

С. Ю. Стасев, С. С. Серов, В. В. Сапрунов

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

МЕТОД ПОБУДОВИ РІЗНИЦЕВИХ МНОЖИН ДЛЯ СИНТЕЗУ ДИСКРЕТНИХ СИГНАЛІВ З ЗАДАНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Запропоновано метод побудови різневих множин. Сформульовані необхідні та достатні умови існування сигналів з заданими кореляційними, ансамблевими та структурними властивостями. Показаний взаємозв'язок кореляційних та структурних властивостей дискретних сигналів. Отримані математичні вирази, та сформульовані необхідні й достатні умови існування n -рівневої функцією кореляції істотно спрощують процедури синтезу сигналів із заданими кореляційними властивостями. Вирішення проблеми підвищення завадозахищеності, імітостійкості й скритності пов'язане з використанням множин сигналів, що задовольняють вимогам. Кожен сигнал даного ансамблю легко відрізняється від зсунутої в часі копії, кожний з сигналів даного ансамблю легко відрізняється від будь якого іншого сигналу цієї множини. Розроблений алгоритм побудови різневих множин дозволяє синтезувати й досліджувати статистичні характеристики авто- і взаємкореляційних властивостей дискретних систем сигналів. Синтез і дослідження властивостей дискретних систем сигналів з n -рівневою функцією кореляції може здійснюватися в межах або тільки неінверсно й інверсно ізоморфних, або довільного поєднання тих та інших перетворень. При цьому забезпечується вибір будь-якої довільної тривалості сигналу.

Ключові слова: радіоелектронна протидія, система зв'язку, дискретні сигнали, ансамблеві сигнали, завадозахищеність, імітостійкість.

Вступ

Постановка проблеми у загальному вигляді. Забезпечення активного завадо- та імітозахисту телекомунікаційних систем від засобів радіоелектронної боротьби пов'язують з використанням складних дискретних сигналів з заданими кореляційними та ансамблевими характеристиками [1-3].

Питанню синтезу складних сигналів, що мають необхідні властивості, присвячений ряд робіт [4-6], в яких сформульоване завдання синтезу складних сигналів у загальному вигляді і розглянуті характерні особливості синтезу.

Відзначимо, що в теперішній час існують різні напрями синтезу дискретних сигналів. У [5-7] запропоновані процедури синтезу дискретних сигналів асимптотичними методами в спектральній області за періодичною функцією автокореляції, які дозволяють одержати непогані наближення до необхідних значень функції автокореляції. Проте ці методи дозволяють синтезувати окремі сигнали, які мають необхідні періодичні функції автокореляції при $p = 2$.

Крім того, синтезовані в [1, 2] сигнали мають східчасту структуру, що приводить до використання додаткової амплітудної модуляції.

Мета статті: Запропонувати метод побудови різневих множин. Сформульовані необхідні та достатні умови існування сигналів з заданими кореляційними, ансамблевими та структурними властивостями.

Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

У [1, 5, 6] досліджуються питання синтезу p -ічних сигналів у часовій області за аперіодичною функцією автокореляції на основі розв'язання системи рівнянь вигляду

$$\begin{cases} R_1 = S_1 S_n^* \\ R_2 = S_1 S_{n-1}^* + S_2 S_n^* \\ \dots\dots\dots \\ R_n = S_1 S_1^* + S_2 S_n^* + \dots + S_n S_n \end{cases} \quad (1)$$

де S – дискретне значення фази елемента сигналу; $*$ – символ комплексної спряженості, яка визначає компоненту аперіодичної функції автокореляції сигналу $S_i \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$.

У [5] розв'язання системи (1) зведене до простого перебору компонент, при якому R_e не перевищує заданого значення $R_{зад}$.

У [1] запропоновані методи синтезу дискретних сигналів за функцією невизначеності в спектральній області. Використання цих методів дозволяє одержати, як і у разі синтезу дискретних сигналів за періодичною функцією автокореляції, двійкові сигнали східчастої форми. Метод синтезу сигналів з необхідними спектральними властивостями, викладений в [1], дозволяє одержувати сигнали з малим рівнем “бокових складових” амплітудного спектра. Проте в [1] не розглядаються ансамблеві й авто- і взаємкореляційні властивості синтезованих сигналів.

