

О.М. Кубрак, к.т.н.

Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університету**МЕТОДИКА ФОРМУВАННЯ РАДІОПЕРЕШКОД
ДЛЯ ПОДАВЛЕННЯ ШИРОКОСМУГОВИХ ЛІНІЙ РАДІОЗВ'ЯЗКУ**

Пропонується методика формування радіоперешкод з указаною шириною та центральною частотою спектра для подавлення ліній радіозв'язку шляхом прицілювання за структурою (кореляційними властивостями) широкосмугових радіосигналів. Наводиться приклад застосування розробленої методики.

Вступ. Актуальність проблеми. На сьогодні в радіоелектронних засобах (РЕЗ), призначених для передачі інформації зі швидкостями більше 1 Мбіт/с, з метою захисту від радіоперешкод широко застосовуються шумоподібні радіосигнали (ШПРС) з обмеженою шириною спектра. ШПРС часто називають широкосмуговими або складними радіосигналами, у яких база ($B = \Delta F T \gg 1$, де ΔF , T – ширина спектра та тривалість радіосигналу) набагато більша за одиницю і на сьогодні в засобах радіозв'язку становить $B = 100\text{--}10000$. ШПРС, як правило, являють собою адитивну або мультиплікативну суміш декількох радіосигналів із простими видами модуляції (амплітудна, частотна, фазова) та попереднім перешкодостійким кодуванням інформації [2–6, 11, 15], що визначає його структуру. Аналіз структури сигналу за кореляційними властивостями при прийомі забезпечує захист від некорельованих радіоперешкод, а перешкодостійке кодування забезпечує часткове відновлення інформації при її руйнуванні та відповідний захист від несанкціонованого доступу [9, 10, 12, 16, 17].

Найбільшого розповсюдження ШПРС набули в радіоелектронних комплексах космічних систем, які використовуються в супутникових системах зв'язку, наприклад, для передачі результатів дистанційного зондування Землі [2–4, 10, 16]. Такі радіосигнали використовуються також у радіолокаційних, радіонавігаційних системах та системах стільникового рухомого зв'язку [1, 4, 6, 15]. При цьому в РЕЗ з ШПРС забезпечується висока перешкодозахищеність при малих (навіть менших за одиницю) відношеннях сигнал–шум.

Застосування ШПРС у РЕЗ, крім того, забезпечує можливість: реалізації оптимальної обробки (виділення інформації) за рахунок відомих кореляційних властивостей, що гарантує згортку його в короткий імпульс, тривалість якого обернено пропорційна його ширині спектра; одночасної роботи багатьох абонентів у загальній смузі частот за рахунок розподілу адрес (кодів доступу) між ними та синхронізації; забезпечення скритності роботи за рахунок зменшення потужності; забезпечення електромагнітної сумісності з вузькосмуговими РЕЗ. Характерною особливістю систем радіозв'язку, які використовують ШПРС, є й те, що при збільшенні абонентів зменшується їхня перешкодозахищеність [14, 15].

Всі ці можливості РЕЗ з'являються за рахунок застосування ШПРС. При цьому гарантується, що при дії перешкод, які будуть забезпечувати коефіцієнт подавлення (відношення потужності радіоперешкоди P_n до потужності радіосигналу P_c на вході радіоприймача, що подавлюється) $K_n = (P_n/P_c)_{\text{вх.}} \leq 2B$, така лінія зв'язку не буде подавленою. В більшості робіт [4, 12, 16] при визначенні та аналізі перешкодостійкості РЕЗ вважається, що радіоперешкода є гауссівським (нормальним) випадковим процесом з рівномірною спектральною щільністю потужності (білий шум), це є суттєвим і не завжди правильним обмеженням. Звичайно, в таких умовах радіоперешкоди, які формуються станціями перешкод розробки 80-х років минулого сторіччя, є неефективними [11, 15], і завдання створення прицілених за структурою радіоперешкод з метою подавлення РЕЗ, що використовують ШПРС для перенесення інформації, залишається актуальним.

