка, пространственная фильтрация сигналов, вектор весовых коэффициентов, рекуррентный метод формирования оценки обратной корреляционной матрицы

ВСТУП

Проблеми підвищення завадозахищеності і завадостійкості є дуже гострими і досі не знайшли свого вирішення в більшості прикладних задач, наприклад, пов'язаних із розробкою терміналів глобальних супутникових радіонавігаційних систем (GNSS/СРНС) військового призначення. Вказані проблеми обумовлені швидким та ефективним розвитком систем та засобів радіоелектронного подавлення (РЕП), різким зростанням рівня взаємних завад внаслідок збільшення загальної кількості радіоелектронних засобів (РЕЗ), що використовуються в різних сферах людської діяльності, а також збільшенням рівня завад індустріального походження [1–4].

Так, наприклад, відомо, що функціонал радіоелектронного подавлення приймачів СРНС передбачено в наступних зразках багатофункціональних комплексів радіоелектронної боротьби (РЕБ): «Леер-2», ТОВ «НДІ «Еталон», РФ; «Инфауна» (РБ-531Б), ВАТ Концерн «Созвездие», РФ; «Репеллент», «Репеллент-1», ВАТ «Научно-технический центр радиоэлектронной борьбы», РФ; автоматизованій станції завад Р-330Ж, ВАТ Концерн «Созвездие», РФ; комплексі РЕБ з безпілотними літальними апаратами (БПЛА) «Шиповник-Аэро», ВАТ «Вега», РФ. Спеціально призначена для радіоелектронного подавлення приймачів СРНС, розміщених на борту засобів повітряного нападу (літаках ударної авіації та крилатих ракетах) система прикриття об'єктів від принципового застосування високоточної зброї «Поле-21Э», ФПГ «Оборонительные системы», РФ. Функціонал радіоелектронного подавлення приймачів СРНС забезпечується також на безпілотних літальних апаратах та авіаційних комплексах: комплексі аеродинамічно захищених передавачів завад Леер-3 (РБ-341В), РФ; комплекс БПЛА РЕБ «Туман-2», РБ; БПЛА РЕБ «Істра-07», РФ та ін. [3, 4].

Радіоелектронні системи та засоби передачі інформації, радіонавігації, радіолокації та інші, що розробляються компаніями – світовими лідерами для військової сфери використання суттєво відрізняються від їх аналогів, призначених для цивільного використання, насамперед тим, що вони здатні забезпечувати свої основні характеристики на рівні вище критичного в умовах впливу спеціально організованих завад (рис. 1).

Тому існує об'єктивна потреба в оцінці необхідного рівня радіоелектронного захисту радіоелектронних засобів СРНС з урахуванням можливого радіоелектронного подавлення з боку противника, а з іншого боку, в оцінці ефективності роботи РЕЗ СРНС в умовах впливу завад, що, власне, є метою даної статті.

Для оцінки потрібного рівня радіоелектронного захисту терміналів супутникових радіонавігаційних систем військового призначення, що застосовуються в зразках ОВТ наземного базування в тактичній ланці управління з урахуванням можливого радіоелектронного подавлення з боку противника, необхідно враховувати декілька факторів: особливості бойового застосування засобів РЕБ наземного та повітряного базування тактичної ланки управління; характеристики та особливості їх

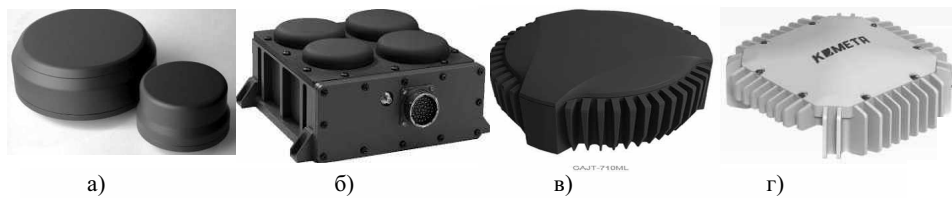


Рис. 1. Зразки завадозахищених приймачів сигналів СРНС виробництва компаній:
а) Raytheon UK, Великобританія; б) Rockwell-Collins, США; в) NovAtel, Канада;
г) ВНДІ «Прогрес», РФ

антенних систем; рівні потужностей випромінювання та види задових сигналів; рівні корисних сигналів від СРНС на вході приймачів наземного базування, поляризацію цих сигналів; рівень чутливості приймачів сигналів СРНС.

