

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПРОСТОРОВОЇ СЕЛЕКЦІЇ СИГНАЛІВ НА БАЗІ АЛГОРИТМІВ ПЕЛЕНГАЦІЇ ДЖЕРЕЛ РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ

DOI 10.36994 / 2788-5518-2022-01-03-11

Куликівська Н. І. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. natalka.denysenko@gmail.com

Авдєєнко Г. Л., к.т.н. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. django2006@ukr.net

Якорнов Є. А., к.т.н., проф. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна. yakornovits@gmail.com

Анотація: У наш час постійно ускладнюється електромагнітна обстановка, що насамперед пов'язано з технічним прогресом технологій радіозв'язку та збільшенням кількості діючих радіоелектронних засобів різного призначення. Цей прогрес також стимулює розвиток засобів радіомоніторингу на основі пеленгаційних методів та систем просторової селекції сигналів. До переліку завдань, які вирішуються за допомогою засобів радіомоніторингу, входить панорамний спектральний аналіз, аналіз радіовипромінювання для виявлення джерел корисних сигналів і завад, визначення місця розташування джерела радіовипромінювання та радіочастотний моніторинг каналів. Просторова селекція за допомогою антенної решітки є одним зі способів боротьби із завадами, що реалізується за рахунок відмінностей у просторових структурах електромагнітних хвиль сигналу та завад. Результати математичного моделювання показують, що класичний метод просторової селекції для антенних решіток, у якому оптимальний вектор вагових коефіцієнтів формується за допомогою рівняння Вінера-Хопфа, в умовах прийому сильного корисного сигналу не призводить до придушення завад. Це пов'язано з тим, що в структурі кореляційної матриці вхідних сигналів є складова корисного сигналу. Тому пропонується позбутися складової корисного сигналу в кореляційній матриці вхідних сигналів шляхом відтворення (реконструкції) кореляційної матриці завад та шумів в процесорі приймального пристрою на основі інформації про кутові координати джерел радіовипромінювання, отриману шляхом пеленгування цих джерел за допомогою одного з відомих алгоритмів пеленгування (Кейпона, MUSIC, ESPRIT тощо). На основі отриманої з пеленгаційного рельєфу інформації про пеленги сигналів та відношення сигнал/шум, в процесорі математично реконструюється кореляційна матриця завад та шумів, розраховується за допомогою рівняння Вінера-Хопфа, вектор вагових коефіцієнтів антенної решітки, після чого суміш усіх сигналів на виході кожного елемента антенної решітки помножується на ваговий коефіцієнт. У результаті складання зважених сигналів, у діаграмі спрямованості антенної решітки приймального пристрою формуються глибокі провали в кутових напрямках розташування джерел випромінювання завад. Також представлено структурну схему та опис роботи прототипу пеленгатора та системи просторової селекції сигналів на основі пристроїв SDR. Ця стаття може бути корисною для розробників обладнання для радіотехнічних систем, у тому числі систем пеленгації, радіолокації, придушення радіозавад тощо.

Ключові слова: антенна решітка, метод пеленгації, діаграма спрямованості, просторова селекція сигналів.

DEVELOPMENT OF THE SIGNALS SPACE SELECTION METHOD BASED ON DIRECTION FINDING ALGORITHMS

Nataliia Kulykivska. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. natalka.denysenko@gmail.com

Gleb Avdeyenko, Ph.D. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. django2006@ukr.net

Yevhenii Yakornov, Ph.D., Prof. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. yakornovits@gmail.com

Abstract: Nowadays there is a steadily increasing complication of the electronic environment. This is primarily due to the technical progress of radio communications. This progress stimulates the development of radio monitoring tools based on direction-finding methods. The list of tasks that solved with the help of radio monitoring means includes panoramic spectral analysis, analysis of radio radiation to identify sources of signals and interference, determining the location of radio sources and monitoring of radio channels. The method of spatial selection for antenna arrays in which the vector of weights is formed using the Wiener-Hopf equation does not work for a strong useful signal. As a result, interference signals are not suppressed. This is due to the fact that there is a component of the useful signal in the structure of the correlation matrix of input signals.

The Wiener-Hopf equation works only when only the components of interference and noise are present in the correlation matrix $\hat{\mathbf{R}}^{-1}$. Therefore, it is proposed to improve this method of spatial selection by reconstructing correlation matrix of interference and noise in the processor of the receiving device, based on information about the angular coordinates obtained by direction finding of these radiation sources based on one of the directional algorithms. Based on the obtained information about signal bearings and signal-to-noise ratio from direction-finding algorithm, the correlation matrix is reconstructed, the weighting

vector is calculated using the Wiener-Hopf equation, after which the mixture of all signals in each antenna array channel is multiplied by weight vector. As a result, the radiation pattern of antenna array will have deep holes at the angular coordinates of the radiation sources location. The block diagram and description of the direction-finder prototype operation and the system of spatial signal selection based on SDR devices are also presented. This article can be useful for developers of equipment for radio systems, including direction-finding systems, radar, radio interference suppression, etc.

Key words: antenna array, direction finding method, radiation pattern, spatial selection of signals.

Вступ

На сьогоднішній день адаптивна просторова селекція сигналів за допомогою антенних решіток (АР) є невід'ємною складовою систем радіолокації, радіоелектронної боротьби та радіотехнічної розвідки. Також в останні роки спостерігається значний інтерес стосовно практичного використання адаптивного керування променями АР в системах зв'язку 5G для отримання високих швидкостей передавання даних в умовах обмеженості радіочастотного ресурсу та значної кількості абонентів [1].

Антенна решітка характеризується діаграмою спрямованості, тобто, амплітудно-кутовою характеристикою $|F(\theta)|$, яка, подібно до амплітудно-частотної характеристики звичайного цифрового фільтра, за допомогою вагових коефіцієнтів, може змінювати свою форму, забезпечуючи необхідні значення у напрямках на джерела прийнятих сигналів, наприклад, одиничне значення у напрямку на джерело корисного сигналу і нульове або «дуже мале» значення у напрямках на джерела завад.

Для дослідження були використані наступні вихідні дані:

- три джерела радіовипромінювання;
- та їх пеленги відповідно $\theta_1 = -20^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 20^\circ$.

Для подальшого дослідження характеристик спрямованості антенної решітки потрібно зробити деякі припущення та обмеження:

1. Використовується лінійна еквідистантна антенна решітка з рівною відстанню між елементами $\frac{\lambda}{2}$.
2. Для простоти аналізу використовуються ізотропні елементи.
3. Не будемо враховувати вплив багатопроменевого поширення радіохвиль.
4. Не будемо також враховувати вплив завмирань, як наслідок багатопроменевого поширення радіохвиль.
5. Передбачаємо сталість поляризаційної структури сигналів, що приймаються, тобто сигнали є детермінованими.
6. Усі сигнали приймаються в одній поляризації.
7. Внутрішньоприйомні шуми підпорядковуються закону Гаусса.

Виконання досліджень

Для початку побудуємо діаграму спрямованості лінійної еквідистантної антенної решітки до просторової селекції корисного сигналу на фоні завад, тобто перед адаптацією до джерел завад.