Постановка наукового завдання. Для забезпечення можливості подавлення РЕЗ, які використовують ШПРС, виникає завдання формування радіоперешкод, що мають властивості, аналогічні радіосигналу лінії радіозв'язку (ЛРЗ), тобто завдання пошуку оптимальної радіоперешкоди для таких РЕЗ.

Процес радіоподавлення РЕЗ, як правило, передбачає: ведення радіоелектронної розвідки (оцінка параметрів радіосигналів), ведення радіоподавлення (формування та випромінювання радіоперешкод) та контроль роботи лінії радіозв'язку. В статті обмежимося веденням радіоелектронної розвідки та формуванням радіоперешкоди, а також оцінимо якість її формування методом імітаційного моделювання з використанням теорій функцій, спектрів та матричного аналізу [8, 13].

Енергетичний спектр ШПРС представлено графічно (в області додатних частот) на рисунку 1, де f_0 – центральна частота спектра ШПРС; ΔF – ширина спектра ШПРС ($\Delta F = f_g - f_n$); f_n , f_g – нижня та верхня граничні частоти спектра ШПРС відповідно; N_m – спектральна щільність

потужності ШПРС; ΔF_{np} – ширина смуги пропускання радіоприймального пристрою ($\Delta F_{np} = f_{в\ np} - f_{н\ np}$); $f_{н\ np}$, $f_{в\ np}$ – нижня та верхня граничні частоти смуги пропускання радіоприймача (визначають робочий діапазон проміжних частот) відповідно.

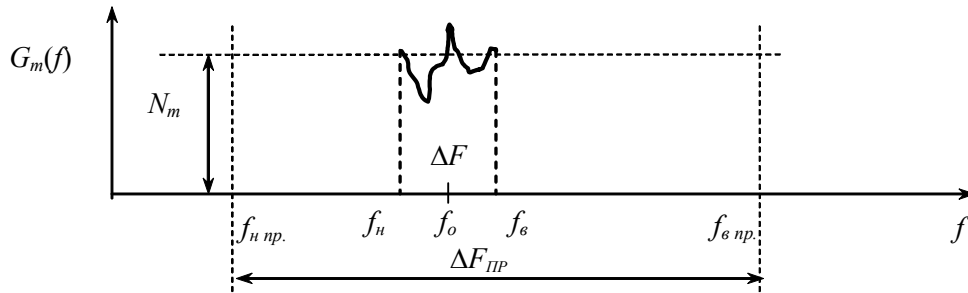


Рис. 1. Основні частотні параметри РЕЗ та ШПРС

Потужність внутрішнього шуму радіоприймача як ШПРС у смугі частот, що дорівнює ΔF , становить [9, 10]:

$$P_{ш} = \sigma_{ш}^2 = N_{ш} \Delta F_{np} = K_{ш} k T_0 \Delta F_{np}, \tag{1}$$

де $K_{ш}$ – коефіцієнт шуму радіоприймача ($K_{ш} = 1,1-1,4$); k – постійна Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К); T_0 – стандартна шумова температура антени ($T_0 = 300$ К).

У більшості робіт [1–5, 7, 13] при моделюванні як широкосмугові радіосигнали використовують частотно- або фазомодульовані сигнали, які задовольняють вимоги щодо ширини спектра сигналу, але мають малий інтервал кореляції, тобто не забезпечують властивостей ШПРС.

Таким чином, завдання формування ШПРС із центральною частотою f_0 , спектральна густина потужності N_m якого розподілена рівномірно в деякій смугі частот ΔF , та властивостями шуму до кінця не вирішене і потребує подальших досліджень. У даній роботі розглядаються питання моделювання ШПРС для РЕЗ із цифровою обробкою сигналів (ЦОС).

Основна частина.

Процедура вирішення завдання

Радіосигнал, у тому числі і ШПРС $s(t)$, у дійсному вигляді можемо представити як процес [8]:

$$s(t) = a(t) \cos(2\pi f(t)t + \varphi(t)), \tag{2}$$

де f – центральна частота; $a(t)$, $f(t)$, $\varphi(t)$ – закони зміни амплітуди, частоти та фази в часі відповідно (для ШПРС вони часто являють собою випадкові процеси); t – поточний час.

