

С.І. Болобан, викл.  
А.М. Вагапов, к.т.н., с.н.с.  
О.М. Кубрак, к.т.н., ст. викл.  
Ю.Я. Куриляк, курсант

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова

### МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ШУМОПОДІБНИХ СИГНАЛІВ ЗА ЗАДАНИМИ КОРЕЛЯЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМУ ХОЛЕЦЬКОГО

Пропонується методика моделювання шумоподібного сигналу, за допомогою якої можна сформувати сигнал із заданими кореляційними властивостями (кореляційною функцією), у якого основна спектральна щільність потужності буде зосереджена у вказаній смузі частот.

**Актуальність.** На сучасному етапі розвитку радіотехнічних систем (РТС), призначених для передачі інформації з метою її приховування, виділяється тенденція застосування шумоподібних сигналів (ШПС) з обмеженою шириною спектра [1], [5], [8]. Використання ШПС у РТС забезпечує підвищення їх перешкодостійкості та криптозахисту. Зокрема широкого застосування ШПС набули в радіоелектронній боротьбі для блокування інформаційних каналів розвідки, зв'язку, управління і наведення озброєння та військової техніки. Враховуючи успіхи в області цифрової обробки радіосигналів, з'являється можливість застосування спеціальних процесорів (цифрових сигнальних процесорів) для формування ШПС [6], [8], [10].

**Стан справ.** Для проведення досліджень, пов'язаних з модернізацією РТС, що використовують ШПС, виникає необхідність їх моделювання для подальшої обробки спеціальними алгоритмами [1], [2].

Рівномірний енергетичний спектр  $m$ -го ШПС представлено графічно (в області додатних частот) на рис. 1, де  $f_m$  – центральна частота спектра ШПС;  $\Delta F_m$  – ширина спектра ШПС ( $\Delta F_m = f_{em} - f_{nm}$ );  $f_{em}$ ,  $f_{nm}$  – нижня та верхня граничні частоти спектра ШПС відповідно;  $N_m$  – спектральна щільність потужності ШПС;  $\Delta F_{nep}$  – робочий діапазон частот радіопередавального пристрою ( $\Delta F_{nep} = f_e - f_n$ );  $f_e$ ,  $f_n$  – верхня та нижня частоти смуги пропускання радіопередавача (визначають робочий діапазон частот) відповідно [2].

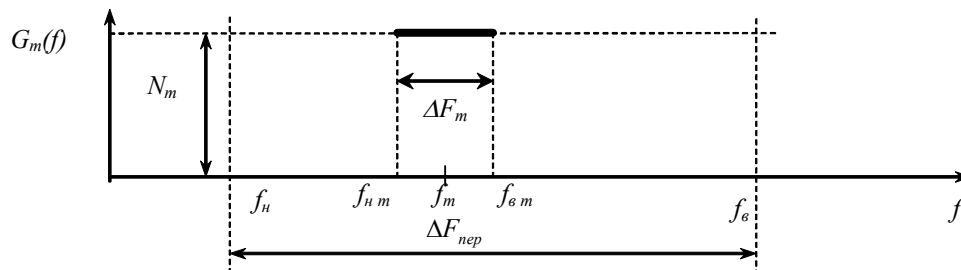


Рис. 1. Основні параметри  $m$ -го ШПС

Потужність такого  $m$ -го ШПС у смузі частот, рівній  $\Delta F_m$ , дорівнює [5]:

$$P_m = \sigma_{\omega}^2 = N_m \Delta F_m, \quad (1)$$

де  $N_m$  – спектральна щільність потужності  $m$ -го ШПС.

У більшості робіт [1, 2, 7, 9] моделювання ШПС здійснюється на основі використання амплітудно-, частотно- або фазомодульованих радіосигналів, які задовольняють вимоги щодо ширини спектра сигналу, але мають малий інтервал кореляції, тобто не забезпечують виконання всіх вимог до властивостей ШПС.

Таким чином, задача формування ШПС з центральною частотою  $f_m$ , спектральна щільність потужності  $N_m$  якого розподілена рівномірно в деякій смузі частот  $\Delta F_m$  та з заданими кореляційними властивостями шуму, до кінця не розв'язана і потребує подальших досліджень. У даній роботі пропонується варіант розв'язання даної задачі і розглядаються питання цифровою формування ШПС.