Оскільки антенна решітка до адаптації має вектор вагових коефіцієнтів:

$$\mathbf{w}_0 = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T,$$

тобто у кожному каналі двадцятиелементної антенної решітки коефіцієнт передачі дорівнює 1, а фаза 0. Таке значення вектору вагових коефіцієнтів відповідає ситуації, коли зважування в кожному окремо взятому каналі антенної решітки не відбувається.

Для формування діаграми спрямованості було використано вираз:

$$F(\theta) = 20 \log \frac{|\mathbf{w}_0^H \cdot \mathbf{a}(\theta)|}{M}, \quad (1)$$

де $\mathbf{a}(\theta)$ – керуючий вектор-стовпець антенної решітки при прийманні гармонійної електромагнітної хвилі з плоским фазовим фронтом від джерела радіовипромінювання, M – кількість антенних елементів.

Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції корисного сигналу на фоні завад для трьох джерел радіовипромінювання (рис. 1), що на знаходяться в далекій зоні на пеленгах $\theta_1 = -20^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 20^\circ$.

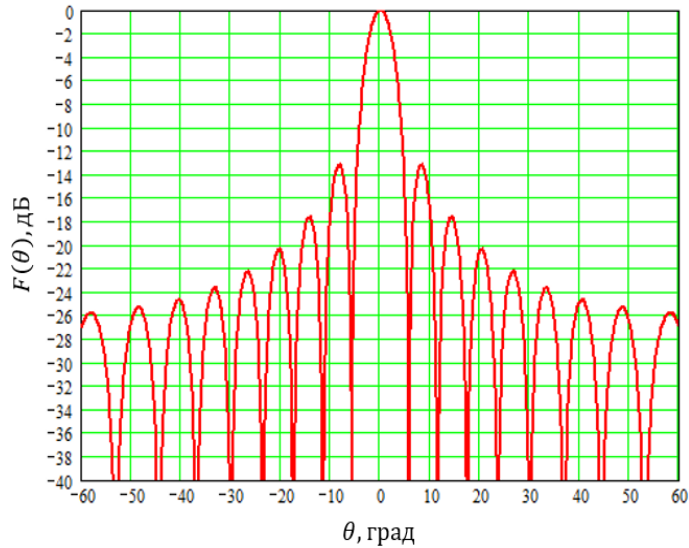


Рис. 1. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції корисного сигналу на фоні завад

Як видно, з графіку (рис. 1), рівень бокових пелюсток на пеленгах $\theta_1 = -20^\circ$ та $\theta_3 = 20^\circ$ відносно рівня основної пелюстки дорівнює -20.4 дБ, що свідчить про малий рівень затухання завадових сигналів.

Для порівняння спробуємо побудувати діаграму спрямованості лінійної еквідистантної антенної решітки після просторової селекції корисного сигналу на фоні завад, тобто після адаптації до джерел завад, при використанні обчислення вектору вагових коефіцієнтів за рівнянням Вінера-Хопфа.

Спочатку сформуємо вектор-стовпець, що описує просторову структуру очікуваного сигналу, який знаходиться на нульовому пеленгу:

$$\mathbf{S}_\alpha = \mathbf{a}(\theta_2), \quad (2)$$

тобто $\mathbf{S}_\alpha$ дорівнює значенню керуючого вектора антенної решітки для пеленга θ_2 , що відповідає положенню другого джерела радіовипромінювання, яке знаходиться на $\theta_2 = 0^\circ$.

Тоді оптимальний вектор вагових коефіцієнтів записати у вигляді базового рівняння Вінера-Хопфа як:

$$\mathbf{w}_{opt} = \hat{\mathbf{R}}^{-1} \cdot \mathbf{S}_\alpha, \quad (3)$$

де $\hat{\mathbf{R}}^{-1}$ – оцінка коваріаційної матриці вхідних сигналів АР.

Тепер сформуємо діаграму спрямованості з використанням виразу:

$$F(\theta) = 20 \log \frac{|\mathbf{w}_{opt}^H \cdot \mathbf{a}(\theta)|}{M}. \quad (4)$$

Діаграма спрямованості ЛЕАР після просторової селекції корисного сигналу на фоні завад для трьох джерел радіовипромінювання (рис.42, що на знаходяться в далекій зоні на пеленгах $\theta_1 = -20^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 20^\circ$.

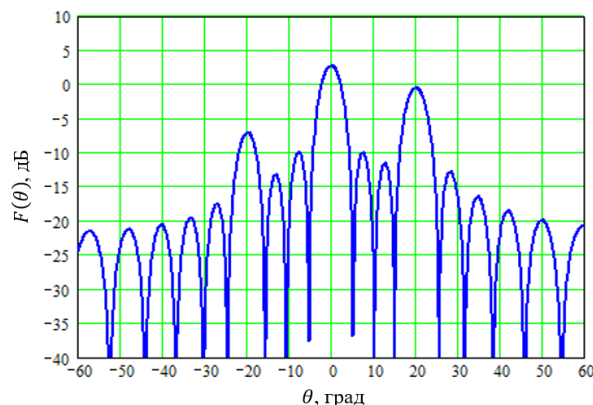


Рис. 2. Діаграма спрямованості ЛЕАР після просторової селекції корисного сигналу на фоні завад

Як видно, з графіку (рис. 2), адаптація до джерел завад не відбулася, тобто придушення джерел завад при використанні оптимального вектора просторової обробки, розрахованого за рівнянням Вінера-Хопфа, не відбулося. Інакше кажучи, на пеленгах $\theta_1 = -20^\circ$, $\theta_3 = 20^\circ$ повинні були з'явитися провали, але ми навпаки бачимо підсилення.

Формулювання пропозицій щодо модифікації методу просторової селекції сигналів

Як було показано вище, метод просторової селекції, при якому вектор вагових коефіцієнтів формується з використанням рівняння Вінера-Хопфа, не працює. Це пов'язано з тим, що в структурі кореляційної матриці присутня складова корисного сигналу. Рівняння Вінера-Хопфа працює лише тоді, коли в кореляційній матриці $\hat{R}^{-1}$ наявні тільки складові завад та шумів.

