

О.Ф. Дубина, к.т.н., доц.
Ю.М. Єфремов, к.т.н., доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»
А.Ю. Денисюк, к.т.н., доц.
А.С. Паламарчук, ст. викладач
Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова

Автокомпенсатор шумоподібної перешкоди з колами корекції на основі частотно-залежних фільтрів

Важливою рисою збройного конфлікту на сході України є широке використання противником засобів радіоелектронної боротьби. Досить ефективними засобами, що здатні істотно ускладнювати роботу радіолокаційної станції, є шумоподібні перешкоди. До таких перешкод можна віднести і передавачі перешкод, що закидаються. Враховуючи високу чутливість приймальної апаратури радіолокаційної станції використання навіть одного такого джерела шумоподібної перешкоди може мати наслідком істотне погіршення спроможності радіолокаційних станцій, щодо обробки отриманої інформації. Використання багатьох відомих способів протидії таким перешкодам є малоефективними, особливо для крупноапертурних і високочутливих радіолокаційних станцій. Найбільш природнім способом захисту від активних широкосмугових перешкод є їх когерентна компенсація за допомогою кореляційного автокомпенсатора. Кореляційні автокомпенсатори показують гарні результати лише в тому випадку, якщо частотні спектри перешкод в основному та допоміжному каналі прийому однакові, що забезпечує високу кореляцію перешкодових коливань. Це можливо, коли джерело перешкод є вузькосмуговим та розташоване в дальній зоні антени радіолокаційної станції. Спектри перешкодових коливань в основному та допоміжному каналах у випадку широкосмугових перешкод є суттєво різними. З'являється потреба в нейтралізації відмінностей між частотними спектрами перешкоди в допоміжному і основному у каналах прийому. Через значне зниження інформативності корисного сигналу, нейтралізація спотворень частотного спектру перешкоди в основному каналі прийому немає сенсу. З метою підвищення ефективності роботи кореляційного автокомпенсатора, більш доцільним видається внесення до спектру допоміжного каналу прийому таких же спотворень, що і в основному каналі прийому, шляхом управління частотною характеристикою допоміжного каналу. Одним із практичних шляхів вирішення цього завдання, може бути створення кіл корекції, що основані на отриманні потребуємо частотної характеристики допоміжного каналу прийому у вигляді поліноміального наближення.

Ключові слова: *передавачі перешкод; автокомпенсатор; основний і допоміжний канали прийому; кола корекції; радіоелектронна боротьба.*

Актуальність теми. Бойові дії на сході України характеризуються досить специфічними способами та методами їх ведення. Однією з особливостей ведення бойових дій є широке використання противником засобів радіоелектронної боротьби [1]. Досить ефективними засобами, що істотно ускладнюють роботу радіолокаційної станції, є і закидані передавачі перешкод. Приймальна частина радіолокаційної станції має достатньо високу чутливість. Тому, навіть використання одного такого джерела шумоподібної перешкоди може призвести до істотного зниження інформаційних можливостей радіолокаційної станції. Одним із можливих способів захисту від активних широкосмугових перешкод є їх когерентна компенсація за допомогою кореляційного автокомпенсатора [7–11]. Але звичайні одноканальні кореляційні автокомпенсатори, дають гарний результат лише в тому разі, коли частотні спектри перешкод в основному та допоміжному каналі прийому співпадають. Тобто, кореляція цих коливань є високою. А це має місце лише тоді, коли джерело активних перешкод знаходиться в дальній зоні антени та вузькосмугове.

У разі впливу на РЛС широкосмугових перешкод, особливо якщо вони знаходяться в ближній зоні антени, ефективність роботи такого автокомпенсатора буде досить низькою. Це обумовлене тим, що спектри коливань перешкоди в основному та допоміжному каналах прийому будуть досить різними [5–11]. Звідси випливає завдання удосконалення автокомпенсатора перешкод.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Використання різноманітних засобів радіоелектронної боротьби істотно обмежує можливості радіоелектронних засобів [1–4]. Досвід сучасної війни яскраво підтверджує складність ведення бойових дій в умовах широкого застосування противником різноманітних перешкод. Тому проблематика боротьби з перешкодами, які створює противник, є досить актуальною. В теперішній час існує багато способів та методів протидії шкоді, яка

може бути заподіяна радіолокаційним засобам при широкому використанні противником різноманітних перешкод [7–11].