Спектр радіосигналу (2) має бути обмеженим значенням необхідної його ширини і представляється у вигляді [7, 8]:

$$G(f) = \begin{cases} N_m, & f \in \left(f_0 - \frac{\Delta F}{2}, \dots, f_0 + \frac{\Delta F}{2} \right) \\ 0, & f \notin \left(f_0 - \frac{\Delta F}{2}, \dots, f_0 + \frac{\Delta F}{2} \right) \end{cases}. \tag{3}$$

Автокореляційна функція такого радіосигналу може бути представлена у вигляді [4, 8, 9]:

$$B(\tau) = P \frac{\sin(\pi \Delta F \tau)}{\pi \Delta F \tau} \cos(2\pi f_c \tau) = \overline{s(t) s(t - \tau)}, \tag{4}$$

де P – відносна потужність ШПРС; τ – часовий зсув для визначення кореляційних властивостей сигналу, зокрема інтервалу кореляції τ_k , при якому $B(\tau_k) = 0$; $\overline{\quad}$ – риска зверху означає статистичне осереднення.

Методика формування ШПРС

1. Формування гауссівського (нормального) випадкового процесу

Незалежні відліки нормального випадкового процесу $\xi(t)$ можна сформувати за допомогою стандартної функції Gauss з математичним очікуванням (МО), що дорівнює нулю, та середньоквадратичного відхилення (СКВ), що дорівнює одиниці. В матричному вигляді цифрові відліки можна представити як вектор розмірністю L [1, 8, 13–15]:

$$\xi_L^T = \{\xi_l\}_{l=1,L} = (\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots, \xi_L), \tag{5}$$

де $l = 1, 2, \dots, L$ – номер відліку випадкового процесу; T – операція транспонування.

Кореляційна матриця відліків (5) може бути представлена у вигляді одиничної матриці [1, 14]:

$$\mathbf{D}_{LL} = \xi_L \xi_L^T = \mathbf{I}_{LL}, \quad I_{LL}[i, j] = \begin{cases} 1, & \text{при } i = j; \\ 0, & \text{при } i \neq j. \end{cases}$$

2. Формування кореляційної матриці прийнятих сигналів лінії радіозв'язку

а) при моделюванні:

Елементи кореляційної матриці \mathbf{B}_{LL} для формування залежних відліків ШПРС з автокореляційною функцією (4) визначаються за апостеріорною інформацією (результатами радіоелектронної розвідки – f_o та ΔF , P) і представляються у вигляді [1–5, 14]:

$$B[i, j] = P \frac{\sin[\pi \Delta F ((i - j) T_d)]}{\pi \Delta F ((i - j) T_d)} \cos[2\pi f_i ((i - j) T_d)], \quad (6)$$

де $i, j = 1, 2, 3, \dots, L$ – цілі числа, які вказують номер елемента квадратної матриці \mathbf{B}_{LL} , T_d – інтервал дискретизації.

б) реально за прийнятими L відліками сигналу лінії радіозв'язку $S_{L, ЛРЗ}$:

$$\mathbf{B}_{LL} = \mathbf{S}_{L, ЛРЗ} \mathbf{S}_{L, ЛРЗ}^T; \quad S_{L, ЛРЗ}[l] = s_{ЛРЗ}[t_l], \quad t_l = l T_d; \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad (7)$$

де $\mathbf{S}_{L, ЛРЗ}$ – вектор відліків сигналу лінії радіозв'язку з шириною спектра $\Delta F_{c, ЛРЗ}$ на центральній частоті $f_{o, ЛРЗ}$.

3. Надання кореляційних властивостей сигналу ЛРЗ нормальному випадковому процесу (5)

Власні вектори та відповідні їм власні числа кореляційної матриці \mathbf{B}_{LL} визначаються як

$$\sqrt{\mathbf{B}_{LL}} = \sum_{l=1}^L \sqrt{\lambda_l} \mathbf{H}_L^l; \quad \mathbf{B}_{LL} \mathbf{H}_L^l = \lambda_l \mathbf{H}_L^l, \quad (8)$$

де $\lambda_l \mathbf{H}_L^l$ – відповідно власні числа та власні вектори кореляційної матриці \mathbf{B}_{LL} [14].