Оскільки сигнал, що знаходиться на пеленгу $\theta_2 = 0^\circ$, був прийнятий за корисний сигнал, то в кореляційній матриці $\hat{R}^{-1}$ повинні міститися тільки складові завад, джерела випромінювання яких знаходяться на пеленгах $\theta_1 = -20^\circ$, $\theta_3 = 20^\circ$, а складова корисного сигналу має бути виключена з кореляційної матриці. На практиці, відокремити в окремо взятому каналі складові корисного сигналу від складових завад неможливо. Тому, пропонується вдосконалити даний метод просторової селекції шляхом реконструювання в процесорі приймального пристрою кореляційної матриці завад та шумів, виходячи з інформації про кутові координати, яка отримується шляхом пеленгації цих джерел випромінювання на базі одного з пеленгаційних алгоритмів, а саме [3]:

1. Метод Бартлетта є найпростішим з погляду його реалізації на практиці для пеленгації декількох джерел радіовипромінювання з використанням антенної решітки, проте він має суттєвий недолік – його просторове кутове розділення обмежене релеївською межею.
2. Метод Кейпона істотно перевищує характеристики методу Бартлетта та дозволяє розділити два джерела радіовипромінювання, кутове рознесення яких менше релеївської межі. Але при пеленгації трьох джерел радіовипромінювання визначити точні пеленги вже не є можливим.
3. Методи теплового шуму та Борджотті-Лагунаса мають набагато кращі характеристики у порівнянні з методом Кейпона. Тобто навіть при мінімальному значенні кутового рознесення між двома джерелами радіовипромінювання ці методи дозволяють визначити пеленги, але вже при пеленгації трьох джерел ці методи не дозволяють подолати релеївську межу.
4. Алгоритми MUSIC та власного вектору мають найкращу роздільну здатність у порівнянні з попередніми методами. Дані алгоритми дозволяють визначити пеленги двох та трьох джерел радіовипромінювання одночасно, при кутовому рознесенні між джерелами радіовипромінювання меншому, ніж ширина променю антенної решітки.
5. При формуванні діаграми спрямованості методом просторової селекції, при якому вектор вагових коефіцієнтів формується з використанням рівняння Вінера-Хопфа, не вдалося отримати бажаного результату. Тобто сформувати нулі у кутових напрямках на джерела завад. Тому було запропоновано вдосконалити даний метод шляхом реконструювання кореляційної матриці зовнішніх завад та внутрішніх шумів, математична модель якої буде розглянуто у наступному пункті.

Кореляційна матриця завад і шумів R_{NN} може бути представлена у вигляді [2]:

$$R_{NN} = E\{\mathbf{n}(t)\mathbf{n}^H(t)\}, \quad (5)$$

де $\mathbf{n}(t)$ - вектор-стовпець адитивної суміші векторів-стовпців N -ої кількості зовнішніх завад та вектора-стовпця власних шумів каналів ЛАР, тобто:

$$\mathbf{n}(t) = \sum_{n=1}^N \mathbf{n}_n(t) + \mathbf{n}_0(t), \quad (6)$$

Зазвичай зовнішні завади некорельовані з власними шумами в каналах АР, тобто виконується умова:

$$\overline{\mathbf{n}_n(t)\mathbf{n}_0^H(t)} = \overline{\mathbf{n}_0(t)\mathbf{n}_n^H(t)} = \mathbf{0}, \quad n = 1 \dots N \quad (7)$$

де $\mathbf{0}$ – матриця розміру $M \times M$, що складається з нульових елементів.

Тоді матрицю R_{NN} можна подати у вигляді:

$$R_{NN} = R_{\Pi} + R_0, \quad (8)$$

де R_{Π} – кореляційна матриця зовнішніх завад ЛАР; R_0 – кореляційна матриця власних шумів.

Кореляційна матриця зовнішніх вузькосмугових завад за умови їх взаємної просторової та часової некорельованості, що має місце у випадку, коли ці завади формуються незалежними один від одного ДРВ, матиме вигляд [3]:

$$R_{\Pi} = E\{(\sum_{n=1}^N \mathbf{n}_n(t)) (\sum_{n=1}^N \mathbf{n}_n(t))^H\} = \sum_{n=1}^N R_{\Pi_n}(t), \quad (9)$$

де $R_{\Pi_n} = E\{\mathbf{n}_n(t)\mathbf{n}_n^H(t)\} = E\{N_{v_n}\dot{N}_n(t)N_{v_n}^H\dot{N}_n^*(t)\} = N_{v_n}N_{v_n}^H\overline{N_n^2(t)} = \sigma_{\Pi_n}^2 N_{v_n}N_{v_n}^H$ – кореляційна матриця n -го джерела вузькосмугових завад за умови випадковості часової структури завади й невинуватковості її просторової структури, $n = 1 \dots N$; $\overline{N_n^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T N_n^2(t)dt = \sigma_{\Pi_n}^2$ – середня потужність k -го джерела завад в каналі ЛАР.

Аналогічно, кореляційна матриця R_0 власних шумів за умови взаємної некорельованості квазібілих гауссівських шумів окремих каналів вузькосмугової ЛАР:

$$R_0 = \{\mathbf{n}_0(t)\mathbf{n}_0^H(t)\} = I\sigma_0^2, \quad (10)$$

де I – одинична матриця розмірності $M \times M$; $\sigma_0^2 = \frac{1}{T} \int_0^T N_{0_m}^2(t)dt$ – потужність власних шумів в окремому каналі ЛАР; $m = 1 \dots M$.

Увівши позначення:

$$h_n = \frac{\sigma_{\Pi_n}^2}{\sigma_0^2}, \quad (11)$$

де h_n – відношення потужності завади від k -го джерела завад до потужності власних шумів у каналі АР, одержимо, що [2]:

$$R_{NN} = (\sum_{n=1}^N h_n N_{v_n} N_{v_n}^H + I) \cdot \sigma_0^2. \quad (12)$$

У випадку включення складових корисного сигналу, кореляційну матрицю вхідних сигналів АР можна подати у вигляді:

$$R_{xx} = R_{SS} + R_{NN} = P_s S_{\alpha} S_{\alpha}^T + R_{NN}, \quad (13)$$

де P_s – середня потужність корисного сигналу в каналі АР.

Відповідно до рівнянь (12) та (5) на рис.3. представлено структурну схему удосконаленого методу просторової селекції з використанням реконструйованої кореляційної матриці завад і шумів:

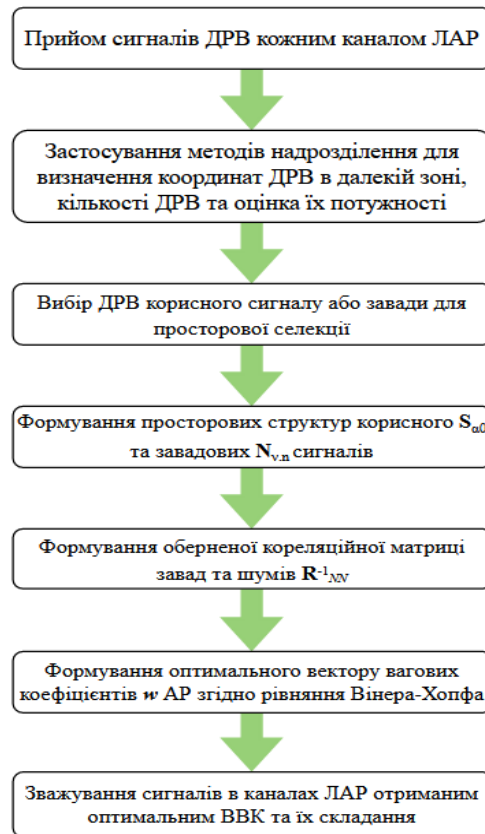


Рис. 3. Структурна схема удосконаленого методу просторової селекції з використанням реконструйованої матриці вхідних сигналів

Отже, відповідно до рис.3, на базі отриманої інформації про пеленги сигналів та відношення сигнал/шум, реконструюється кореляційна матриця, обчислюється вектор вагових коефіцієнтів з використанням рівняння Вінера-Хопфа, після чого суміш всіх сигналів в кожному каналі антенної решітки поелементно перемножується з ВВК, і в результаті чого формується ДС, в якій на кутових координатах завад формуються провали. Блок-схема, що реалізує вищевказаний удосконалений метод просторової селекції зображено далі на рис.4.

