

## АНАЛИЗ СВОЙСТВ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

к.т.н. В.Н. Харченко, к.т.н. М.Ю. Яковлев, В.П. Лысечко  
(представил д.т.н., проф. Ю.В. Стасев)

*В статье приведен статистический анализ корреляционных и энергетических свойств сложных сигналов, полученных путем полосовой фильтрации спектров последовательностей коротких видеоимпульсов с минимальным энергетическим взаимодействием. Разработаны рекомендации по выбору оптимальной ширины полосы фильтрации.*

**Постановка проблемы.** Применение сложных сигналов с улучшенными взаимокорреляционными свойствами, полученных на основе полосовой фильтрации спектров псевдослучайных последовательностей (псп) коротких видеоимпульсов с минимальным энергетическим взаимодействием (мэв) [1] в системах радиосвязи множественного доступа дает возможность значительно снизить уровень внутрисистемных помех. Это достигается за счет уменьшения значений боковых лепестков взаимокорреляционных функций (ВКФ) сигналов, полученных на основе полосовой фильтрации псп коротких видеоимпульсов с минимальным энергетическим взаимодействием. Однако существует проблема выбора такой ширины полосы фильтрации, чтобы одновременно удовлетворялись требования по минимизации уровней максимальных выбросов боковых лепестков ВКФ и пик-факторов синтезируемых сигналов.

**Анализ литературы.** В литературе широко рассмотрены статистические характеристики корреляционных свойств различных типов сложных сигналов – фазоманипулированных, дискретных частотных и т.д. [2 – 8], однако корреляционные свойства сигналов, полученных путем полосовой фильтрации спектров последовательностей коротких видеоимпульсов с минимальным энергетическим взаимодействием [1], требуют более детального изучения.

**Цель статьи.** Целью статьи является проведение анализа статистических характеристик ВКФ сложных сигналов, образованных путем полосовой фильтрации спектров псп коротких видеоимпульсов с минимальным энергетическим взаимодействием и разработки рекомендаций по их использованию для синтеза сигналов с улучшенными взаимокорреляционными свойствами на основе псп коротких видеоимпульсов с минимальным энергетическим взаимодействием.

**Основной материал.** Уровень максимальных выбросов боковых лепестков ВКФ двух сигналов одинаковой длительности не должен превышать значения [2]:

$$\max R \leq \alpha / \sqrt{B}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, равный 1, 2 ... 5; – база сигнала, равная произведению ширины спектра сигнала  $\Delta F$  на его длительность  $T$ , т.е.

$$B = \Delta F \cdot T.$$

Увеличивая значение базы сигнала (ширину спектра) при неизменной скорости передачи информации (длительности сигнала), можно достичь требуемого значения уровней максимальных выбросов боковых лепестков ВКФ, однако, при этом, как показали исследования, проведенные в [9], увеличивается значение пик-фактора сигналов до уровня, при котором их передача становится неэффективной:

$$\Pi_i = P_{\max} / P_{\text{ср}} \gg 1,$$

где  $P_{\max}$  и  $P_{\text{ср}}$  – максимальная и средняя мощности  $i$ -го сигнала соответственно;  $i = 1 \dots n$ ;  $n$  – количество сигналов в ансамбле, т.е. необходимо решить задачу выбора такой полосы фильтрации  $\Delta F$  последовательностей с минимальным энергетическим взаимодействием, при которой удовлетворялись бы требования:

$$\begin{cases} \max R_k(\Delta F) \rightarrow 0; \\ \Pi_i(\Delta F) \rightarrow 1, \end{cases}$$

где  $k$  – порядковый номер ВКФ,  $k = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  – количество пар взаимодействующих сигналов.

Знание статистических характеристик корреляционных и энергетических свойств позволит значительно упростить данную задачу.

Для оценки статистических характеристик корреляционных и энергетических свойств сложных сигналов, полученных с помощью полосовой фильтрации спектров последовательностей коротких импульсов с минимальным энергетическим взаимодействием, воспользуемся методикой оценки статистических характеристик случайных величин, изложенной в [10], которая предполагает следующие этапы.