**Постановка задачі.** Використовуючи вибірку сигналу, який являє собою  $L$  відліків незалежних випадкових величин  $X_l$ , розподілених за нормальним (гаусівським) законом з математичним очікуванням  $M_x = 0$ , дисперсією  $D_x = 1$  [1–3],

$$\bar{X}_L^T = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_L) = \{x_l\}, \quad l = 1, 2, \dots, L. \quad (2)$$

Всі відліки вибірки незалежні, тобто при  $n \neq m$   $x_n \cdot x_m = 0$  ( $l, n, m$  – номери відліків сигналу), а кореляційна функція при будь-яких часових зсувах не рівних нулю ( $n \neq 0$ ) дорівнює нулю  $B^{(x)} [n] = 0, (n = 0, 1, \dots, L - 1)$ .

Кореляційна матриця вибірки (2) є одиничною матрицею [1], [4]:

$$B_{LL}^{(x)} = \overline{\bar{X}_L \bar{X}_L^T} = I_{LL}. \quad (3)$$

Задача полягає у формуванні  $L$  відліків ШПС  $\bar{Y}_L$  із заданими кореляційними властивостями, спектральна щільність потужності якого розподілена рівномірно у вказаній смузі частот.

$$\bar{Y}_L^T = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_L) = \{y_l\}. \quad (4)$$

Кореляційні властивості, смуга частот та потужність ШПС (4) можуть бути задані через його кореляційну матрицю, що має вигляд [1], [7]:

$$B_{LL}^{(y)} = \overline{\bar{Y}_L \bar{Y}_L^T} = \sigma_y^2 R_{LL} = P_m R_{LL}, \quad (5)$$

де  $\sigma_y^2 = P_m$  – дисперсія або потужність  $m$ -го ШПС;  $R_{LL}$  – задана нормована кореляційна матриця, що дорівнює:

$$R_{LL} = \frac{B_{LL}^{(y)}}{\sigma_y^2} = \frac{\overline{\bar{Y}_L \bar{Y}_L^T}}{\sigma_y^2}. \quad (6)$$

Елементи кореляційної матриці (6) можуть бути визначені відповідно до кореляційної функції (КФ), наприклад, типу  $R = \frac{\sin x}{x} \cos y$ , маємо [1], [2], [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{i,j} = \frac{\sin\left(\pi \Delta F_m \frac{(i-j)}{F_d}\right)}{\pi \Delta F_m \frac{(i-j)}{F_d}} \cos\left(2\pi f_m \frac{(i-j)}{F_d}\right), \quad \text{при } i \neq j; \\ R_{i,j} = 1, \quad \text{при } i = j; \end{array} \right. \quad (7)$$

де  $i, j = 1, 2, \dots, L$  – номер елемента матриці  $R_{LL}$ ;  $\Delta F_m$  – значення ширини спектра ШПС (величина смуги частот, в якій необхідно зосередити енергію ШПС);  $F_d$  – частота дискретизації ( $T_d = 1/F_d$  – період дискретизації) формування вхідної вибірки (1);  $f_m$  – центральна частота спектра ШПС.

**Розв’язок задачі.** Виходячи із постановки задачі, необхідно визначити деяку матрицю перетворення  $A_{LL}$ , яка забезпечить розв’язок задачі формування ШПС із заданими кореляційними властивостями та параметрами частотного спектра, тобто:

$$\bar{Y}_L = A_{LL} \bar{X}_L. \quad (8)$$

Для такого вектора кореляційну матрицю можемо представити відповідно до (3) у вигляді:

$$B_{LL}^{(y)} = \overline{\bar{Y}_L \bar{Y}_L^T} = A_{LL} \overline{\bar{X}_L \bar{X}_L^T} A_{LL}^T = A_{LL} A_{LL}^T. \quad (9)$$