Розрахунок та аналіз діаграми спрямованості антенної решітки після просторової селекції сигналів

Побудуємо діаграму спрямованості лінійної еквідистантної антенної решітки після просторової селекції корисного сигналу на фоні завад, тобто після адаптації до джерел завад, при використанні обчислення вектору вагових коефіцієнтів за рівнянням Вінера-Хопфа, але вже при використанні реконструйованої матриці завад та шумів.

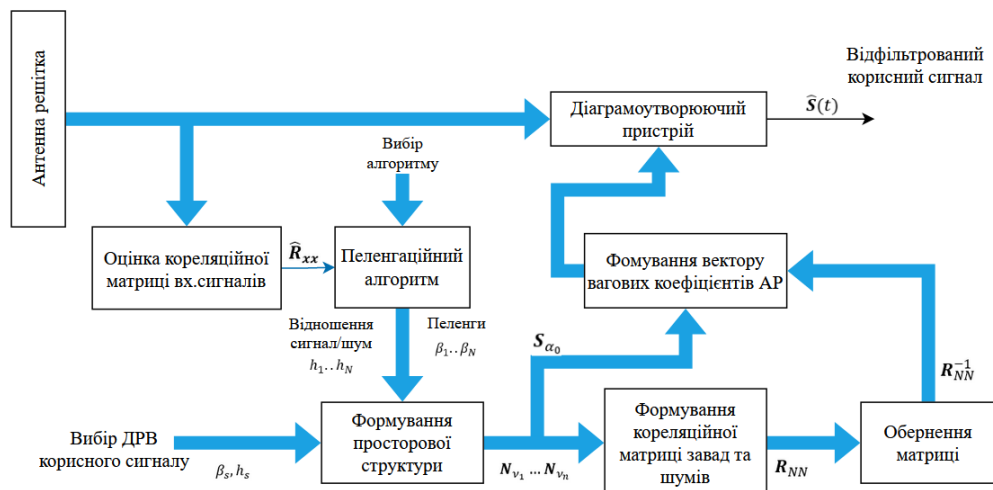


Рис.4. Блок-схема удосконаленого методу просторової селекції

Знаючи достовірні пеленги після обчислення пеленгаційного рельєфу, можна записати просторові структури завадових сигналів, що знаходяться на пеленгах $\theta_1 = -20^\circ$ та $\theta_3 = 20^\circ$ як:

$$N_{v_1} = a(\theta_1), \quad N_{v_3} = a(\theta_3) \quad (16)$$

Тепер потрібно визначити відношення сигнал/шум для двох джерел радіовипромінювання, для цього використаємо просторовий спектр, отриманий за методом MUSIC, також зауважимо, що при математичному моделюванні було визначено, що максимально можливе значення сигнал/шум не повинно перевищувати значення 150 дБ, тоді:

$$\begin{aligned} h_1 &= 82 \text{ дБ}, \\ h_3 &= 83 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

Також обчислимо потужність власних шумів приймального тракту:

$$\sigma^2 = kT\Delta f = 1.06 \times 10^{-15} \text{ Вт}, \quad (17)$$

де $k = 1.38 \times 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – стала Больцмана, $T = 290(K_{\text{ш}} - 1)$ – шумова температура приймального тракту, Δf – смуга пропускання приймального тракту.

Отже, тепер можна обчислити кореляційну матрицю завад та шумів, де відсутня компонента корисного сигналу:

$$R_{xxopt} = (I + h_1 N_{v_1} N_{v_1}^H + h_3 N_{v_3} N_{v_3}^H) \cdot \sigma^2, \quad (18)$$

Тоді оптимальний вектор вагових коефіцієнтів можна записати у вигляді:

$$w_{opt} = R_{xxopt}^{-1} \cdot S_{\alpha}. \quad (19)$$

Тепер сформуємо діаграму спрямованості з використанням виразу:

$$F_{opt}(\theta) = 20 \log \frac{|w_{opt}^H \cdot a(\theta)|}{\sqrt{M \cdot w_{opt}^H \cdot w_{opt}}}. \quad (20)$$

На рис.5 представлено діаграму спрямованості ЛЕАР після просторової селекції корисного сигналу на фоні завад для трьох джерел радіовипромінювання, що знаходяться в далекій зоні на пеленгах $\theta_1 = -20^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 20^\circ$.

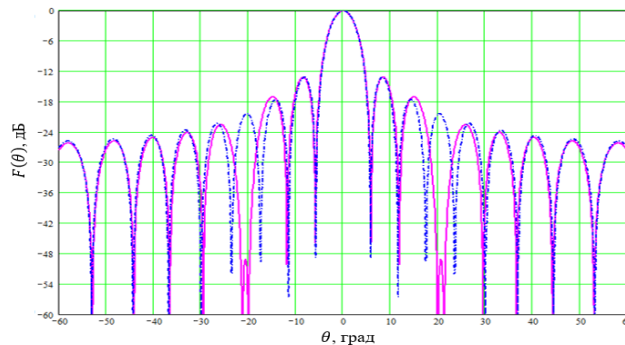


Рис. 5. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції (---) та після просторової селекції (—) корисного сигналу на фоні завад

Оцінимо величину провалів на кутових координатах $\theta_1 = -20^\circ$ та $\theta_3 = 20^\circ$, тобто $F_{opt}(\theta_1) = -84$ дБ та $F_{opt}(\theta_3) = -85$ дБ. Тоді можливо визначити коефіцієнт придушення завад як різницю між рівнями ДСА до та після адаптації:

$$K_{п.з.1} = F(\theta_1) - F_{opt}(\theta_1) = 64.4 \text{ дБ}, \quad (21)$$

$$K_{п.3.3} = F(\theta_3) - F_{opt}(\theta_3) = 64.5 \text{ дБ.}$$

Використовуючи таку ж методику, можливо визначити коефіцієнт ослаблення сигналу, тобто при $F_{opt}(\theta_2) = -0.076 \text{ дБ}$ тоді:

$$K_{o.c.} = F(\theta_2) - F_{opt}(\theta_2) = 0.076 \text{ дБ.} \quad (22)$$

Отже, як показано (рис. 5), застосування оптимальної обробки за алгоритмом Вінера-Хопфа, при використанні реконструйованої кореляційної матриці завад та шумів, при виключенні з неї складової корисного сигналу, що знаходиться на пеленгу $\theta_2 = 0^\circ$, дозволяє однозначно сформувати провали в діаграмі спрямованості на кутових координатах $\theta_1 = -20^\circ$ та $\theta_3 = 20^\circ$, у порівнянні (рис. 2.) з використанням матриці вхідних сигналів, де присутня структура корисного сигналу.