З аналізу зразків засобів РЕБ РФ [3, 4] випливає, що для вирішення завдань з РЕП наземних терміналів СРНС військового призначення можуть залучатись багатофункціональні засоби та комплекси РЕБ із значним енергетичним потенціалом, що застосовуються, зазвичай, на відстані 5...7 км від лінії зіткнення, так і малогабаритні малопотужні засоби РЕБ наземного та повітряного базування, спеціально створені для РЕП терміналів СРНС, які можуть застосовуватись на відстані 1...2 км від засобів, що подавляються. Враховуючи те, що сигнали СРНС використовують кругову поляризацію та відомі несучі частоти, засоби РЕБ для РЕП терміналів СРНС застосовують задові сигнали з лінійною поляризацією, прицільні по частоті, як правило, з частотною модуляцією в межах смуги частот корисних сигналів. В подальших розрахунках вважатимемо, що наземні засоби РЕБ використовують для РЕП наземних терміналів СРНС задові сигнали з потужністю 100 та 20 Вт, антенні системи з коефіцієнтом підсилення до 7 дБ для забезпечення широкого, до 120 градусів, сектору РЕП, а БПЛА РЕБ використовують для цієї мети задові сигнали з потужністю 20 та 5 Вт та неспрямовані антени.

На рис. 2а показані рівні $P(R)$ корисних сигналів та завад від наземної станції РЕБ на вході приймача сигналів СРНС як функції від відстані R між ними, яка відображена в логарифмічному масштабі по обох координатах. На рис. 2б показані рівні корисних сигналів та завад від БПЛА РЕБ на вході приймача сигналів СРНС

в залежності від відстані між ними, яка відображена в логарифмічному масштабі. Залежності, показані на рис. 2а, 2б побудовані на основі відомих співвідношень, наведених, наприклад, в [5, 6].

Рівні задових сигналів малої та великої потужності від засобу РЕБ на обох рисунках наведені штриховою та суцільною лініями відповідно. Штрих-пунктирною лінією на обох рисунках показано типовий рівень чутливості приймача сигналів СРНС ($-165 \text{ дБ} \cdot \text{Вт}$) [7]. Рівні корисних сигналів на вході приймача сигналів СРНС ($-160 \dots -155 \text{ дБ} \cdot \text{Вт}$) [7] наведені сірим прямокутником. Задача вибору необхідного коефіцієнта подавлення $K_{\text{п}}$ задових сигналів вирішується графічним способом, виходячи з критерію забезпечення решти шумів після компенсації задових сигналів за допомогою спеціальної обробки сигналів в антенній решітці на рівні чутливості приймача сигналів СРНС. Як випливає з обох рисунків, для забезпечення необхідного рівня компенсації задових сигналів від засобів РЕБ наземного та повітряного базування, треба забезпечити коефіцієнт подавлення $K_{\text{п}}$ задових сигналів не гірше 86 дБ.

Таким чином, при визначенні технічних вимог стосовно радіоелектронного захисту до терміналів СРНС військового призначення, що застосовуються в тактичній ланці управління для забезпечення наземних платформ озброєння та військової техніки, достатньо забезпечити коефіцієнт подавлення задових сигналів на 86 дБ.

Предметом наступного розгляду буде дослідження можливостей алгоритмів адаптивної просторової фільтрації сигналів СРНС. Для забезпечення ефективної роботи приймачів сигналів СРНС в умовах впливу завад доцільно використовувати адаптивні алгоритми обробки сигналів в кільцевій антенній решітці. Адаптивні

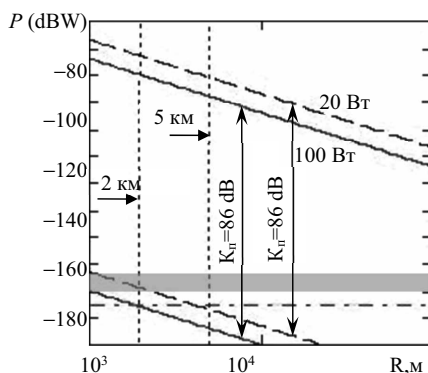


Рис. 2а. Рівні корисних сигналів та завад від наземної станції РЕБ на вході приймача сигналів СРНС