У [2-4] синтезовані дискретні сигнали з кращими авто- і взаємкореляційними властивостями на основі розв'язання сукупності систем нелінійних нерівностей вигляду

$$\begin{cases} R_0^{ii} = S_1^i S_1^{i*} + S_2^i S_2^{i*} + \dots + S_n^i S_n^{i*} = N; \\ R_{1min}^{ii} \leq S_1^i S_2^{i*} + S_2^i S_3^{i*} + \dots + S_n^i S_1^{i*} \leq R_{1max}^{ii}; \\ \dots \\ R_{(n-1)min}^{ii} \leq S_1^i S_n^{i*} + S_2^i S_1^{i*} + \dots + S_n^i S_{n-1}^{i*} \leq R_{(n-1)max}^{ii} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} R_0^{ij} \leq S_1^i S_1^{j*} + S_2^i S_2^{j*} + \dots + S_n^i S_n^{j*} \leq R_{0\max}^{ij}; \\ R_{1\min}^{ij} \leq S_1^i S_2^{j*} + S_2^i S_3^{j*} + \dots + S_n^i S_1^{j*} \leq R_{1\max}^{ij}; \\ \dots \\ R_{(n-1)\min}^{ij} \leq S_1^i S_n^{j*} + S_2^i S_1^{j*} + \dots + S_n^i S_{n-1}^{j*} \leq R_{(n-1)\max}^{ij}, \end{cases} \quad (3)$$

де системи (2) та (3) визначають компоненти функцій авто- і взаємкореляції; $R_k^{ii\min}$ і $R_k^{ii\max}$ – мінімально і максимально допустимі рівні бокових пелюсток функції автокореляції i -го сигналу при зсуві на k елементів; $R_k^{ij\min}$ і $R_k^{ij\max}$ – мінімально і максимально допустимі рівні бокових пелюсток функції взаємної кореляції i -го та j -го сигналів, при зсуві j -го сигналу відносно i -го на k елементів, одержаних у результаті розв'язання системи нерівностей (2).

Запропоновані в [6, 7] процедури синтезу дискретних сигналів дозволяють на відміну від інших методів синтезу дискретних сигналів синтезувати не окремі сигнали, а ансамблі сигналів, які мають необхідні авто- і взаємкореляційні властивості. Проте запропоновані в [6, 7] методи синтезу фазоманіпульованих сигналів мають ряд недоліків:

- не всі сигнали, синтезовані в результаті розв'язання системи нерівностей (2), задовольняють розв'язання системи (3), що призводить до великих часових витрат синтезу ансамблю сигналів;
- розв'язання систем нерівностей (2) і (3) одержано лише для випадку $p = 2$;
- не можна заздалегідь визначити об'єм ансамблю сигналів.

Таким чином, до теперішнього часу не розроблені методи синтезу великих ансамблів сигналів слабо корельованих між собою дискретних сигналів. Нижче розробляються теоретичні основи синтезу складних дискретних сигналів із заданими кореляційними, ансамблевими й структурними властивостями. Формуються необхідні умови існування складних сигналів з n -рівневою функцією кореляції.

Визначимо необхідні умови існування сигналів з n -рівневою функцією кореляції. Нехай дискретна ПФАК p -го вектора $\{W\}$ набуває n значень $R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$, причому кожне R_i значення, $i = \overline{1, n}$, задане. Тоді розв'язання задачі синтезу сигналу, функція автокореляції набуває n значень, зводиться до розв'язання системи лінійних рівнянь[^]

$$\begin{cases} R_i(0) = \sum_{k=1}^L W_k W_{k+m}^*; \\ \dots \\ R_i(l) = \sum_{k=1}^L W_k W_{k+m}^*; \\ \dots \\ R_i(L) = \sum_{k=1}^L W_k W_{k+m}^*, \end{cases} \quad (4)$$

де L – кількість елементів у векторі $\{W\}$, $i = \overline{1, n}$; W_k – p -ті елементи вектора $\{W\}$.

Проведені до теперішнього часу дослідження [6] показують, що залежно від значень R_i , L система рівнянь вигляду (4) може мати або μ розв'язків, або взагалі не має розв'язків.

Припустимо, що система (4) має μ розв'язків. Тоді при розв'язанні задачі синтезу квазіортогональних сигналів система повинна задовольняти такі вимоги:

- система синтезованих сигналів повинна забезпечити можливість їх синтезу й обробки на основі алгоритмів швидких перетворень в області узгальнених перетворень;
- процедури синтезу, з погляду обчислювальної ефективності, повинні бути оптимальними;
- формувачі синтезованих сигналів повинні бути реалізовані з необхідною технічною точністю, у тому числі й з використанням мікропроцесорної техніки;
- алгоритми, методики й програми синтезу квазіортогональних систем сигналів повинні задовольняти будь-які значення p і L ;

– розподіл символів у кожному сигналі повинен задовольняти критерію псевдовипадковості.