Також розглянемо, яким чином буде змінюватися ДСА після просторової селекції корисного сигналу на фоні завад при зменшенні кутової відстані між кутовими положеннями джерел радіовипромінювання. Змодельємо ситуації з використанням вхідних даних, занесених у таблицю 1. Також зауважимо, що кожна ситуація має два випадки: 1 – коли корисний сигнал знаходиться на нульовому пеленгу, 2 – коли корисний сигнал знаходиться на будь-якому іншому пеленгу.

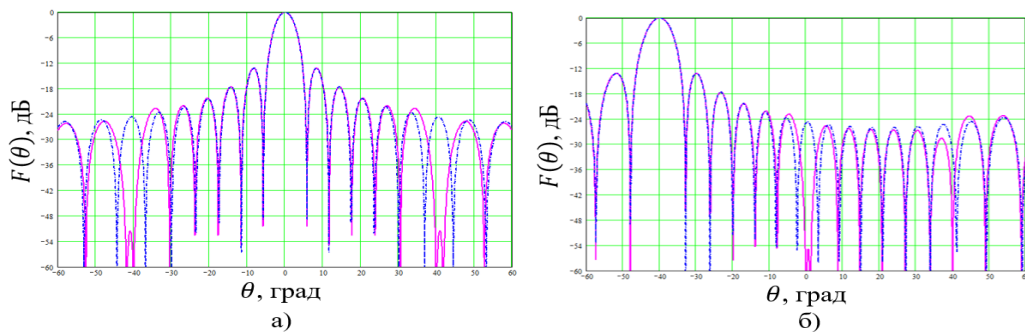


Рис. 6. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції (---) та після просторової селекції (—) корисного сигналу на фоні завад для пеленгів $\theta_1 = -40^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 40^\circ$: а) $\theta_2 = 0^\circ$ – джерело корисного сигналу; б) $\theta_1 = -40^\circ$ – джерело корисного сигналу

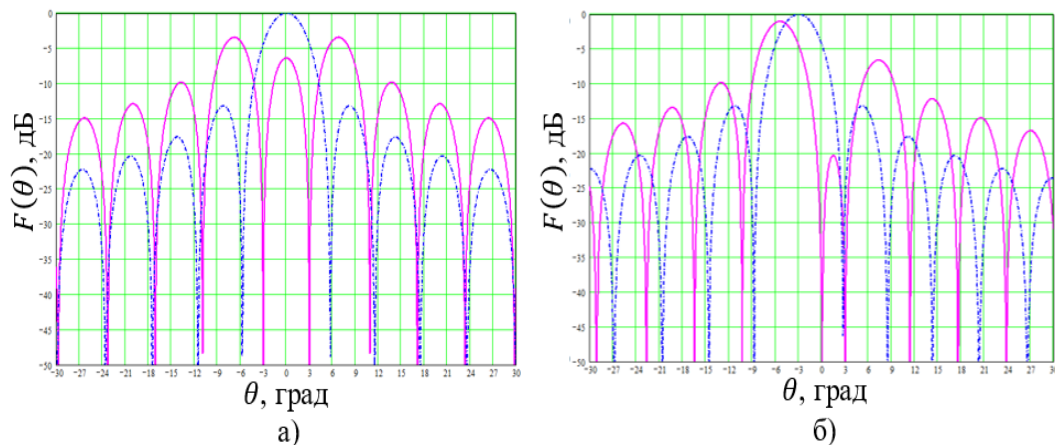


Рис. 7. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції (---) та після просторової селекції (—) корисного сигналу на фоні завад для пеленгів $\theta_1 = -3^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 3^\circ$: а) $\theta_2 = 0^\circ$ – джерело корисного сигналу; б) $\theta_1 = -3^\circ$ – джерело корисного сигналу

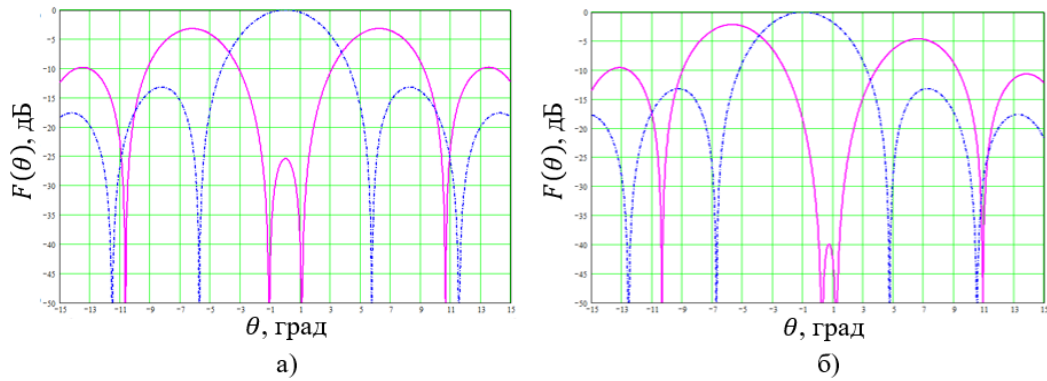


Рис. 8. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції (---) та після просторової селекції (—) корисного сигналу на фоні завад для пеленгів $\theta_1 = -1^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 1^\circ$: а) $\theta_2 = 0^\circ$ – джерело корисного сигналу; б) $\theta_1 = -1^\circ$ – джерело корисного сигналу

Можна зробити висновок, що після просторової селекції, при зменшенні кутової відстані між джерелом корисного сигналу та джерелами завад, рівень корисного сигналу слабшає. А також, при кутовій відстані між ДРВ меншій ніж ширина променю АР за критерієм Релея $\Delta_R = 6,03^\circ$, діаграмоутворюючий пристрій здатен чітко формувати провали у напрямках на джерела завад.

У табл.1 занесено результати оцінки провалів на кутових координатах джерел радіовипромінювання, а також результати визначення коефіцієнту придушення завад та коефіцієнту ослаблення сигналу для трьох ситуацій. Зауважимо, що кожна ситуація має два випадки: 1 – коли корисний сигнал знаходиться на нульовому пеленгу, 2 – коли корисний сигнал знаходиться на будь-якому іншому пеленгу.

Формування модифікованого вектора-стовпця вагових коефіцієнтів—антенної решітки Іля зменшення рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості

У попередньому підрозділі була виконана просторова селекція сигналу на фоні завад у припущенні рівномірного амплітудного розподілу електромагнітного поля по апертурі АР. Таким чином, ДС антенної решітки має високий рівень бокових пелюсток.

Тому, вирішальною задачею є проведення оптимізації рівнів ДН АР, метою якої є зменшення рівнів бокових пелюсток, тобто зменшення рівня завадового сигналу, який надходить з джерел завад.

Таблиця1.
Результати визначення коефіцієнту придушення завад та ослаблення сигналу.