Аналіз літератури показує, що переналаштування несучої частоти не дає прийнятних результатів для випадку, якщо перешкода засобів радіоелектронної боротьби противника широкопasmовога [7, 10, 11]. Різноманітні автоматичні регулювальники потужності та диференціюючі кола, також неефективні у випадку шумоподібної перешкоди [7, 9–11].

Одним з можливих способів боротьби з цими перешкодами міг би бути їх пошук і знешкодження. Але він дуже проблематичний для застосування щодо радіолокаційних станцій, які мають високу чутливість, великі габарити та обмежені терміни на пошук і знешкодження джерела перешкоди [7, 9–11].

Просторова селекція дозволяє за напрямом джерела перешкод у діаграмі спрямованості формувати провали. Але зміни амплітудно-фазового розподілу реалізується шляхом підбору, а це не завжди дає змогу максимально послабити перешкоду [7, 9–11].

Сумісна оцінка цілей і передавачів активних перешкод з послідуочим розділом сигналів [7, 9–11] могла б дати непогані результати тоді, коли достатньо точно відома діаграма спрямованості приймального тракту радіолокатора. Для головного, першого і другого бокових пелюстків це можливо. На формування третього та подальших бокових пелюстків суттєвий вплив здійснюють місцеві предмети та характер підстилаючої поверхні. Тому, у разі приходу сигналу активної перешкоди по дальнім боковим пелюсткам, а це може мати місце при використанні закиданих шумоподібних перешкод, цей спосіб буде неефективним.

Когерентна компенсація за допомогою кореляційного автокомпенсатора видається найбільш доцільним та природним способом захисту від активних широкопasmових перешкод [7–11]. Кореляційні автокомпенсатори ефективно працюють лише тоді, коли частотні спектри перешкод в основному (ОК) та допоміжному каналі (ДК) прийому однакові. Це гарантує високу кореляцію перешкодових коливань. Але це справедливо лише тоді, коли джерело активних перешкод вузькопasmове і знаходиться в дальній зоні антени.

Спектри перешкодових коливань в основному та допоміжному каналах прийому, у разі, коли джерело активних перешкод широкопasmове, будуть суттєво різняться.

Таким чином, удосконалення автокомпенсатора перешкод є важливим та актуальним науково-практичним завданням.

Метою статті є вирішення завдання збільшення коефіцієнта взаємної кореляції між частотними спектрами перешкоди в основному і допоміжному каналах прийому автокомпенсатора.

Викладення основного матеріалу. Усунення спотворень частотного спектра перешкоди в основному каналі прийому видається проблематичним, через те що в ньому наявні неперекручений корисний сигнал, інформативність якого у разі перетворення спектра суміші корисного сигналу і перешкоди значно знизиться. Тому доцільно, управляючи частотною характеристикою допоміжного каналу, ввести до спектра допоміжного каналу ті самі спотворення, що і в основному каналі за допомогою кіл корекції.

Створення таких кіл корекції, пропонується на основі способу поліноміального наближення, тобто шляхом представлення потребуємо частотної характеристики сумою постійної, лінійної, квадратичної та інших складових.

Частотна характеристика допоміжного каналу $F_{ДК}(j\omega)$ набуває вигляду [5, 7–11]:

$$F_{ДК}(j\omega) = \sum_{i=1}^n \dot{K}_i (\omega - \omega_0)^{i-1} F_{ДК_0}(j\omega), \quad (1)$$

де ω , ω_0 – циклічна та середня циклічна частота сигналу радіолокатора;

$F_{ДК_0}(j\omega)$ – початкова частотна характеристика допоміжного каналу прийому;

\dot{K}_i – комплексний коефіцієнт передачі i -го підканалу.

В даному випадку допоміжний канал розбивається на кілька підканалів. До кожного з підканалів вводять частотно-залежний фільтр. Ці фільтри мають лінійну, квадратичну, кубічну тощо амплітудно-частотну характеристику, а значить вносять у спектр перешкоди у всій смузі пропускання викривлення відповідного характеру.