Використовуючи визначені власні значення λ_l та відповідні їм власні вектори \mathbf{H}_L^l матриці \mathbf{B}_{LL} , вектор залежних відліків ШПРС \mathbf{S}_L з шириною спектра $\Delta F \approx \Delta F_{c, ЛРЗ}$ на центральній частоті $f_o \approx f_{o, ЛРЗ}$ та заданої потужності P_m можемо записати у матричному вигляді [14]:

$$\mathbf{S}_L = \sqrt{P_m} \sum_{l=1}^L \sqrt{\lambda_l} \xi_l \mathbf{H}_L^l. \quad (9)$$

Контроль якості формування радіоперешкоди здійснимо шляхом аналізу його спектрів.

Для перевірки якості формування ШПРС використаємо теорію аналізу спектрів, миттєвий $g(f)$ та інтегральний $G(f)$ енергетичні спектри ШПРС можуть бути представлені відповідно в такому вигляді [12]:

$$g_m(f) = \frac{|S_m(f)|^2}{T}, \quad G_m(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \overline{(g_m(f, T))}.$$

Дискретне перетворення Фур'є, як метод спектрального аналізу для сформованого ШПРС, має такий вигляд [12]:

$$S_m(f) = T_d \sum_{l=1}^L s[t_l] e^{-j2\pi f t_l}, \quad f_n < f < f_{\delta}, \quad f_{n \min} = 0, \quad f_{\delta \max} = F_d/2. \quad (10)$$

Ідеалізований приклад реалізації миттєвого енергетичного спектра внутрішнього шуму (5) радіоприймача, отриманого за даною методикою, має вигляд, що представлений на рисунку 2.

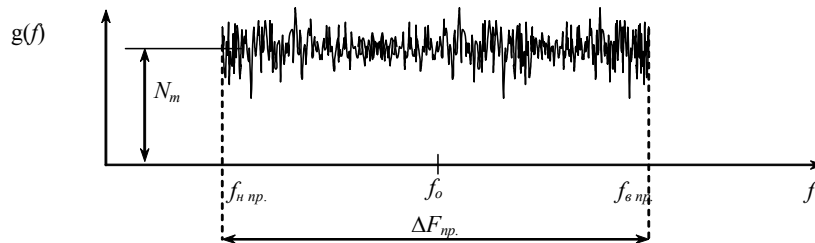


Рис. 2. Ідеалізований спектр внутрішнього шуму радіоприймача РЕЗ

Моделльний приклад застосування методики формування радіоперешкод для подавлення широкосмугових ліній радіозв'язку, де вона застосована для формування внутрішнього шуму радіоприймача, прийнятого радіосигналу та сформованої радіоперешкоди

Умови моделювання

- параметри радіоприймального пристрою (на проміжній частоті):
 - коефіцієнт шуму $K_{ш} = 1,2$;
 - смуга частот прийому $\Delta F_{np.} = 500$ МГц;
 - центральна частота смуги прийому $f_o = 1000$ МГц;
 - потужність шуму $P_{ш} = \sigma_{ш}^2 = K_{ш} k T_o \Delta F_{np.} = 2,484 \cdot 10^{-12}$ Вт;
- параметри строба аналізу:
 - частота (період) дискретизації $F_d = 5000$ МГц ($T_d = 1/F_d = 0,2$ нс);
 - кількість відліків у строб-імпульсі $L_{cmp.} = 75$;
 - тривалість строб-імпульсу $T_{cmp.} = L T_d = 15$ нс;
- параметри радіосигналу (радіоперешкоди):
 - потужність $P_c = 2,5 \cdot 10^{-9}$ Вт;
 - центральна частота $f_1 = 950$ МГц;
 - ширина спектра $\Delta F_1 = 40$ МГц;
 - кількість відліків (тривалість) $L = 75$ ($\tau_c = 15$ нс).