1. Расчет математического ожидания (МО) максимальных выбросов боковых лепестков ВКФ сигналов  $m_{\max R}(\Delta F)$  и МО пик-фактора каждого сигнала  $m_{\Pi}(\Delta F)$  из ансамбля при изменении значений ширины полосы фильтрации последовательностей коротких видеоимпульсов с минимальным энергетическим взаимодействием [10]:

$$m_{\max R}(\Delta F) = \sum_{k=1}^N \max |R_k(\Delta F)| / N, \quad (2)$$

где  $N$  – количество пар взаимодействующих сигналов;  $k$  – порядковый

номер ВКФ;  $\max|R_k(\Delta F)|$  – модуль значений максимальных выбросов боковых лепестков взаимокорреляционных функций (ВКФ) сигналов в зависимости от ширины спектра сигналов ( $\Delta F = 2, 4, \dots, 20\%$  от общей ширины спектра исходных последовательностей) [10]:

$$m_{\Pi}(\Delta F) = \sum_{i=1}^n \Pi_i(\Delta F) / n, \quad (3)$$

$n$  – количество сигналов в ансамбле;  $\Pi_i(\Delta F)$  – пик-фактор сигналов в зависимости от ширины их спектра сигналов ( $\Delta F = 2, 4, \dots, 20\%$  от общей ширины спектра исходных последовательностей) и номера сигнала  $i = 1, 2, \dots, n$ .

2. Расчет средних квадратичных отклонений (СКО) максимальных выбросов боковых лепестков функций взаимной корреляции  $\sigma_{\max R}(\Delta F)$  а также пик-фактора  $\sigma_{\Pi}(\Delta F)$  сигналов относительно их математических ожиданий [10]

$$\sigma_{\max R}(\Delta F) = \sqrt{\sum_{k=1}^N (\max|R_k(\Delta F)| - m_{\max R}(\Delta F))^2 / N}; \quad (4)$$

$$\sigma_{\Pi}(\Delta F) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Pi_i(\Delta F) - m_{\Pi}(\Delta F))^2 / n}. \quad (5)$$

3. Расчет асимметрий распределения максимальных выбросов боковых лепестков функций взаимной корреляции  $S_{\max R}(\Delta F)$  и пик-фактора  $S_{\Pi}(\Delta F)$  сигналов в зависимости от ширины их спектров [10]

$$S_{\max R}(\Delta F) = \sum_{k=1}^N (\max|R_k(\Delta F)| - m_{\max R}(\Delta F))^3 / (N \cdot (\sigma_{\max R}(\Delta F))^3); \quad (6)$$

$$S_{\Pi}(\Delta F) = \sum_{i=1}^n (\Pi_i(\Delta F) - m_{\Pi}(\Delta F))^3 / (n(\sigma_{\Pi}(\Delta F))^3). \quad (7)$$

4. Расчет эксцесса распределения максимальных выбросов боковых лепестков функций взаимной корреляции  $E_{\max R}(\Delta F)$  и пик-фактора  $E_{\Pi}(\Delta F)$  сигналов в зависимости от ширины полосы фильтрации сигналов [10]

$$E_{\max R}(\Delta F) = \sum_{k=1}^N (\max|R_k(\Delta F)| - m_{\max R}(\Delta F))^4 / (N \cdot (\sigma_{\max R}(\Delta F))^4) - 3; \quad (8)$$

$$E_{\Pi}(\Delta F) = \sum_{i=1}^n (\Pi_i(\Delta F) - m_{\Pi}(\Delta F))^4 / (n(\sigma_{\Pi}(\Delta F))^4) - 3. \quad (9)$$

Согласно формул (2 – 9) был проведен расчет статистических характеристик максимальных выбросов боковых лепестков ВКФ и пик-факторов сигналов длительностью сигнала  $T = 835$  мкс, образованных из участков спектров 50-ти последовательностей коротких видеоимпульсов

с минимальным энергетическим взаимодействием, синтезированных согласно алгоритма [1], при полосе фильтрации от 2% до 20% от исходной ширины спектра псп с мэв. Вычисления проводились в среде математического программирования Matlab. Результаты расчетов статистических характеристик значений максимальных выбросов ВКФ и пик-фактора сигналов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов статистических характеристик