Проведений аналіз можливих методів розв'язання системи вигляду (4) відносно W_k при заданих значеннях R_i , $i = \overline{1, n}$ і L показав, що синтез p -го вектора $\{W\}$ може бути реалізований методом ітераційного рандомізованого розв'язання сукупності нелінійних рівнянь за методом гілок і меж та повинен бути орієнтований на застосування електронно обчислювальної машини. Розглянемо обмеження, що накладаються на L і R_i при $p = 2$, тобто розглянемо необхідні умови існування двійкових фазоманіпульованих сигналів з n -рівневою функцією автокореляції. З цією метою введемо деякі нові параметри вектора $\{W\}$ і виразимо через них $R_i(m)$. Нехай λ_m – кількість добутоків вигляду (+1) (+1) для заданого m у виразі (8.4) при обчисленні ПФАК. Тоді кількість добутоків вигляду (+1) (-1) в (8.4) дорівнює $k - \lambda_m$, де k – кількість одиниць в сигналі, вигляду (+1) (+1) – $L - (k - \lambda_m)$, а кількість добутоків (-1) (-1) дорівнює $[N - 2(k - \lambda_m) - \lambda_m]$. Враховуючи, що добуток вигляду (1) · (1) = (-1) · (-1), за аналогією одержимо:

$$\begin{cases} R_1 = L - 4(k - \lambda_1); \\ R_2 = L - 4(k - \lambda_2); \\ \dots \\ R_n = L - 4(k - \lambda_n); \\ \lambda_1 n_1 + \lambda_2 n_2 + \dots + \lambda_n n_n = k(k-1); \\ n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_n = L - 1, \end{cases} \quad (5)$$

де R_i – i -й рівень бічної пелюстки ПФАК, причому значення R_i має місце n_i раз. Аналіз виразу (5) показує, що λ_i також набуватиме n_i різних значень. Визначимо величину k :

$$\lambda_n = \lambda_{n-1} + Z_{n-1}; \quad \lambda_{n-1} = \lambda_{n-2} + Z_{n-2}; \dots, \quad (6)$$

де Z_j – будь-яке ціле число:

$$\lambda_2 = \lambda_1 + Z_1; \quad \lambda_1 = (R_1 - L + 4k)/4; \quad (7)$$

$$n_1 = L - n_2 - n_3 - \dots - n_n - 1; \quad (8)$$

$$n_3 = n_2 + y_2; \dots; \quad n_n = n_{n-1} + y_{n-1}, \quad (9)$$

де y_i – будь-яке ціле число.

Розв'язуючи систему (5) відносно k , одержимо:

$$\begin{aligned} & \frac{R_1 - L + 4k}{4} [L - (n-2)n_2 - (y_2 + \dots + y_{n-1}) - 1] + \\ & + \left(\frac{R_1 - L + 4k}{4} + Z_1 \right) n_2 + \left(\frac{R_1 - L + 4k}{4} + Z_1 + Z_2 \right) \times \\ & \times (n_2 + y_2) + \dots + \left(\frac{R_1 - L + 4k}{4} + Z_1 + Z_2 + \dots + Z_m \right) \times \\ & \times [(m-1)n + (y_2 + y_3 + \dots + y_{m-1})] + \dots \\ & + \left(\frac{R_1 - L + 4k}{4} + Z_1 + Z_2 + \dots + Z_{n-1} \right) \times \\ & \times [(n-1)n_n + (y_2 + y_3 + \dots + y_{n-1})] - k^2 + k = 0. \quad (10) \end{aligned}$$

Після перетворень одержимо

$$\begin{aligned} & L + [L(R_1 + 1) - R_1 + 4Z_1n_1 + 4(n_2 + y_2)(Z_1 + Z_2) + \dots \\ & + 4[(n-1)n_2 + (y_2 + \dots + y_{n-1})] \times \\ & \times (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_{n-1})]^{1/2} = 2k. \quad (11) \end{aligned}$$

Вираз (11) визначає необхідні умови існування сигналів з n -рівневою ФК.