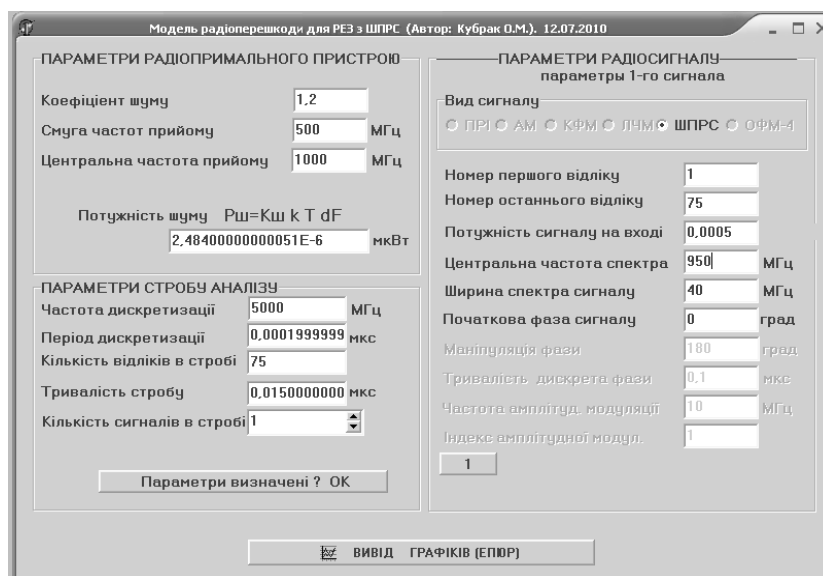


Рис. 3. Вікно введення початкових даних

Результати моделювання

Аналіз рисунків 4–7 показує, що за допомогою розробленої методики, яку реалізовано у вигляді програми, можливо:

- сформувати внутрішній шум радіоприймача (рис. 4, 5) з указаною шириною спектра, яка відповідає смузі пропускання радіоприймального пристрою, та з заданою потужністю відповідно до (1), (9) при проведенні досліджень радіоприймального тракту РТЗ;
- сформувати та проаналізувати ШПРС з указаною шириною спектра, середньою частотою та потужністю (рис. 6), наприклад, для формування радіоперешкод лініям радіозв’язку РТЗ з ШПРС;
- сформувати адитивну суміш m ШПРС та внутрішнього шуму з указаними параметрами (рис. 7) при необхідності моделювання та дослідження процесу прийому ШПРС РТЗ;
- провести попередній аналіз частотних та часових характеристик сформованих сигналів.

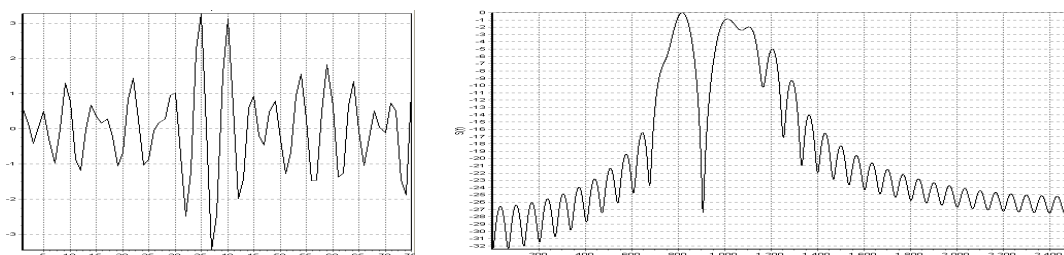


Рис. 4. Реалізація внутрішнього шуму радіоприймача та його миттєвий спектр

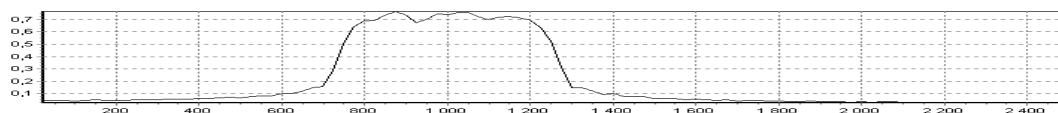


Рис. 5. Інтегральний спектр внутрішнього шуму радіоприймача (100 реалізацій)