	$\Delta F, \%$									
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$m_{\max R}(\Delta F)$	0,26	0,205	0,177	0,159	0,147	0,137	0,129	0,122	0,116	0,1115
$\sigma_{\max R}(\Delta F)$	0,066	0,041	0,030	0,025	0,021	0,019	0,017	0,016	0,015	0,0138
$S_{\max R}(\Delta F)$	1,021	0,802	0,582	0,365	0,383	0,493	0,59	0,646	0,675	0,7246
$E_{\max R}(\Delta F)$	3,106	2,754	2,045	1,109	1,193	1,357	1,461	1,495	1,561	1,6695
$m_{\Pi}(\Delta F)$	5,471	4,175	3,778	3,865	4,498	5,469	5,973	6,161	6,546	7,3714
$\sigma_{\Pi}(\Delta F)$	1,317	0,932	0,519	0,337	0,617	0,616	0,585	0,639	0,691	0,8367
$S_{\Pi}(\Delta F)$	0,891	0,650	0,121	-0,13	0,099	0,063	0,164	0,379	0,226	0,3061
$E_{\Pi}(\Delta F)$	-0,51	-0,34	-0,72	-0,98	-1,19	-1,401	-1,28	-1,06	-1,11	-1,149

На рис. 1, 2 представлены графики в зависимости полученных значений от ширины полосы пропускания полосовых фильтров.

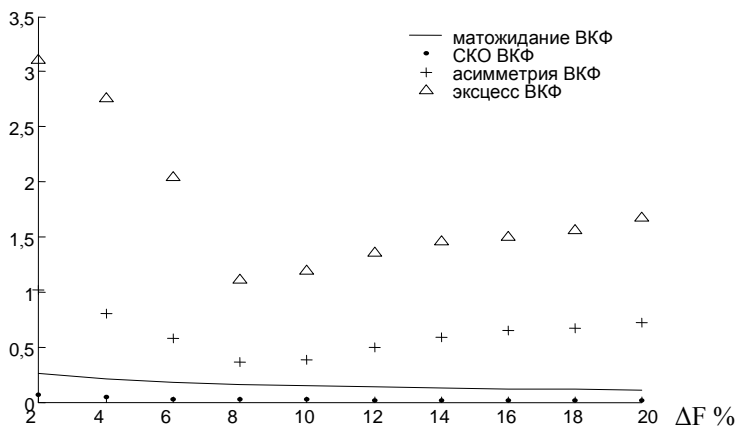


Рис. 1. Зависимости статистических характеристик максимальных выбросов боковых лепестков ВКФ от ширины спектров сигналов

Графики зависимостей значений максимальных выбросов, в зависимости от базы сигнала, при значениях  $\alpha = 1, 2, 3, 4$  [3] приведены на рис. 3.

Из рис. 1 – 3 видно, что в общем случае математическое ожидание максимальных выбросов боковых лепестков ВКФ не превышает значения  $3/\sqrt{B}$ , а при ширине полосы фильтрации до 15% от общей полосы последо-

вательностей,  $-2/\sqrt{B}$ . МО пик-фактора сигналов, полученных путем полосовой фильтрации псп с мэв, при ширине их спектра, равной 6% от ширины спектра последовательностей приблизительно равно 4, что является удовлетворительным для систем радиосвязи с непрерывными сигналами.

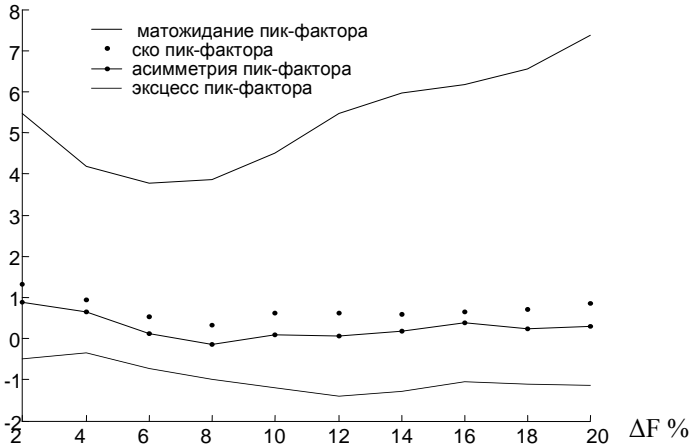


Рис. 2. Зависимость статистических характеристик пик-фактора сигналов от ширины их спектра