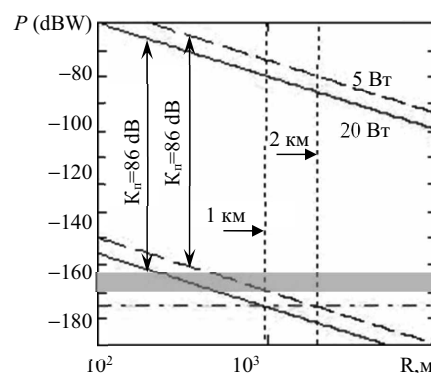


Рис. 2б. Рівні корисних сигналів та завад від БПЛА РЕБ на вході приймача сигналів СРНС

системи й алгоритми просторової обробки сигналів використовуються, як правило, коли: а) умови приймання корисного сигналу (наприклад, спектральна щільність потужності завадового сигналу та напрямки його приходу, напрямки приходу корисного сигналу та ін.) невідомі та/або змінюються в часі, що зазвичай має місце при прийомі сигналів СРНС; б) обчислювальні ресурси системи вкрай обмежені й не дозволяють реалізовувати алгоритми, що використовують безпосереднє обчислення зворотної кореляційної матриці, що також має місце, оскільки при прийомі сигналів СРНС може здійснюватися обробка сигналів від шістьох супутників одночасно; в) необхідно вирішувати завдання поліпшення якості приймання сигналів та ін. Зазвичай, у відомих роботах [11—13] та ін. завдання забезпечення радіоелектронного захисту приймачів сигналів СРНС від впливу засобів РЕБ вирішується шляхом, по-перше, визначення напрямків приходу сигналів завад за допомогою відомих алгоритмів максимальної правдоподібності (maximum likelihood (ML)), мінімальної норми (minimum-norm (MN)), множинної класифікації сигналів (multiple signal classification (MUSIC)), а по-друге, на основі отриманої інформації з використанням алгоритму мінімальної дисперсії при лінійному обмеженні (linear constraint minimum variance (LCMV)) здійснюється формування глибоких нулів діаграми спрямованості антенної решітки в напрямках приходу завадових сигналів. Такий подвійний цикл (визначення напрямків приходу завадових сигналів – компенсація завад) потребує значних обчислювальних ресурсів системи обробки сигналів, а по-друге, витрачає зайвий час, необхідний для реалізації даних алгоритмів, що призводить до збільшення помилок визначення координат терміналу користувача. Ми розглянемо алгоритм адаптивної просторової фільтрації сигналів СРНС в кільцевій антенній решітці, побудований на рекурентному методі формування оцінки зворотної кореляційної матриці [8, 9], якому не притаманні визначені недоліки, в той же час він має гарні характеристики збіжності до оптимального рішення за критерію мінімуму середньоквадратичної помилки.

Адаптивний алгоритм, заснований на рекурентному методі формування оцінки зворотної кореляційної матриці [10 (7.29)], має такий вигляд:

$$\mathbf{w}(t_m) = [w_1(t_m), \dots, w_n(t_m)]^T = \frac{1}{1-\beta} \left[\mathbf{w}(t_{m-1}) - \mathbf{k}(t_m) \left(\mathbf{a}^T(t_m) \mathbf{w}(t_{m-1}) \right) \right]; \quad (1)$$

$$\mathbf{k}(t_m) = \frac{\beta \Phi_a(t_{m-1}) \mathbf{a}(t_m)}{(1-\beta) + \beta \mathbf{a}^T(t_m) \Phi_a(t_{m-1}) \mathbf{a}(t_m)}; \quad (1a)$$

$$\Phi_a(t_m) = \frac{1}{1-\beta} \left(\Phi_a(t_{m-1}) - \mathbf{k}(t_m) \mathbf{a}^T(t_m) \Phi_a(t_{m-1}) \right); \quad (1b)$$

$$\Phi_a(t_0) = \hat{\mathbf{R}}_a^{-1}(t_0) = c \cdot \mathbf{I}, \quad \mathbf{I} = [\delta_{ik}]; \quad (1b)$$

$$\mathbf{w}(t_0) = \mathbf{w}_0; \quad (1r)$$

$$y(t) = \sum_{i=1}^n \overline{w_i(t)} a_i(t) = \overline{\mathbf{w}^T(t)} \mathbf{a}(t), \quad (2)$$