№	Кутові положення ДРВ, град	Коефіцієнт підсилення антени до адаптації, дБ		Коефіцієнт підсилення антени після адаптації, дБ		Коефіцієнт ослаблення, дБ	
		Вип.1	Вип.2	Вип.1	Вип.2	Вип.1	Вип.2
1	-40°	-24.8	0	-84	-0.016	59.2	0.016
	0°	0	-24.8	-0.028	-89	0.028	64.2
	40°	-24.8	-32.2	-89	-97	64.2	64.8
2	-3°	-4.3	0	-58	-4.3	53.7	4.3
	0°	0	-4.3	-6	-56	6	51.7
	3°	-4.3	-26.9	-58	-59	53.7	32.1
3	-1°	-0.43	0	-41	-18	40.5	18
	0°	0	-0.43	-25	-37	25	36.5
	1°	-0.43	-1.8	-43	-43	42.5	41.2

Для початку потрібно знайти координати антенних елементів АР:

$$x_i = -0.5(M + 1 - 2i) \cdot L, i = 1 \dots 20, \quad (23)$$

де M – кількість елементів антенної решітки, у нашому випадку $M = 20$, L – довжина хвилі.

Тепер запишемо рівняння функції амплітудного розподілу типу «квадратний косинус на п'єдесталі» в ЛЕАР, основним критерієм при виборі якого було забезпечення мінімізації рівня бічного випромінювання [4]:

$$f(i) = \Delta + (1 - \Delta) \cdot \left(\cos\left(\frac{\pi \cdot \xi_i}{2}\right) \right)^2, i = 1 \dots 20, \quad (24)$$

де $\Delta = 0.08$ – коефіцієнт, що показує у скільки рівень сигналу в крайньому антенному елементі буде відрізнятися від рівня сигналу в центральному антенному елементі, $\xi_i = 2 \frac{x_i}{L_p}$ – відносна координата антенного елементу x_i .

Для оптимізації просторової обробки, з урахуванням отриманих амплітудних законів розподілу $f(i)$, потрібно сформувати діагональну матрицю $\mathbf{A}$ розміром $M \times M$, у якій по діагоналі розташовані елементи $f(1) \dots f(20)$. Фізичний зміст матриці $\mathbf{A}$ – це внесення в кожен канал АР загасання, при якому формується амплітудний розподіл типу (24).

Діагональна матриця $\mathbf{A}$, що сформована у програмному пакеті MathCad, показана на рис.9..

Тепер сформуємо діаграму спрямованості АР до просторової селекції з урахуванням матриці амплітудного розподілу:

$$F(\theta) = 20 \log \frac{|w_0^H \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{a}(\theta)|}{M}. \quad (25)$$

Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції корисного сигналу на фоні завад з використанням амплітудного розподілу для трьох джерел радіовипромінювання(рис. 10), що знаходяться в далекій зоні на пеленгах $\theta_1 = -20^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 20^\circ$.

$\mathbf{A} =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0	0.08	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0.105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0.177	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0.288	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0.427	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0.578	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0.725	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0.852	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0.945	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.994	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.994	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.945	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.852	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.725	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.578	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.427	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.288	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.177	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.105	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08

Рис. 9. Діагональна матриця з коефіцієнтами амплітудного розподілу

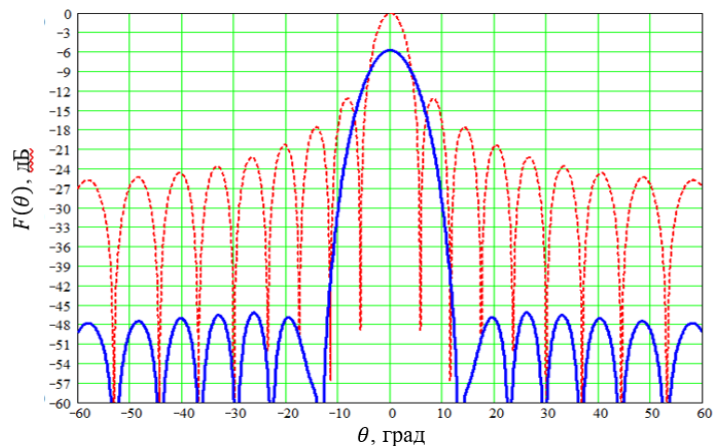


Рис. 10. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції корисного сигналу на фоні завад при використанні рівномірного (---) та спадаючого (—) амплітудного розподілу

Як видно, з графіку (рис. 10), рівень бокових пелюсток на пеленгах $\theta_1 = -20^\circ$ та $\theta_3 = -20^\circ$ відносно рівня основної пелюстки дорівнює -41 дБ, тобто рівень бокових пелюсток вдалося придушити в 100 разів (на 20 дБ), у порівнянні з рівнем бокових пелюсток -20.47 дБ без використання амплітудного розподілу.

Введення матриці A призводить до необхідності оптимізації запису кореляційної матриці завад та шумів, що було запропоновано у попередньому підрозділі. Запишемо просторові структури завадових сигналів, що знаходяться на пеленгах $\theta_1 = -20^\circ$ та $\theta_3 = 20^\circ$ як:

$$\begin{aligned} N_{v_{1opt}} &= A \cdot N_{v_1}, \\ N_{v_{3opt}} &= A \cdot N_{v_3}. \end{aligned} \quad (26)$$

Тепер модифікуємо кореляційну матрицю завад та шумів з використанням амплітудного розподілу:

$$R_{xxopt2} = \left(I + h_1 N_{v_{1opt}} \cdot N_{v_{1opt}}^H + h_3 N_{v_{3opt}} \cdot N_{v_{3opt}}^H \right) \cdot \sigma^2. \quad (27)$$

Тоді оптимальний вектор вагових коефіцієнтів можна записати у вигляді:

$$w_{opt2} = R_{xxopt2}^{-1} \cdot S_\alpha. \quad (28)$$

Тепер сформуємо діаграму спрямованості з використанням виразу:

$$F_{opt2}(\theta) = 20 \log \frac{|w_{opt2}^H \cdot A \cdot a(\theta)|}{\sqrt{M \cdot w_{opt2}^H \cdot w_{opt2}}}. \quad (29)$$

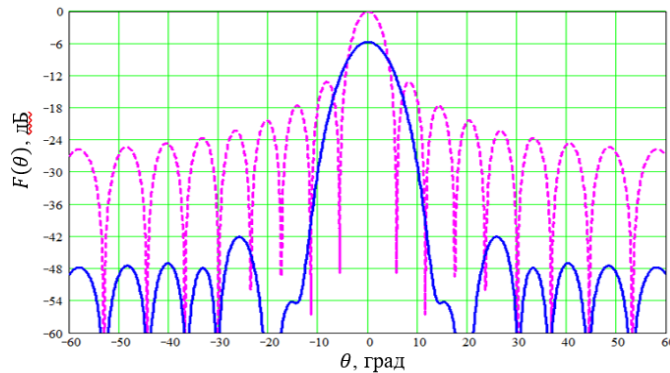


Рис. 11. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції (---) з рівномірним розподілом та після просторової селекції (—) з використанням спадаючого амплітудного розподілу

Оцінимо величину провалів на кутових координатах $\theta_1 = -20^\circ$ та $\theta_3 = 20^\circ$, тобто $F_{opt2}(\theta_1) = -103$ дБ та $F_{opt2}(\theta_3) = -103$ дБ. Тоді можливо визначити коефіцієнт придушення завад як різницю між рівнями ДСА до та після адаптації:

$$\begin{aligned} K_{п.з.1} &= F(\theta_1) - F_{opt2}(\theta_1) = 82.5 \text{ дБ}, \\ K_{п.з.3} &= F(\theta_3) - F_{opt2}(\theta_3) = 82.4 \text{ дБ}. \end{aligned}$$

Використовуючи таку ж методику, можливо визначити коефіцієнт ослаблення сигналу, тобто при $F_{opt}(\theta_2) = -5.73$ дБ тоді:

$$K_{o.c.} = F(\theta_2) - F_{opt}(\theta_2) = 5.73 \text{ дБ}.$$

Також розглянемо, яким чином буде змінюватися ДСА після просторової селекції корисного сигналу на фоні завад з використанням амплітудного розподілу при зменшенні кутової відстані між кутовими положеннями джерел радіовипромінювання.