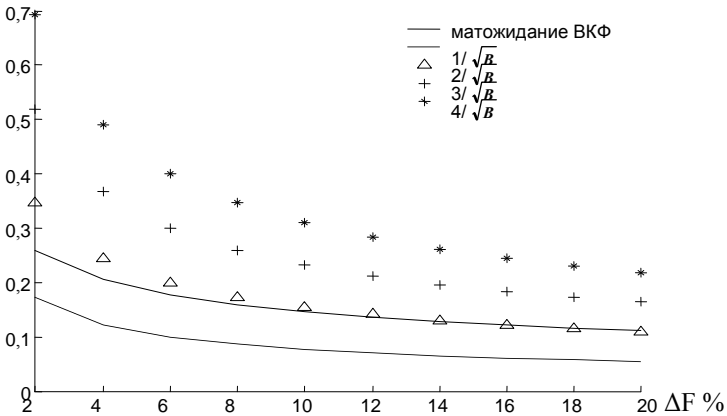


Рис. 3. Математическое ожидание максимальных выбросов боковых лепестков ВКФ при изменении ширины спектров сигналов

Это значит, что оптимальной полосой пропускания фильтров, при заданных ограничениях, будет полоса, приблизительно равная 6% от общей ширины спектров последовательностей. Таким образом, для получения ансамбля сигналов, удовлетворяющих требованиям по уровням

максимальных выбросов ВКФ и значениям пик-фактора сигналов, необходимо использовать полосовые фильтры с полосой фильтрации, определяемой с помощью приведенной методики.

**Выводы.** В статье приведен анализ статистических характеристик сигналов с улучшенными корреляционными свойствами, полученных путем полосовой фильтрации псевдослучайных последовательностей с минимальным энергетическим взаимодействием.

Проведенные исследования статистических свойств сигналов на основе полосовой фильтрации псп с минимальным энергетическим взаимодействием позволяет упростить синтез ансамблей таких сигналов.

Предложенные рекомендации позволяют оптимизировать процесс выбора ширины полосы фильтрации последовательностей с минимальным энергетическим взаимодействием при синтезе сигналов с улучшенными корреляционными свойствами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лысечко В.П., Харченко В.Н. Метод борьбы с внутрисистемными радиопомехами // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вып. 2. – С. 232 – 237.
2. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
3. Защита от радиопомех / Под ред. М.В. Максимова. – М.: Сов. радио, 1999. – 496 с.
4. Скляр Б.. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
5. Пышкин И.М. Теория кодового разделения сигналов. – М.: Связь, 1980. – 208 с.
6. Статистическая радиотехника: примеры и задачи / Под ред. В.И. Тихонова. – М.: Сов. радио, – 1980. – 544 с.
7. Петрович Н.Т., Размахнин М.К. Системы связи с шумоподобным и сигналами. – М.: Сов. радио, 1969. – 232 с.
8. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами / Под ред. Г.И. Тузова. – М.: Радио и связь, 1985. – 284 с.
9. Лысечко В.П. Метод определения параметров сложных сигналов // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вып. 7 (35). – С. 131 – 136.
10. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Госиздат, 1958. – 464 с.

Поступила 8.09.2004

**ХАРЧЕНКО Виктор Николаевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры ХУ ВС. В 1972 году окончил ХВВКИУ. Области научных интересов – системы спутниковой, радиорелейной и тропосферной связи, применение сложных сигналов в системах радиосвязи множественного доступа с кодовым разделением каналов.

**ЯКОВЛЕВ Максим Юрьевич**, ст. преподаватель кафедры ХУ ВС. В 1998 году окончил ХВУ. Область научных интересов – статистические исследования радиотехнических систем.

**ЛЫСЕЧКО Владимир Петрович**, адъюнкт ХУ ПС. В 1998 году окончил КВНУС. Область научных интересов – применение сложных сигналов в системах радиосвязи множественного доступа с кодовым разделением каналов.