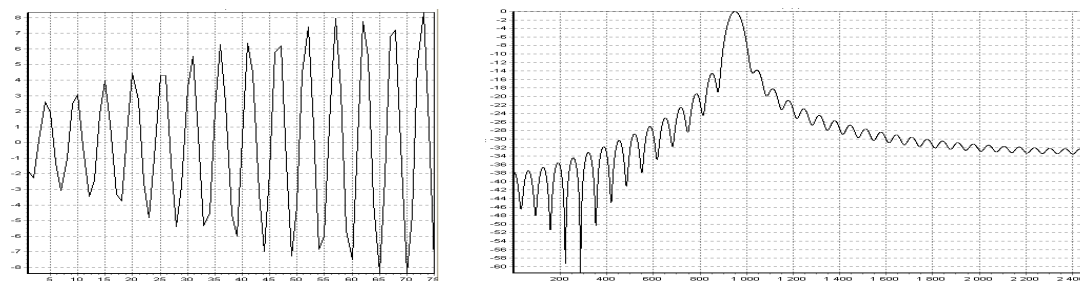


Рис. 6. Реалізація ШПРС та його миттєвий спектр

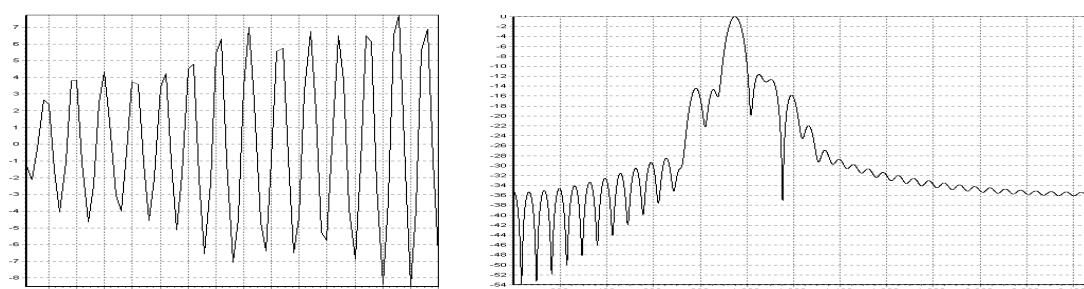


Рис. 7. Реалізація адитивної суміші ШПРС та внутрішнього шуму радіоприймача і відповідний їй миттєвий спектр

Висновки:

1. У статті розроблено методику формування радіоперешкоди для подавлення ширококугової лінії радіозв'язку. Радіоперешкода формується на основі визначення кореляційних властивостей радіосигналу радіолінії шляхом попереднього аналізу кореляційної матриці та визначення її власних чисел та відповідних їм власних векторів за (9).

2. Застосування розробленої методики під час проведення досліджень РЕЗ методом імітаційного моделювання забезпечить можливість формування ШПРС з необхідною потужністю, шириною та центральною частотою спектра.

3. На прикладі формування конкретних ШПРС, зокрема внутрішнього шуму радіоприймача та радіоперешкоди, показано працездатність та варіант застосування розробленої методики.

4. У результаті проведених досліджень можемо зробити висновок щодо можливості використання запропонованої методики для формування радіоперешкод з заданими кореляційними властивостями з метою створення прицільних за структурою радіоперешкод ширококугових ліній радіозв'язку.