На рисунку 1 наведена структурна схема кореляційного автокомпенсатора, що має кола коригування частотного спектра перешкоди. Ці кола побудовані на базі частотно-залежних фільтрів, що мають різні амплітудно-частотні характеристики. Частотно-залежні фільтри реалізовані на базі лінії затримки та двохвідного суматора (рис. 1), а потрібна частотна характеристика фільтра отримується шляхом підбору лінії затримки.

Досліджувалась приймальна частина радіолокаційної станції, яка має в своєму складі кореляційний автокомпенсатор з колами корекції. Ця частина представлена у вигляді програми. Таким чином, були

розраховані характеристики ефективності роботи даної схеми залежно від довжини хвилі радіолокатора, смуги пропускання основного каналу прийому, геометричних параметрів, рівня внутрішніх шумів приймального тракту. До цих характеристик належать:

- а) коефіцієнт взаємної кореляції напруг в основному та допоміжному каналах прийому;
- б) коефіцієнт придушення перешкод.

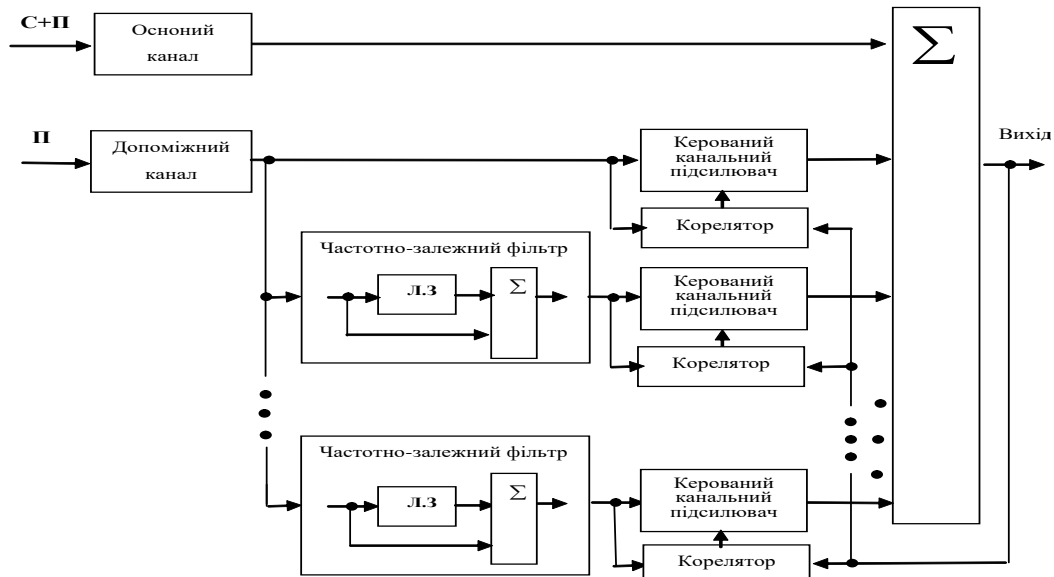


Рис. 1. Структурна схема кореляційного авто компенсатора, що має кола коригування частотного спектра перешкоди

Коефіцієнт придушення перешкод з урахуванням внутрішніх шумів визначається таким чином [5, 7–11]:

$$K_{\Pi} = \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{1 + \xi_1}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + \xi_2}\right) \cdot \sum_{i=1}^N |\rho_i|^2}, \quad (2)$$

де $\xi_1 = \frac{P_{\text{шок}}}{P_{\text{пок}}}$; $\xi_2 = \frac{P_{\text{шдк}}}{P_{\text{пдк}}}$ – відношення потужності шуму до потужності перешкоди в основному та допоміжному каналах відповідно;

ρ_i – коефіцієнт взаємної кореляції напруги перешкоди в основному і допоміжному каналах;

N – кількість допоміжних підканалів.