де $t = t_m = t_0 + m \cdot \Delta t$; $m = 0, 1, \dots, N-1$; Δt – інтервал дискретизації сигналів; N – число відліків, що використовуються при обробці; $\mathbf{a}(t_m) = [a_1(t_m), \dots, a_n(t_m)]^T$ – вектор (1) спостережуваного процесу $\mathbf{a}(t)$; співвідношення (1a) визначає вектор коефіцієнта підсилення розмірністю $n \times 1$; співвідношення (1b) визначає ітеративну зміну матриці $\Phi_a(t) = \mathbf{R}_a^{-1}(t)$; $\hat{\mathbf{R}}_a(t)$ – оцінка кореляційної матриці вектора $\mathbf{a}(t_m) = [a_1(t_m), \dots, a_n(t_m)]^T$; β – відносна вага значимості поточних даних, яка вибирається, виходячи з параметрів кореляційної матриці \mathbf{R}_a : $0 < \beta < 1/(10 \text{tr}(\mathbf{R}_a))$ або $0 < \beta < 1/10\lambda_{\max}$, де $\text{tr}(\mathbf{R}_a)$ – слід матриці \mathbf{R}_a ; λ_{\max} – максимальне власне значення матриці \mathbf{R}_a ; співвідношення (1b), (1r) визначають початкові умови для кореляційної матриці й вектора вагових коефіцієнтів відповідно; \mathbf{w}_0 – вихідне значення вектора вагових коефіцієнтів; \mathbf{I} – одинична матриця; δ_{ik} – символ Кронекера: $\delta_{ik} = 1$, якщо $i = k$; $\delta_{ik} = 0$, якщо $i \neq k$; $c = \text{const}$.

Виходячи з необхідності отримання інформації з шістьох (принаймні з чотирьох) супутників, загальний алгоритм обробки сигналів повинен передбачати паралельні обчислювання за алгоритмом (1), (2) для шістьох різних – вихідних значень вектора вагових коефіцієнтів \mathbf{w}_0 : $\mathbf{w}_{0,1}, \mathbf{w}_{0,2}, \dots, \mathbf{w}_{0,6}$, формування яких здійснюмо, виходячи з таких міркувань.

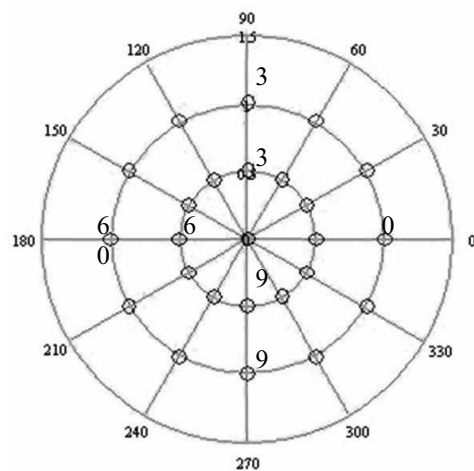


Рис. 3. Розміщення елементів вузькосмугової кільцевої антенної решітки та їх нумерація

Розглянемо вузькосмугову кільцеву антенну решітку, розміщення 25 елементів якої показано на рис. 3, при цьому на внутрішньому та зовнішньому кільцях знаходиться по 12 елементів, нумерація яких показана на рисунку, а радіуси кілець дорівнюють відповідно: $R_i = 0.5\lambda$, $R_{II} = \lambda$, λ – довжина хвилі електромагнітних коливань, на яку налаштована антенна решітка.