5. Практично розроблена методика може бути реалізована з використанням сучасних цифрових пристроїв, зокрема цифрових сигнальних процесорів, що забезпечить можливість модернізації існуючих засобів радіоелектронного подавлення, зокрема апаратури формування радіоперешкод.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бакалов В.П. Цифровое моделирование случайных процессов / В.П. Бакалов. – М. : САЙНС-ПРЕСС, 2002. – 88 с.
2. Методика моделювання шумоподібних сигналів за заданими кореляційними властивостями з використанням алгоритму Холецкого / С.І. Болобан, А.М. Вагапов, О.М. Кубрак, Ю.Я. Куриляк // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 36. – С. 37–41.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М. : Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Варакин Л.Е. Теория систем сигналов / Л.Е. Варакин. – М. : Сов. радио, 1978. – 304 с.
5. Дятлов А.П. Анализ и моделирование обнаружителей и демодуляторов связанных сигналов : учеб. пособие/ А.П. Дятлов, П.А. Дятлов. — Таганрог : изд-во ТРТУ, 2005. — 176 с.

6. *Куприянов А.И.* Радиоэлектронные системы в информационном конфликте / *А.И. Куприянов, В.А. Сахаров.* – М. : Вузовская книга, 2003. – 528 с.
7. *Куприянов М.С.* Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования / *М.С. Куприянов, Б.Д. Матюшин.* – СПб. : Политехника, 1998. – 592 с.
8. *Левин Ю.С.* Введение в теорию и технику радиотехнических систем : учеб. пособие / *Ю.С. Левин.* – М. : Радио и связь, 1986. – 280 с.
9. *Михайлов В.Ю.* Математические основы анализа и синтеза сложных сигналов и процедур их обработки / *В.Ю. Михайлов.* – М. : изд-во МАИ, 1994. – 208 с.
10. *Пенин П.И.* Системы передачи цифровой информации : учеб. пособие / *П.И. Пенин.* – М. : Сов. радио, 1976. – 368 с.
11. *Перунов Ю.М.* Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / *Ю.М. Перунов, К.И. Фомичев, Л.М. Юдин* ; под ред. *Перунова Ю.М.* – М. : Радиотехника, 2003. – 416 с.
12. *Петрович Н.Т.* Системы связи с шумоподобными сигналами / *Н.Т. Петрович, М.К. Размахнин.* – М. : Сов. радио, 1969. – С. 232.
13. *Рабинер Л.* Теория и применение цифровой обработки сигналов / *Л.Рабинер, Б.Гоулд* ; пер. с англ. ; под ред. *Ю.Н. Александрова.* – М. : Мир, 1978. – 648 с.
14. Сверхбольшие интегральные и современная обработка сигналов : пер. с англ. / под ред. *С.Гуна, Х.Уайтхауса, Т.Кайлата.* – М. : Радио и связь, 1989. – 472 с.
15. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / под ред. *В.Г. Радзиевского.* – М. : Радиотехника, 2006. – 424 с.
16. Помехоустойчивость радиосистем со сложными сигналами / *Г.И. Тузов, В.А. Сивов, В.И. Прытков* и др. ; под ред. *Г.И. Тузова.* – М. : Радио и связь, 1985.
17. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / под ред. *В.Б. Пестрякова.* – М. : Сов. радио, 1973. – 424 с.

КУБРАК Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіоелектронної боротьби та захисту інформації Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

- цифрова обробка радіосигналів та формування радіоперешкод;
- моделювання радіотехнічних засобів.

Подано 17.05.2010

Кубрак О.М. Методика формування радіоперешкод для подавлення широкосмугових ліній радіозв'язку
Кубрак А.Н. Методика формування радіопомех для подавлення широкополосних ліній радиосвязи
Kubrak A.N. Methods of forming of radio interferences for suppression of noisevid lines of radio contact

УДК 621.396.96:519.852.6

Методика формування радіопомех для подавлення широкополосних ліній радиосвязи / А.Н. Кубрак

Предлагается методика формирования радиопомех с указанной шириной и центральной частотой спектра для подавления линий радиосвязи путем прицеливания за структурой (корреляционными свойствами) широкополосных радиосигналов. Приводится пример применения разработанной методики.

УДК 621.396.96:519.852.6

Methods of forming of radio interferences for suppression of noisevid lines of radio contact / A.N. Kubrak

The methods of forming of radio interferences are offered with the indicated width and central frequency of spectrum for suppression of lines of radio contact by aiming after the structure (by cross-correlation properties) of noisevid radio signals. An example of application of the worked out methods is made.