Діаграма спрямованості ЛЕАР до та після просторової селекції корисного сигналу на фоні завад з використанням амплітудного розподілу для трьох джерел радіовипромінювання (рис. 12-14), що на знаходяться в далекій зоні на пеленгах $\theta_1 = -40^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 40^\circ$; $\theta_1 = -3^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 3^\circ$; $\theta_1 = -1^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 1^\circ$.

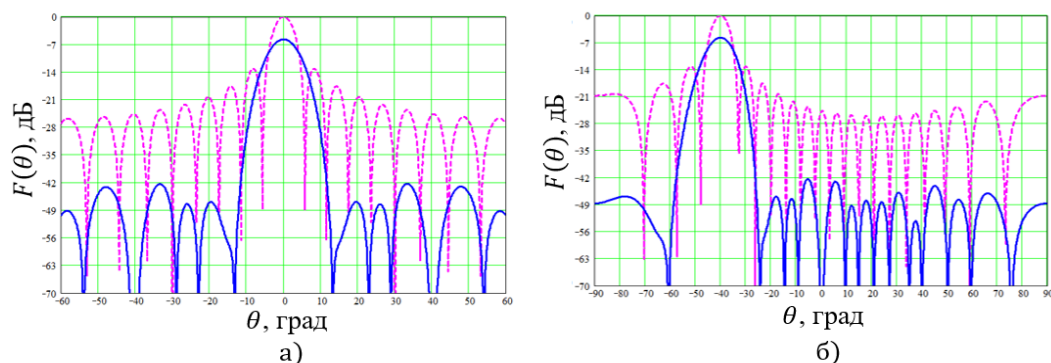


Рис. 12. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції (---) з рівномірним розподілом та після просторової селекції (—) корисного сигналу на фоні з використанням спадаючого амплітудного розподілу для пеленгів $\theta_1 = -40^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 40^\circ$: а) $\theta_2 = 0^\circ$ – джерело корисного сигналу; б) $\theta_1 = -40^\circ$ – джерело корисного сигналу

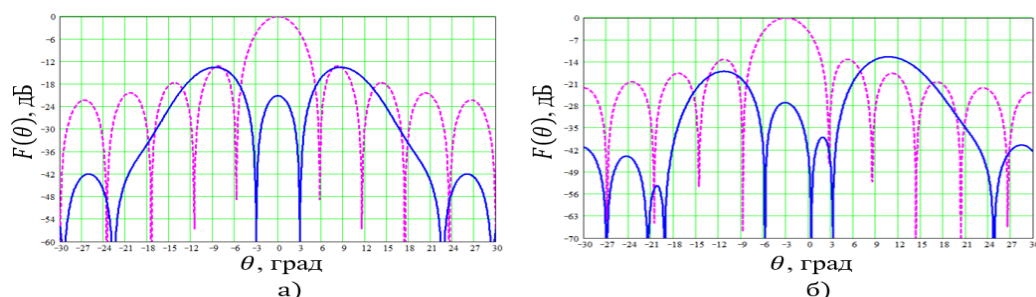


Рис. 12. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції (---) з рівномірним розподілом та після просторової селекції (—) корисного сигналу на фоні з використанням спадаючого амплітудного розподілу для пеленгів $\theta_1 = -40^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 40^\circ$: а) $\theta_2 = 0^\circ$ – джерело корисного сигналу; б) $\theta_1 = -40^\circ$ – джерело корисного сигналу

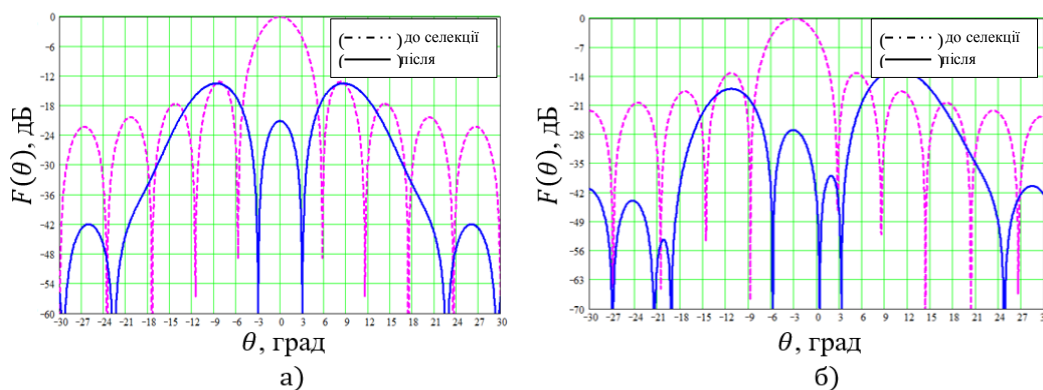


Рис. 13. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції (---) з рівномірним розподілом та після просторової селекції (—) корисного сигналу на фоні з використанням спадаючого амплітудного розподілу для пеленгів $\theta_1 = -3^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 3^\circ$: а) $\theta_2 = 0^\circ$ – джерело корисного сигналу; б) $\theta_1 = -3^\circ$ – джерело корисного сигналу

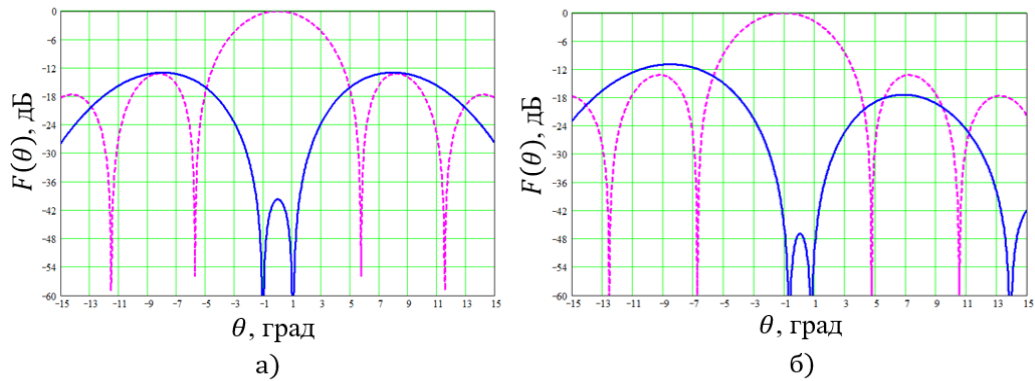


Рис. 14. Діаграма спрямованості ЛЕАР до просторової селекції (---) з рівномірним розподілом та після просторової селекції (—) корисного сигналу на фоні з використанням спадаючого амплітудного розподілу для пеленгів $\theta_1 = -1^\circ$, $\theta_2 = 0^\circ$, $\theta_3 = 1^\circ$: а) $\theta_2 = 0^\circ$ – джерело корисного сигналу; б) $\theta_1 = -1^\circ$ – джерело корисного сигналу

Можна зробити висновок, що після просторової селекції з використанням амплітудного розподілу, при зменшенні кутової відстані між джерелом корисного сигналу та джерелами завад, рівень корисного сигналу слабшає.