Якщо вагові коефіцієнти відповідних елементів взяти так, як вказано на діаграмоутворюючих співвідношеннях, зазначених нижче, можна отримати шість різних діаграм спрямованості 25-елементної кругової антенної решітки, які відображені на рис. 4а і 4б:

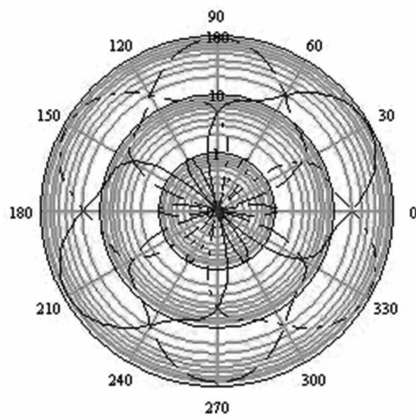


Рис. 4а. Діаграми спрямованості 25-елементної кругової антенної решітки, що визначається формулою (3)

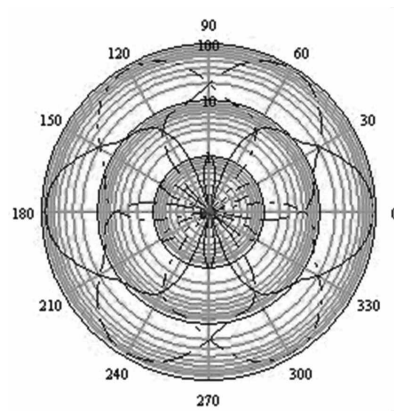


Рис. 4б. Діаграми спрямованості 25-елементної кругової антенної решітки, що визначається формулою (4)

$$A_{1,2,3}(\varphi) = 1 + \left[\sum_{i=0}^{11} \exp(j2\pi R_i (\cos(\pi \cdot i/6) \cos \varphi + \sin(\pi \cdot i/6) \sin \varphi)) \right] \cdot B_{1,2,3}(i) + \left[\sum_{i=0}^{11} \exp(j2\pi R_{II} (\cos(\pi \cdot i/6) \cos \varphi + \sin(\pi \cdot i/6) \sin \varphi)) \right] \cdot C_{1,2,3}(i); \quad (3)$$

де $B_1(i) = \max(\delta(i,0), \delta(i,2), \delta(i,6), \delta(i,8))(-1)$;

$B_2(i) = \max(\delta(i,2), \delta(i,4), \delta(i,8), \delta(i,10))(-1)$;

$B_3(i) = \max(\delta(i,4), \delta(i,6), \delta(i,10), \delta(i,0))(-1)$;

$C_1(i) = \max(\delta(i,0), \delta(i,1), \delta(i,2), \delta(i,6), \delta(i,7), \delta(i,8))$;

$C_2(i) = \max(\delta(i,2), \delta(i,3), \delta(i,4), \delta(i,8), \delta(i,9), \delta(i,10))$;

$C_3(i) = \max(\delta(i,4), \delta(i,5), \delta(i,6), \delta(i,10), \delta(i,11), \delta(i,0))$;

$$A_{4,5,6}(\varphi) = 1 + \left[\sum_{i=0}^{11} \exp(j2\pi R_I (\cos(\pi \cdot i/6) \cos \varphi + \sin(\pi \cdot i/6) \sin \varphi)) \right] \cdot B_{4,5,6}(i) + \left[\sum_{i=0}^{11} \exp(j2\pi R_{II} (\cos(\pi \cdot i/6) \cos \varphi + \sin(\pi \cdot i/6) \sin \varphi)) \right] \cdot C_{4,5,6}(i); \quad (4)$$

де $B_4(i) = \max(\delta(i,11), \delta(i,1), \delta(i,5), \delta(i,7))(-1)$;

$B_5(i) = \max(\delta(i,1), \delta(i,3), \delta(i,7), \delta(i,9))(-1)$;

$B_6(i) = \max(\delta(i,3), \delta(i,5), \delta(i,9), \delta(i,11))(-1)$;

$C_4(i) = \max(\delta(i,11), \delta(i,0), \delta(i,1), \delta(i,5), \delta(i,6), \delta(i,7))$;

$C_5(i) = \max(\delta(i,1), \delta(i,2), \delta(i,3), \delta(i,7), \delta(i,8), \delta(i,9))$;

$C_6(i) = \max(\delta(i,3), \delta(i,4), \delta(i,5), \delta(i,9), \delta(i,10), \delta(i,11))$,

де $\delta(i,k)$ – символ Кронекера: $\delta(i,k) = 1$, якщо $i = k$; $\delta(i,k) = 0$, якщо $i \neq k$.