Як впливає з умови задачі, k повинне бути натуральним числом, отже, вираз у квадратних дужках у (11) повинен бути також натуральним числом Q , таким, за якого Q задовольняє умову $Q = \alpha \pmod{2}$. Тому

$$\begin{aligned} & \{L(R_1 + 1) - R_1 + 4Z_1n_1 + 4(n_2 + y_2)(Z_1 + Z_2) + \dots \\ & + 4[(n-1)n_2 + (y_2 + \dots + y_{n-1})] \times \\ & \times (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_{n-1})\} = Q. \quad (12) \end{aligned}$$

Вважаючи $L = 4x + \alpha$ і розв'язуючи (12) відносно n_2 , одержимо

$$\begin{aligned} n_2 = & \frac{1}{4[(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}]} \times \\ & \times \{-R_1 + 4[(n-1)y_2 + (n-2)y_3 + \dots + y_{n-1}]\} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times [(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] + \\ & + 4R_1x - R_1\alpha - 4x - \alpha + Q^2 \}. \quad (13) \end{aligned}$$

Значення n повинні бути цілими. Вважаючи, що $n_2 = n_3 = n_4 = \dots = n_n$, $\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \dots = \lambda_n$ для випадку рівномірної появи значень R_i функції кореляції та відповідає вимозі псевдовипадковості появи R_i , значення функції кореляції

$$n_2 = \frac{4}{4Z_1} [-R_1 + 4(R_1 + 1)x - \alpha(R_1 + 1) + Q^2].$$

Для знаходження решти значень n скористаємося виразами (8) і (9). При цьому зауважимо, що аналіз відомих систем сигналів показав, що найсприятливіший випадок синтезу квазіортогональних систем сигналів, з погляду отримання сигналів з хорошими кореляційними і структурними властивостями, є випадок рівних значень n_i . У загальному вигляді n_i дорівнює:

$$\begin{aligned} n_i = & \frac{1}{4[(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}]} \times \\ & \{-R_1 + 4[(n-1)y_2 + (n-2)y_3 + \dots + y_{n-1}]\} \times \\ & \times [(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] + 4R_1x - \\ & - R_1\alpha - 4x - \alpha + Q^2 \} + \sum_{k=2}^{i-1} y_k. \end{aligned}$$

Враховуючи (14) і те, що n_i набувають цілих позитивних значень, визначимо область допустимих значень:

$$\begin{aligned} & R_1 - 4[(n-1)y_2 + (n-2)y_3 + \dots + y_{n-1}] \times \\ & \times [(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] - 4R_1x + \\ & + R_1\alpha + 4x + \alpha - \sum_{k=2}^{n-1} y_k \left/ \left\{ 4[(n-1)Z_1 + \dots + Z_{n-1}] \right\} \right. < Q \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & R_1 - 4[(n-1)y_2 + (n-2)y_3 + \dots + y_{n-1}] \times \\ & \times [(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] - 4R_1x + \\ & + R_1\alpha + 4x + \alpha - \sum_{k=2}^{n-1} y_k \left/ \left\{ 4[(n-1)Z_1 + Z_{n-1}] \right\} \right. < Q; \\ & 4(4x + \alpha)[(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] - \\ & - 4[(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] - \\ & - R_1 + 4[(n-1)y_2 + (n-2)y_3 + \dots + y_{n-1}] \times \\ & \times [(n-1)Z_1 + (n-2)Z_2 + \dots + Z_{n-1}] + 4R_1x - \\ & - R_1\alpha - 4x - \alpha < Q. \quad (15) \end{aligned}$$

Якщо тепер визначити значення, то вираз (15) дозволяє знайти необхідні умови існування сигналів із заданими властивостями. Необхідні умови доста-

тньо ефективно звужують множини сигналів Z_i , які можуть мати n -рівневу функцію автокореляції із заданими значеннями R_i .

Достатні умови існування сигналів з n -рівневою ПФАК полягають в тому, щоб існувала різнева множина, збалансована на n -рівнів. У ході досліджень були розроблені методики побудови різних множин, збалансованих на n -рівнів.

Висновки і напрями подальших досліджень

Вирішення проблеми підвищення завадозахищеності, імітостійкості й скритності пов'язане з використанням множин сигналів, що задовольняють щонайменше дві вимоги:

– кожен сигнал даного ансамблю легко відрізняється від зсунутої в часі копії;

– кожен з сигналів даного ансамблю легко відрізняється від будь-якого іншого сигналу цієї множини.

Необхідні й достатні умови існування сигналів з n -рівневою функцією кореляції істотно спрощують процедури синтезу сигналів із заданими кореляційними властивостями.