Коефіцієнт взаємної кореляції напруг прямошумової перешкоди в основному каналі й i -му допоміжному підканалі визначається за формулою [5, 7–11]:

$$\rho_i = \frac{\int_{-1+\Delta\nu}^{1+\Delta\nu} \dot{\Phi}_i(j\nu) \cdot \dot{K}_0(j\nu) d\nu}{\sqrt{\int_{-1+\Delta\nu}^{1+\Delta\nu} |\dot{K}_0(j\nu)|^2 d\nu \cdot \int_{-1+\Delta\nu}^{1+\Delta\nu} |\dot{\Phi}_i(j\nu)|^2 d\nu}}, \quad (3)$$

де $\dot{\Phi}_i(j\nu)$ – частотна характеристика фільтра i -го допоміжного підканалу;

$\dot{K}_0(j\nu)$ – частотна характеристика основного каналу прийому (від виходу антени передавача перешкод до виходу приймача РЛС);

$\nu = \frac{f}{f_0}$ – відносне значення частоти;

$\Delta\nu = \frac{\Delta f}{f_0}$ – приріст відносного значення частоти;

f_0 – несуча частота; Δf – приріст несучої частоти.

Для кількісного оцінювання результатів дослідження було здійснено відповідні розрахунки. Відносний розмір приймальної антени $l_{отн}$ прийнято таким, що дорівнює 150. Рівень внутрішніх шумів приймального тракту в основному і додатковому каналі вибрано таким чином, що $\xi_0 = \xi_1 = 1/5000$. Відносна відстань до перешкоди $r_0 = r/\lambda = 2000$. Кутовий напрям на перешкоду, який обрали для найбільш несприятливих умов, змінюється в межах $6-6,5^\circ$ та $14-14,5^\circ$. Смуга пропускання приймального пристрою становить 2% відносно несучої частоти сигналу. Результати розрахунків наведено в таблицях 1–2.

Таблиця 1

Результати розрахунків K_{Π} залежно від кутового напрямку на джерело перешкод

Коефіцієнт придушення перешкоди, дБ	Кутовий напрям на джерело перешкод – Θ [град]											
	6,0	6,05	6,1	6,15	6,2	6,25	6,3	6,35	6,4	6,45	6,5	
1 підканал	12,4	14,6	20,1	21,2	20,2	21,6	17,2	14,3	13,1	18,3	21	
2 підканали	24,1	22,6	23,3	23,5	23,7	22,2	22,4	23,4	23,9	23,6	23,1	
3 підканали	28,0	26,1	26,9	28,2	27,2	26,7	26,2	26,0	26,8	27,4	28,1	

Таблиця 2

Результати розрахунків K_{Π} залежно від кутового напрямку на джерело перешкод

Коефіцієнт придушення перешкоди, дБ	Кутовий напрям на джерело перешкод – Θ [град]											
	14,0	14,05	14,1	14,15	14,2	14,25	14,3	14,35	14,4	14,45	14,5	
1 підканал	17,1	13,3	11,1	12,8	16,9	14,3	12,6	10,9	12,2	14,7	16,9	
2 підканали	20,1	19,4	18,2	17,5	16,9	15,2	16,4	19,4	20,1	20,7	19,8	
3 підканали	24	23,2	22,1	22,8	23,3	24,1	23,4	22,8	22,1	21,6	24	

Результати моделювання (табл. 1–2) показали, що для звичайних автокомпенсаторів коефіцієнт придушення широкосмугових перешкод є досить низьким. Коефіцієнт придушення коливається від 11 до 21 дБ, залежно від умов, а його середнє значення дорівнює 15–16 дБ. Нерівномірність характеристики придушення маємо до 9 дБ.

Додаткові результати розрахунків також показали, що кількість підканалів блока коригування доцільно обмежити трьома, тому що подальше збільшення кількості підканалів не призводить до відчутного збільшення коефіцієнта придушення. Для запропонованого автокомпенсатора (рис. 1), маємо середнє значення коефіцієнта придушення 24–28 дБ. Нерівномірність характеристики придушення, що має при цьому місце, має значення не вище 2 дБ. За результатами досліджень, внаслідок застосування кіл корекції, отримали підвищення значення коефіцієнта придушення перешкод в середньому на 4–7 дБ.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Для підвищення значення коефіцієнта придушення перешкод у кореляційному автокомпенсаторі доцільно ввести до допоміжного каналу прийому кола корекції частотних спектрів перешкоди. Новизна результатів дослідження полягає в удосконаленні структурної схеми автокомпенсатора, що досягається введенням у допоміжний канал прийому кіл корекції на основі частотно-залежних фільтрів. За результатами проведеного моделювання визначено, що доцільну кількість підканалів можна обмежити трьома. Практична значущість результатів досліджень полягає в забезпеченні підвищення значення коефіцієнта придушення перешкод в середньому на 4–7 дБ.