Коефіцієнти $B_{1,2,3}(i); C_{1,2,3}(i), B_{4,5,6}(i); C_{4,5,6}(i)$ у формулах (3), (4) визначають шість різних вихідних значень вектора вагових коефіцієнтів \mathbf{W}_0 : $\mathbf{W}_{0,1}, \mathbf{W}_{0,2}, \dots, \mathbf{W}_{0,6}$ (1г) для внутрішнього та зовнішнього кілець антенної решітки, забезпечують первинне створення шістьох діаграм спрямованості, які наведені на рис. 4а і 4б відповідно.

Співвідношення (1) – (4) визначають модель функціонування завадозахищеного приймача сигналів СРНС в умовах впливу активних завад, яку можна застосовувати для оцінки ефективності його функціонування в складних умовах радіоелектронного подавлення для різних видів антенних решіток.

Роботу адаптивного алгоритму, що забезпечує захист від потужних спеціально створюваних завад, заснованого на методі рекурентної інверсії кореляційної матриці, проілюструємо наступним прикладом.

Приклад. Нехай на входах 25-елементної кругової антенної решітки (рис. 3) спостерігається адитивна суміш шістьох корисних сигналів $s_1(t), \dots, s_6(t)$ від шістьох супутників, що приходять із напрямків за азимутом та кутом місця відповідно: $\varphi_s = 0^\circ, 30^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 210^\circ, 270^\circ$; $\theta_s = 5^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 20^\circ, 45^\circ$; двох завадових сигналів $u_1(t), u_2(t)$, що приходять із напрямків за азимутом та кутом місця відповідно $\varphi_1 = 45^\circ$; $\varphi_2 = 300^\circ$; $\theta_1 = \theta_2 = 90^\circ$ при постановці активних завад станціями РЕБ, а також некорельованого квазібілого гаусовського шуму $n(t)$, що діє в каналах приймання антенної решітки. Сигнали $u_1(t), u_2(t)$ являють собою прицільні по частоті частотно-модульовані завади. Співвідношення сигнал – завада в окремому i -ому прийомному каналі антенної решітки становили величини, близькі до -90 дБ. Співвідношення сигнал-шум складало величину, близьку до 5 дБ.

На рис. 5а і б показані результуючі сигнали $y_4(t), y_6(t)$ на виході пристрою обробки (суцільною лінією), обумовлені рівняннями (2) та корисні сигнали $s_4(t), s_6(t)$ (пунктиром), що надходять на входи антенної решітки із четвертого та шостого супутників відповідно, за умови, що вихідні значення вектора вагових коефіцієнтів \mathbf{W}_0 : $\mathbf{W}_{0,1}, \mathbf{W}_{0,2}, \dots, \mathbf{W}_{0,6}$ (1г) для внутрішнього та зовнішнього кілець антенної решітки обрані у відповідності до формул (3) і (4). Коефіцієнти кореляції між корисним сигналом $s_i(t)$ і сигналом $y_i(t)$ на виході просторового фільтра, що реалізує алгоритм (1) і (2), приймали значення $r[y_i(t), s_i(t)] = 0.32 \dots 0.49$, що відповідає наявності шумів після компенсації на рівні $D[n_i(t)] / D[s_i(t)] = 1 \dots 3$. З цього випливає, що співвідношення сигнал-шум для C/A коду

складатиме величину $E/N_0 = D[s_i(t)]T_s / (D[n_i(t)]/\Delta f) = D[s_i(t)]B_s / D[n_i(t)] = 0.33 \dots 1 B_s$, де $B_s = 1023$, що забезпечуватиме задовільну якість навігаційної інформації, яка отримується в ході подальшої обробки сигналів.

ВИСНОВКИ

1. При визначенні технічних вимог стосовно радіоелектронного захисту до терміналів СРНС військового призначення, що застосовуються в тактичній ланці управління для забезпечення застосування наземних платформ озброєння та військової техніки, достатньо забезпечити коефіцієнт подавлення завадових сигналів на 86 дБ.

2. Наведені співвідношення (1) – (4) визначають модель функціонування завадозахищеного приймача сигналів СРНС в умовах впливу активних завад, яку можна застосовувати для оцінки ефективності його функціонування в складних умовах радіоелектронного подавлення для різних видів антенних решіток.