Із (5) та згідно з (9) маємо нормовану кореляційну матрицю:

$$R_{LL} = \frac{B_{LL}^{(y)}}{\sigma_y^2} = \frac{A_{LL} A_{LL}^T}{\sigma_y^2} = A_{LL} A_{LL}^T, \quad A_{LL} = \frac{A_{LL}}{\sigma_y}. \quad (10)$$

Таким чином, для розв’язку системи рівнянь (8) можемо використати матрицю  $\check{A}_{LL}$ , яка є нижньою трикутною матрицею [7], тобто для розв’язання даної задачі можемо використати метод Холецького (метод квадратного кореня) [1], який дає можливість записати:

$$\bar{Y}_L = \sigma_y \check{Y}_L = \sqrt{P_m} \check{Y}_L, \quad (11)$$

$$\check{Y}_L^T = (\check{y}_1, \check{y}_2, \check{y}_3, \dots, \check{y}_L) = \{\check{y}_l\}, \quad \check{y}_l = \sum_{j=1}^l a_{lj} x_j, \quad l = 1, 2, \dots, L, \quad (12)$$

а вираз (12) можемо записати у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} \overset{\epsilon}{y}_1 = a_{11}x_1; \\ \overset{\epsilon}{y}_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2; \\ \overset{\epsilon}{y}_3 = a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3; \\ \dots \\ \overset{\epsilon}{y}_L = a_{L1}x_1 + a_{L2}x_2 + a_{L3}x_3 + \dots + a_{LL}x_L \end{cases} \quad (13)$$

Коефіцієнти  $a_{ij}$  ( $i, j = 1 \dots L$ ) є елементами матриці  $\overset{\sim}{A}_{LL}$ , які визначаються за виразами [1], [3], [7]:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1; \\ a_{k1} &= R_{k1}; \quad k = 2, 3, \dots, L; \\ a_{kl} &= \frac{R_{kl} - \sum_{j=1}^{l-1} a_{kj}a_{lj}}{a_{ll}}; \quad l = 2, 3, \dots, (k-1); \\ a_{kk} &= \sqrt{1 - \sum_{p=1}^{k-1} a_{kp}^2}, \end{aligned} \quad (14)$$

де  $R_{kl}$  – елементи заданої КМ, які визначаються відповідно до (7).

На основі (13), (14), використовуючи вираз (12), можемо визначити  $\overset{\sim}{Y}_L$ , а за виразом (11) визначимо вектор  $\vec{Y}_L$ , який являє собою вектор-вибірку ШПС із заданою кореляційною функцією, рівномірною спектральною щільністю потужності, зосередженою у заданій смузі частот.

Для перевірки якості формування ШПС за запропонованою методикою проведено імітаційне моделювання. У результаті здійснено порівняння заданої та отриманої кореляційних функцій, а також оцінка параметрів усередненого за 100 реалізаціями енергетичного спектра сформованого ШПС.

Задану кореляційну функцію відповідно до кореляційної матриці (7) можна представити у вигляді:

$$B^{(y)}[n] = \sqrt{P_m} \frac{\sin\left(\pi \Delta F_m \frac{n}{F_d}\right)}{\pi \Delta F_m \frac{n}{F_d}} \cos\left(2\pi f_m \frac{n}{F_d}\right), \quad n = 0, 1, \dots, (L-1) \quad (15)$$

і порівняти із середнім значенням оцінки кореляційної функції, отриманої за 100 реалізаціями

$$\overset{\epsilon}{B}_{\text{ср}}^{(y)}[n] = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} \overset{\epsilon}{B}_i^{(y)}[n], \quad n = 0, 1, \dots, (L-n), \quad (16)$$

де  $\overset{\epsilon}{B}^{(y)}[n] = \frac{1}{L-n} \sum_{k=1}^{L-n} \overset{\epsilon}{y}_k \overset{\epsilon}{y}_{k+n}$  – оцінка КФ на інтервалі часу від 0 до  $(L-n) \cdot T_d$ ,  $n = 0, 1, \dots, (L-n)$ .