Перспективами подальших досліджень у цьому напрямі є порівняння ефективності роботи частотно-залежних фільтрів, побудованих на основі використання різних методів апроксимації частотної характеристики допоміжного каналу прийом, зокрема, на основі частково-постійної апроксимації, апроксимації рядом Фур'є та поліноміальної апроксимації.

Список використаної літератури:

1. Українські військові захопили комплекс радіоелектронного придушення «Борисоглібськ-2» // РБК-Україна. – 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.rbc.ua/ukr/news/ukrainskie-voennye-zahvatili-radioelectrjonnogo-1663093485.html>.
2. Development of metho-dological principles of routing in networks of special communication in conditions of fire storm and radio-electronic suppression / O.Sova, Y.Zhuravskiy, Y.Vakulenko and other // EUREKA: Physics and Engineering. –2022. – № 3. – P. 159–166. DOI: 10.21303/2461-4262.2022.002434.

3. Аналіз підходів до впливу засобів радіоелектронного подавлення на мережецентричну систему управління / Ю.В. Журавський, А.В. Шишацький, О.Я. Сова та ін. // Системи управління, навігації та зв'язку; Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. – 2019. – Вип. 6 (58). – С. 129–139.
4. Комплекси радіоелектронного подавлення / М.Д. Петрук, М.В. Дюков, В.М. Ничипорчук, А.В. Гламазда. – Житомир: ЖВІ ДУТ, 2014. – 516 с.
5. Радіотехніка: Енциклопедичний навчальний довідник: навч. посібник / за ред. Ю.Л. Мазора, С.А. Мачуського, В.І. Правди. – К.: Вища шк., 2009. – 838 с.
6. Основи наукових досліджень: навч. посіб. – К.: Вид-во Європ. Ун-ту, 2012. – 110 с.
7. Ширман Я.Д. Теорія і техніка обробки радіолокаційної інформації на фоні перешкод / Я.Д. Ширман, В.М. Манжос. – Харків: ВІРТА ППО, 2008. – 268 с.
8. Leonets O.A. System problems of strapdown interial navigation systems. Part II. Software of SINS / O.A. Leonets, S.S. Bogatsky. – К.: Альфа, 2020. – 151 с.
9. Николишин М.Й. Радіотехнічні методи навігації / М.Й. Николишин. – Л.: Львівська політехніка, 2020. – 124 с.
10. Методи безпечної обробки інформації в багатопозиційних системах радіолокації: монографія / І.Пахомей, В.Козловський, С.Гнатюк, М.Рябий. – К.: Центр учбової літератури, 2018. – 232 с.
11. Основи побудови радіолокаційних засобів розвідки повітряного простору: конспект лекцій / В.С. Васюта, О.В. Тесленко, В.М. Купрій, О.А. Малишев. – Х.: ХУПС, 2013. – 212 с.

References:

1. www.rbc. (2022), «Ukrainski viiskovi zakhopyly kompleks radioelektronnoho prydushennia «Borysohlibsk-2»», *RBK-Ukrain*, [Online], available at: <http://www.rbc.ua/ukr/news/ukrainskie-voennye-zahvatili-radioelektronnoqgo-1663093485.html>
2. Sova, O., Zhuravskiy, Y., Vakulenko, Y. et al. (2022), «Development of methodological principles of routing in networks of special communication in conditions of fire storm and radio-electronic suppression», *EUREKA: Physics and Engineering*, No. 3, pp. 159–166, doi: 10.21303/2461-4262.2022.002434.
3. Zhuravskiy, Ju.V., Shyshac'kiy, A.V., Sova, O.Ja. et al. (2019), «Analiz pidhodiv do vplyvu zasobiv radioelektronnoho podavlennja na mrezhecentrychnu systemu upravlinnja», *Systemy upravlinnja, navigacii ta zv'jazku*, Poltavsk'ij nacional'nyj tehnicnyj universytet imeni Jurija Kondratjuka, Issue 6 (58), pp. 129–139.
4. Petruk, M.D., Djukov, M.V., Nychyporchuk, V.M. and Glamazda, A.V. (2014), *Kompleksy radioelektronnoho podavlennja*, ZhVI DUT, Zhytomyr, 516 p.
5. Mazor, Ju.L., Machus'kiy, Je.A. and Pravda, V.I. (ed.) (2009), *Radiotehnika: Encyklopedychnyj navchal'nyj dovidnyk*, navch. posibnyk, Vyshha shk., K., 838 p.
6. *Osnovy naukovykh doslidzhen'* (2012), navch. posib., Vyd-vo Jevrop. Un-tu, K., 110 p.
7. Shyrman, Ja.D. and Manzhos, V.M. (2008), *Teoriya i tehnyka obrobky radiolokacijnoi informacii na foni pereshkod*, VIRTА PPO, Harkiv, 268 p.
8. Leonets, O.A. and Bogatsky, S.S. (2020), *System problems of strapdown interial navigation systems. Part II. Software of SINS*, Al'fa, K., 151 p.
9. Nykolyshyn, M.J. (2020), *Radiotehnicni metody navigacii'*, L'viv'ska politehnika, L'viv, 124 p.
10. Pahomej, I., Kozlovsk'ij, V., Gnatjuk, S. and Rjabyj, M. (2018), *Metody bezpechnoi' obrobky informacii' v bagatopozycijnyh systemah radiolokacii'*, monografija, Centr uchbovoi' literatury, K., 232 p.
11. Vasjuta, V.S., Teslenko, O.V., Kuprij, V.M. and Malyshev, O.A. (2013), *Osnovy pobudovy radiolokacijnyh zasobiv rozvidky povitranogo prostoru*, konspekt lekcij, HUPS, H., 212 p.

Дубина Олександр Федорович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська Політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-3448-6072>.

Наукові інтереси:

– цифрова обробка сигналів.

Єфремов Юрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент Державного університету «Житомирська Політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-1249-5560>.

Наукові інтереси:

– цифрова обробка сигналів.

Денисюк Анатолій Юрійович – кандидат технічних наук, доцент Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

<https://orcid.org/0000-0003-4226-2394>.

Наукові інтереси:

– обробка радіолокаційної інформації на фоні перешкод;

– підвищення точності виміру координат на фоні перешкод.

E-mail: anatolijdenysyk91@gmail.com.

Паламарчук Андрій Семенович – старший викладач Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- обробка радіолокаційної інформації на фоні перешкод.

Dubyna O.F., Efremov Yu.M., Denysiuk A.Yu., Palamarchuk A.S.

Autocompensator of noise-like obstacle with correction circles based on frequency-dependent filters

An important feature of the armed conflict in the east of Ukraine is the wide use of the means of electronic warfare by the enemy. Quite effective means that create significant obstacles to the operation of a radar station are noise-like obstacles, in particular throwable single-action jamming transmitters. Taking into account the high sensitivity of the receiving equipment of the radar station, the use of even one such source of noise-like interference can lead to a significant reduction in the information capabilities of the radar equipment, and as a result, to the failure to perform the tasks that are entrusted to them. The use of many known methods of counteracting such interference are ineffective, especially in the case of large-aperture and highly sensitive radar stations. The most natural way to protect against active broadband interference is their coherent compensation using a correlation autocompensator. Correlation autocompensators show good results only if the frequency spectra of the interference in the main and auxiliary receiving channels are the same, which ensures a high correlation of interference oscillations. This is possible if the source of active interference is narrowband and located in the far zone of the antenna. If the source of active interference is wide-band, then the spectrum of interference fluctuations in the main and auxiliary receiving channels differs significantly. There is a problem of eliminating discrepancies between the frequency spectra of the interference in the main and auxiliary channels of reception. Elimination of distortions of the interference frequency spectrum in the main reception channel does not seem appropriate, due to a significant decrease in the informativeness of the useful signal. Therefore, controlling the frequency characteristic of the auxiliary channel, it is advisable to introduce the same distortions into the spectrum of the auxiliary channel as in the main channel in order to increase the efficiency of the correlation autocompensators. It is proposed to construct a key for such corrections based on the polynomial approximation of the indispensable frequency characteristic of the auxiliary reception channel.

Keywords: interference transmitters; autocompensator; main and auxiliary reception channels; correction circuits; radio electronic warfare.

Стаття надійшла до редакції 09.01.2023.