У таблицю 3 занесено результати оцінки провалів на кутових координатах джерел радіовипромінювання, а також результати визначення коефіцієнту придушення завад та коефіцієнту ослаблення сигналу для трьох ситуацій. Зауважимо, що кожна ситуація має два випадки: 1 – коли корисний сигнал знаходиться на нульовому пеленгу, 2 – коли корисний сигнал знаходиться на будь-якому іншому пеленгу.

Структурна схема та опис принципу дії макета пеленгатора та системи просторової селекції сигналів

Узагальнена структурна схема системи пеленгування та просторової селекції з використанням SDR приймачів представлена на рис. 15. Система пеленгування та просторової селекції складається з антенної решітки, блоків SDR приймачів та сигнального процесора персонального комп'ютера.

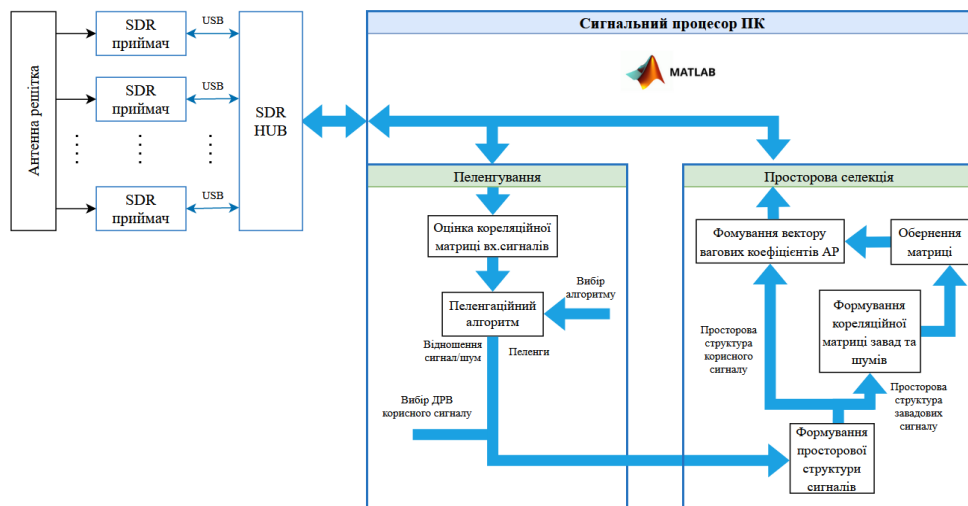


Рис. 15. Структурна схема системи пеленгування та просторової селекції з використанням SDR приймачів

Згідно зі структурною схемою (рис. 15), сигнали отримані від антенної решітки передаються до блоків SDR приймачів, де відбувається перетворення аналогового сигналу на цифровий з частотою дискретизації, яка визначається моделлю SDR приймача, після цього перетворені сигнали передаються на SDR HUB, з використанням інтерфейсу USB 3.0 та об'єднуються, і передаються на ПК. На ПК, з використання програмного забезпечення Matlab, відбувається моделювання процесу пеленгації та просторової селекції.

Перший блок пеленгування включає наступні кроки:

1. Оцінка кореляційної матриці вхідних сигналів.

2. Вибір алгоритму пеленгації та формування пеленгаційного рельєфу, з використанням алгоритму пеленгації.

Другий блок просторової селекції включає наступні кроки:

1. За результатами отриманими в блоці пеленгування, відбувається формування просторової структури сигналу та завад.
2. Формування кореляційної матриці завад та шумів.
3. Обернення матриці.
4. Формування вектору вагових коефіцієнтів для каналів антенної решітки.

Далі відбувається зважування, тобто перемноження сигналу від кожного SDR приймача на розрахункове значення ВВК, після чого відбувається складення сигналів. У результаті чого буде отримано, в ідеальному випадку, цифровий сигнал, очищений від зовнішніх завад.

Висновки

Особливістю запропонованого методу просторової селекції сигналів є реконструкція кореляційної матриці на базі інформації про пеленги джерел радіовипромінювання та відношення сигнал/шум, а також наявність в кореляційній матриці тільки просторових структур завад та шумів.

У результаті математичного та імітаційного моделювання було встановлено, що:

- застосування оптимальної обробки за алгоритмом Вінера-Хопфа, при використанні реконструйованої кореляційної матриці завад та шумів, при виключенні з неї складової корисного сигналу, дозволяє однозначно сформувати провали в ДС у напрямках на джерела завад, але при такій обробці ДС антенної решітки має високий рівень бічного випромінювання.

Також, чим ближче джерела завад до сигналу по кутовій координаті до джерела корисного сигналу, тим більше ослаблення корисного сигналу.

Представлена стаття може бути корисною для розробників апаратури для радіотехнічних систем, зокрема систем пеленгації, радіолокації, придушення радіозавад тощо.

Література

1. Макаренко В. Технологическая эволюция ВЧ-устройств систем 5G миллиметрового диапазона/ В. Макаренко, Е. Потемкин // Беспроводные технологии. – 2019. – №2.– С. 35-39.
2. Монзинго Р.А. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию. / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер; пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.
3. Баланис К. А. Введение в смарт-антенны / К. А. Баланис, П. И. Иоанидес; пер. с англ. – М.: Техносфера, 2011. – 197 с.
4. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Д. И. Воскресенский, В. И. Степаненко, В. С. Максимов – М.: Радиотехника, 2003. – 632 с.

References

1. Makarenko V. Tekhnologicheskaya evolyuciya VCh-ustrojstv sistem 5G millimetrovogo diapazona/ V. Makarenko, E. Potemkin // Besprovodnye tekhnologii. – 2019. – №2.– S. 35-39.
2. Monzingo R.A. Adaptivnye antennnye reshetki. Vvedenie v teoriyu. / R. A. Monzingo, T. U. Miller; per. s angl. – M.: Radio i svyaz', 1986. – 448 s.
3. Balanis K. A. Vvedenie v smart-antenny / K. A. Balanis, P. I. Ioanides; per. s angl. – M.: Tekhnosfera, 2011. – 197 s.
4. Voskresenskij D.I. Ustrojstva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannyh antennnyh reshetok / D. I. Voskresenskij, V. I. Stepanenko, V. S. Maksimov – M.: Radiotekhnika, 2003. – 632 s