**Початкові умови імітаційного моделювання:**

1. Частота дискретизації (період)  $F_d = 1,0 \text{ ГГц}, (T_d = 1 / F_d = 10^{-9} \text{ с}).$
2. Кількість відліків ШПС (тривалість)  $L = 256, (T_c = 256 \cdot T_d = 256 \text{ нс}).$
3. Ширина спектра ШПС  $\Delta F_m = 0,01 \cdot F_d = 10 \text{ МГц}.$
4. Середня частота спектра ШПС  $f_m = 0,18 \cdot F_d = 180 \text{ МГц}.$
5. Потужність ШПС  $P_m = 4,5 \text{ Вт}.$

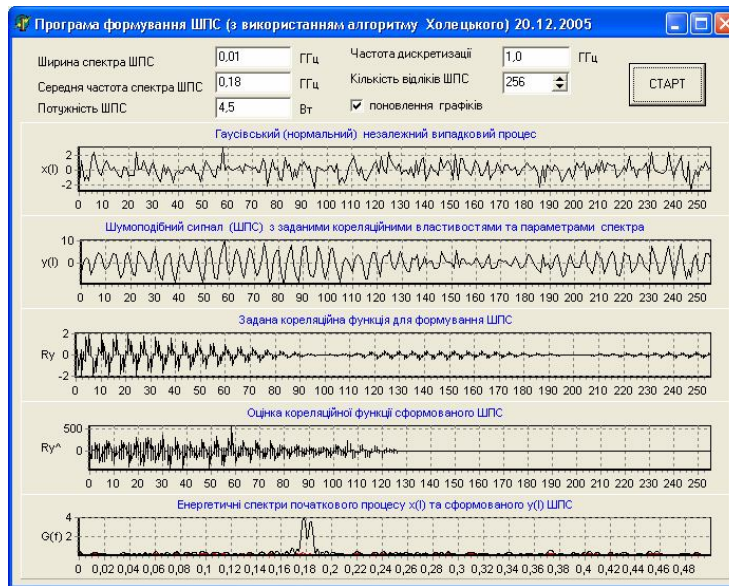


Рис. 2. Сформований ШПС, його задана та оцінена кореляційна функція

Аналіз рис. 2 показує, що за допомогою розробленої методики, реалізованої у вигляді програми, можна:

- сформувати ШПС із вказаною шириною спектра, середньою частотою та потужністю;
- отримати енергетичний спектр сформованого ШПС.

Для кількісної оцінки при порівнянні заданої і оціненої кореляційних функцій скористаємося виразом, який визначає відносну помилку формування ШПС:

$$\text{eps} = \frac{\left\| \bar{B}_{L-n}^{(y)} - \hat{B}_{L-n}^{(y)} \right\|}{\left\| \bar{B}_{L-n}^{(y)} \right\|} = 0,051. \tag{17}$$

За результатами моделювання відносна помилка формування ШПС за параметрами кореляційних функцій складає 0,051 (5,1 %).

Оцінку енергетичного спектра здійснено шляхом усереднення спектра Фур'є  $G(f)$  за 100 реалізаціями:

$$G_{\text{сеп}}^{(y)}(f) = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} G_i^{(y)}(f). \tag{18}$$

Аналіз оцінки енергетичного спектра сформованого ШПС (рис. 2) показав, що:

ширина спектра сигналу складає 10,05 МГц, що на 0,05 МГц відрізняється, а відносна помилка

дорівнює  $\delta \Delta F_m = \frac{|\Delta F_m - \hat{\Delta F}_m|}{\Delta F_m} = 0,05$ ;

нижня частота складає 174,75 МГц, що на 0,25 МГц менше, а відносна помилка дорівнює

$$\delta f_{nm} = \frac{|f_{nm} - \hat{f}_{nm}|}{f_{nm}} = 0,00143;$$

верхня частота складає 185,2 МГц, що на 0,2 МГц більше, а відносна помилка дорівнює

$$\delta f_{em} = \frac{|f_{em} - \hat{f}_{em}|}{f_{em}} = 0,00108;$$

середня частота відповідно дорівнює 179,975 МГц, що на 0,025 МГц менше, а відносна помилка

дорівнює  $\delta f_m = \frac{|f_m - \hat{f}_m|}{f_m} = 0,00014$ .

**Висновки:**

1. У статті запропоновано варіант розв'язання задачі формування ШПС із заданими кореляційними властивостями шляхом використання розробленої методики моделювання.