3. Симуляція функціонування завадозахищеного приймача сигналів СРНС в умовах впливу активних завад на основі адаптивного алгоритму, що забезпечує захист від потужних спеціально створюваних завад, заснованого на методі рекурентної інверсії оцінки кореляційної матриці, дає підстави стверджувати, що необхідний коефіцієнт подавлення може бути досягнутий при застосуванні кільцевої 25-елементної антенної решітки.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Чепков І. Б., Нор П. І. Загальні тенденції розвитку озброєння та військової техніки. Озброєння та військова техніка, 2014. № 1 (1). С. 4–13.
2. Попов А. О., Твердохлібов В. В. Загальні тенденції розвитку засобів радіоелектронної боротьби. Озброєння та військова техніка, 2014. № 4 (4). С. 4–10.
3. Зібін С. Д., Попов А. О., Твердохлібов В. В. Аналіз сучасного стану розвитку систем радіоелектронної протидії безпілотним літальним апаратам. Зб. наук. пр. ЦНДІ ОБТ ЗС України, Київ, 2016. № 4 (63), С. 118–131.
4. Сергієнко В. Д., Зібін С. Д., Попов А. О., Бичков А. М. Аналіз сучасного стану розвитку багатофункціональних засобів та комплексів радіоелектронної боротьби. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. Київ: НУОУ, 2017. №1 (28). С. 135–143.
5. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба. М.: Воениздат, 1989.
6. Перунов Ю. М., Фомичев К. И., Юдин Л. М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием. М.: Радиотехника, 2003. 416 с.
7. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Ed. by P. J. Teunissen and O. Montenbruck. (2017). Springer, Leipzig. 1327 p.
8. Mantey, P. E. and Griffiths, L. J. (1969). Iterative least-squares algorithm for signal extraction. Second Hawaii International Conf. on System Science, pp.767–770.

9. Baird, C. A. Recursive processing for adaptive arrays. Proc. of the Adaptive Antenna Systems Workshop, 1974, Vol. 1, NRL Report 7803, Naval Research Laboratory, Washington, DC, pp. 163–182.
10. Monzingo, R. A. and Miller, T. W. (1980). Introduction to Adaptive Arrays. John Wiley and Sons.
11. Amin, M. G., Lindsey, A. R., Zhao, L. and Zhang, Y. (2001). Anti-jamming techniques for GPS receivers. Final technical report #AFRL-IF-RS-TR-2001-186. Air Force Research Laboratory, New York.
12. Gao, G. X., Sgammmini, M., Lu, M. and Kubo, N. Protecting GNSS receivers from jamming and interference. Proc. of the IEEE, 104 (6), 2016, pp. 1–12.
13. Lu, Y. E., Yang, J., Ding, Z. M. and Zhan, Z. T. (2001). The orthogonal weighted algorithm for GPS receiver anti-jamming. Proc. of 2001 CIE International Conf. on Radar, Beijing, pp. 1190–1194.