Розроблений алгоритм побудови різних множин дозволяє синтезувати й досліджувати статистичні характеристики авто - і взаємокореляційних властивостей дискретних систем сигналів. Синтез і дослідження властивостей дискретних систем сигналів з n -рівневою функцією кореляції може здійснюватися в межах або тільки неінверсно й інверсно ізоморфних, або довільного поєднання тих та інших перетворень. При цьому забезпечується вибір будь-якої довільної тривалості сигналу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Varakin L.E. Signals systems theory.- М.:Sov. Radio,1985.-304 p.(in Russian).
2. Stasev Y., Kuznetsov A., Sai V., Karpenko O. Discrete signals with Multi-Level Correlation Function // Statistical Methods of Signal and Data Processing (SMSDP-2010): Proceedings.- Kiev: NAU-Druk Publishing House-2010. – pp.176-179.
3. Niederreiter. H. Knapsack-Type Cryptosystems and Algebraic Coding Theory // PCIT.- 1986.- V.15. – P.19-34.
4. Sverdlik M.B. Optimal discrete signals.-М.:Sov.radio,1975.-200 p.(in Russian).
5. Prentice-Hall Signal Processing Series - Oppenheim A.V., Schaffer R.W. - Discrete-Time Signal Processing, 3rd Edition.Pearson //-2010. 1137 p.
6. Jean-Guillaume Dumas/ Foundations of Coding: Compression, Encryption, Error Correction Wiley, 2015. 376 p.
7. T.Eng and L.B. Milstein, "Coherent DS-CDMA perfomance in Nakagami multipath fading," IEEE Trans. Commun., Vol.43, No.1. pp 1134-1143,1995.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В. В. Бараннік,

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

Received (Надійшла) 12.03.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.05.2018

Метод построения разностных множеств для синтеза дискретных сигналов с заданными свойствами

С. Ю. Стасев, С. С. Серов, В. В. Сапрунов

Предложен метод построения разностных множеств. Сформулированы необходимые и достаточные условия существования сигналов с заданными корреляционными, ансамблевыми и структурными свойствами. Показана взаимосвязь корреляционных и структурных свойств дискретных сигналов. Полученные математические выражения, и сформулированы необходимые и достаточные условия существования n -уровневой функции корреляции существенно упрощают процедуры синтеза сигналов с заданными корреляционными свойствами. Решение проблемы повышения помехозащищенности, имитостойкости и скритности связано с использованием множеств сигналов, удовлетворяющих требованиям. Каждый сигнал данного ансамбля легко отличается от сдвинутой во времени копии, каждый из сигналов данного ансамбля легко отличается от любого другого сигнала этого множества. Разработанный алгоритм построения разностных множеств позволяет синтезировать и исследовать статистические характеристики авто - и взаимокорреляционных свойств дискретных систем сигналов. Синтез и исследование свойств дискретных систем сигналов с n -уровневой функцией корреляции может осуществляться в пределах или только неинверсной и инверсной изоморфных или произвольного сочетания тех и других преобразований. При этом обеспечивается выбор любой произвольной длительности сигнала.

Ключевые слова: радиоэлектронная противодействие, система связи, дискретные сигналы, ансамблевые сигналы, помехозащищенность, имитостойкость.

Method of construction of different multiples for synthesis of discrete signals with proposed properties

S. Stasev, S. Serov, V. Saprunov

The method of construction of different sets is proposed. The necessary and sufficient conditions for the existence of signals with predetermined correlation and structural properties were formulated. The correlation and structural properties of discrete signals were shown. The mathematical expressions were obtained, and formulated the necessary and sufficient conditions for the existence of the n -level correlation function significantly simplify of the procedures for synthesizing signals with the given correlation properties. Solution the problem of increasing noise immunity, imitative stability and secrecy was associated with the use these sets of signals, which satisfy the requirements. Each signal of this ensemble is easy distinguish from a shifted copy in time, each of the signals of this ensemble is easily different from any other signal of this set. The developed algorithm of construction of different sets allows to synthesize and investigate the statistical characteristics of auto - and inter - correlation properties of discrete signal systems. Synthesis and investigation of the properties of discrete signal systems with n -level correlation function can be carried out within or only non-inverse and inverse isomorphic, or arbitrary combination of those and other transformations. In this case, the choice of any arbitrary duration of the signal is provided.

Keywords: electronic countermeasures, communication system, discrete signals, ensemble signals, noise immunity.