2. Застосування розробленої методики під час проведення досліджень РТС методом математичного моделювання забезпечить можливість формування ШПС з заданими кореляційними властивостями,

необхідною потужністю, шириною та центральною частотою спектра, при цьому відносна помилка формування складає 0,051 (5,1 %).

3. На прикладі формування конкретного ШПС показано працездатність та варіант застосування розробленої методики.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. *Бакалов В.П.* Цифровое моделирование случайных процессов. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2002. – 88 с.: ил.
2. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы. – 2-е изд. – М.: Высш. шк., 1988. – 448 с.
3. *Богачев К.Ю.* Практикум на ЭВМ. – М.: Радиотехника, 1998. – 848 с.: ил.
4. *Вакин С.А., Шустов Л.Н.* Основы радиопротиводействия и радиотехнической разведки. – М.: Сов. радио., 1968. – 234 с.
5. *Куприянов А.И., Сахаров А.В.* Радиоэлектронные системы в информационном конфликте. – М.: Вузовская книга, 2003. – 528 с.: ил.
6. *Куприянов М.С., Матюшин Б.Д.* Цифровая обработка сигналов: процессоры, алгоритмы, средства проектирования. – СПб.: Политехника, 1998. – 592 с.
7. *Михайлов В.Ю.* Математические основы анализа и синтеза сложных сигналов и процедур их обработки. – М.: Из-во МАИ, 1994. – 208 с.
8. *Перунов Ю.М., Фомичев К.И., Юдин Л.М.* Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Под ред. Ю.М. Перунова. – М.: Радиотехника, 2003. – 416 с.: ил.
9. *Рабинер Л., Гоулд Б.* Теория и применение цифровой обработки сигналов / Пер. с англ. Под ред. Ю.Н. Александрова. – М.: Мир, 1978. – 648 с.: ил.
10. *Сверхбольшие интегральные и современная обработка сигналов / Пер. с англ. Под ред. С.Гуна, Х.Уайтхауса, Т.Кайлата.* – М.: Радио и связь, 1989. – 472 с.

БОЛОБАН Сергій Іванович – викладач Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- визначення (пеленгація) координат джерел радіовипромінювання;
- цифрова обробка радіосигналів;
- моделювання радіотехнічних засобів.

ВАГАПОВ Арслан Мінгазович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

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

КУБРАК Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, старший викладач, начальник служби РЕБ Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

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

КУРИЛЯК Юрій Ярославович – курсант Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- цифрові алгоритми формування радіосигналів.

Подано 27.01.2006

Болобан С.І., Вагапов А.М., Кубрак О.М., Куриляк Ю.Я. Методика моделювання шумоподібних сигналів за заданими кореляційними властивостями з використанням алгоритму Холецкого

Болобан С.И., Вагапов А.М., Кубрак А.Н., Куриляк Ю.Я. **Методика моделирования шумообразных сигналов по заданным корреляционным свойствам с использованием алгоритма Холецкого**

Boloban S.I., Vagapov A.M., Kubrak A.N., Kurilyak Y.Y. **Method of design of noisevid signals after the set cross-correlation properties with the use of algorithm of Holeyky**

УДК 621.396.96 : 519.852.6

**Методика моделирования шумообразных сигналов по заданным корреляционным свойствам с использованием алгоритма Холецкого / С.И. Болобан, А.М. Вагапов, А.Н. Кубрак, Ю.Я. Куриляк**

Предлагается методика моделирования шумообразного сигнала, с помощью которой можно сформировать сигнал с заданными корреляционными свойствами (корреляционной функцией) у которого основная спектральная плотность мощности будет сосредоточена в указанной полосе частот.

УДК 621.396.96 : 519.852.6

**Method of design of noisevid signals after the set cross-correlation properties with the use of algorithm of Holeyky / S.I. Boloban, A.M. Vagapov, A.N. Kubrak, Y.Y. Kurilyak**

The method of design of noisevid signal, by which it is possible to form a signal with the set cross-correlation properties (by a cross-correlation function) in which the basic spectral closeness of power will be concentrated in the indicated bar of frequencies, is offered.