REFERENCES

1. Chepkov, I. B. and Nor, P. I. “Zagalni tendencii rozvidku ozbroenny ta vyckovoy texnyiki” [General trends of armament and military equipment development], *Armament and Military Equipment*, 2014. № 1 (1). Pp. 4–13 [in Ukrainian].
2. Popov, A. A. and Tverdohlibov, V. V. “Zagalni tendencii rozvidku zasobiv radioelektronnoy borotbi” [General trends of development of electronic warfare means and systems], *Armament and Military Equipment*. 2014. № 4 (4). Pp. 4–10 [in Ukrainian].
3. Zibin, S. D., Popov, A. A. and Tverdohlibov, V. V. “Analiz suchasnogo stanu rozvitku sistem radioelektronnoy protidid bezpilotnim litalnim aparatam” [Analysis of state-of-the-art of UAV countermeasures systems], Proc. of Central Research Inst. of Armament and Military Equipment, 2016. № 4 (63), pp. 118–131 [in Ukrainian].
4. Sergienko, V. D., Zibin, S. D., Popov, A. A. and Bychkov, A. M. “Analiz suchasnjgj stanu rozvitku bogatofunkcionalnix zasobiv ta kompleksiv radioelektronnoy borotbi” [Analysis of state-of-the-art of multifunctional electronic warfare means and complexes], *Modern Information Technologies in Spheres of Security and Defence*, 2017. №1 (28). Pp. 135–143 [in Ukrainian].
5. Paliy, A. I. (1989), “Radioelektronnay borba” [Electronic Warfare], Voenizdat, M. [in Russian].
6. Perunov, Yu. M., Fomichev, K. I. and Yudin, L. M. (2003). “Radioelektronnoe podavlenie informacionnix kanalov system upravleniy orujem” [Electronic Countermeasures of Weapon Control System Informational Channels], *Radiotekhnika*, M. 416 p. [in Russian].
7. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Ed. by P. J. Teunissen and O. Montenbruck. (2017). Springer, Leipzig. 1327 p.
8. Mantey, P. E. and Griffiths, L. J. Iterative least-squares algorithm for signal extraction. Second Hawaii International Conf. on System Science, 1969, pp.767–770.
9. Baird, C. A. Recursive processing for adaptive arrays. Proc. of the Adaptive Antenna Systems Workshop,

- 1974, Vol. 1, NRL Report 7803, Naval Research Laboratory, Washington, DC, pp. 163–182.
10. Monzingo, R. A. and Miller, T. W. (1980). Introduction to Adaptive Arrays. John Wiley and Sons.
 11. Amin, M. G., Lindsey, A. R., Zhao, L. and Zhang, Y. (2001). Anti-jamming techniques for GPS receivers. Final technical report #AFRL-IF-RS-TR-2001-186. Air Force Research Laboratory, New York.
 12. Gao, G. X., Sgammini, M., Lu, M. and Kubo, N. Protecting GNSS receivers from jamming and interference. Proc. of the IEEE, 104 (6), 2016, pp. 1–12.
 13. Lu, Y. E., Yang, J., Ding, Z. M. and Zhan, Z. T. (2001). The orthogonal weighted algorithm for GPS receiver anti-jamming. Proc. of 2001 CIE International Conf. on Radar, Beijing, pp. 1190–1194.

Відомості про авторів:**Зібін Сергій Данилович**

науковий співробітник
науково-дослідної лабораторії розвитку засобів
радіоелектронної боротьби науково-дослідного управління
озброєння та військової техніки спеціальних військ
Центрального науково-дослідного інституту озброєння та
військової техніки Збройних Сил України,
м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-9426-2380>

Попов Андрій Олексійович

кандидат технічних наук, доцент
провідний науковий співробітник науково-дослідної
лабораторії розвитку засобів радіоелектронної боротьби
науково-дослідного управління озброєння та військової
техніки спеціальних військ Центрального науково-
дослідного інституту озброєння та військової техніки
Збройних Сил України, м. Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

Твердохлібов Володимир Віталійович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
начальник науково-дослідного управління озброєння та
військової техніки спеціальних військ Центрального науково-
дослідного інституту озброєння та військової техніки
Збройних Сил України,
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>

Information about the authors:**Sergiy Zibin**

Research Associate
of electronic warfare research laboratory of scientific research
development of military equipment of special corps of Central
Scientific Research Institute of Weapons and Military Equipment
of the Armed Forces of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9426-2380>

Andriy Popov

Candidate of Technical Science, Associate Professor,
leading researcher of electronic warfare research laboratory of
scientific research development of military equipment of special
corps of Central Scientific Research Institute of Weapons and
Military Equipment of the Armed Forces of Ukraine,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-8560-617X>

Volodimir Tverdochlibov

candidate of technical sciences, Senior Research
Chief of Scientific Research Management of development of
military equipment of special corps of Central Scientific Research
Institute of Weapons and Military Equipment of the Armed
Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6802-9796>

Стаття надійшла до редколегії 26.07.2019 р.

Рецензент В. І. Рудаков, д-р техн. наук, професор
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)
<https://orcid.org/0000-0002-7798-8155>

Рецензент М. І. Луханін, д-р техн. наук, професор
(Центральний науково-дослідний інститут озброєння
та військової техніки Збройних Сил України, м. Київ)
<https://orcid.org/0000-0002-1919-8526>