

ВЛИЯНИЕ МНОГОТОНАЛЬНОЙ ПОМЕХИ НА ПОИСК ПСЕВДОСЛУЧАЙНОГО СИГНАЛА И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕЖЕКЦИИ ЗА СЧЁТ ВЗВЕШИВАНИЯ СОВРЕМЕННЫМИ МОДИФИКАЦИЯМИ ФУНКЦИЙ ДОЛЬФА-ЧЕБЫШЕВА

*Кузьмин Е. В., к.т.н., доц., доцент кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,
e-mail: ekuzmin@sfu-kras.ru, kuzminev@mail.ru*

INFLUENCE OF MULTITONE CONTINUOUS WAVE INTERFERENCE ON THE PSEUDO-RANDOM SIGNAL SEARCHING AND INCREASING THE EFFICIENCY OF THE NOTCH BY WEIGHTING WITH DOLPH-CHEBYSHEV FUNCTIONS MODERN MODIFICATIONS

Kuzmin E. V.

The influence of multitone continuous wave interference (MCWI) on the correct searching probability for a phase shift keyed pseudo-random signal (PSK-PRS) has been studied. Deterministic and chaotic scenarios of frequency localization of MCWI, as well as different compositions of MCWI, are considered. The decrease in the capabilities of the Fourier procedure for searching for PSK-PRS is assessed when varying the power of the MCWI, increasing the number of its interference components from 2 to 25, and changing the spectral "extent" of the presence of components. Statistical modeling was used to obtain families of probabilistic dependencies characterizing the effectiveness of the search for PSK-PRS under observation conditions against the background of MCWI in the absence and presence of rejection measures. Quantitative estimates are given and a significant increase in the efficiency of the aggregate processing of PSK-PRS based on the Fourier search procedure with preliminary rejection using weighting of the samples of the signal and interference mixture based on modern modifications of the Dolph-Chebyshev functions is shown.

Key words: multitone continuous wave interference, pseudo-random signal, interference rejection, correct searching probability, weight function, Fourier procedure.

Ключевые слова: многотональная помеха, псевдослучайный сигнал, режекция помехи, вероятность правильного поиска сигнала, весовая функция, Фурье-процедура.

Введение

Одним из видов помеховых воздействий является многотональная помеха (МП), образующаяся суммой гармонических помех (ГП) или узкополосных помех, действующих в полосе частот полезного сигнала [1-4]. Независимо проведённые исследования показывают, что даже одна ГП способна негативно воздействовать на качество обработки псевдослучайных сигналов (ПСС) [5-8]. В частности, показано, что влияние ГП на Фурье-процедуру поиска фазоманипулированного (ФМ) ПСС, в зависимости от параметров, может быть как слабозаметным, так и весьма существенным [7; 8]. Аналогичные результаты по исследованию влияния многотональной помехи на Фурье-процедуру поиска ФМ-ПСС отсутствуют. Однако вопрос о таком влиянии при изменении состава МП (различного числа ГП, её образующих), рассмотрении разных сценариев¹ частотной локализации и протяжённости «присутствия» помеховых компонентов, интересен в научно-техническом и научно-методическом плане. Кроме того, с учётом новых результатов по борь-

Исследовано влияние многотональной помехи (МП) на вероятность правильного выполнения поиска фазоманипулированного псевдослучайного сигнала (ФМ-ПСС). Рассмотрены детерминированные и хаотические сценарии частотной локализации МП, а также различный состав МП. Оценено снижение возможностей Фурье-процедуры поиска ФМ-ПСС при варьировании мощностью МП, увеличении количества её помеховых компонентов от 2 до 25 и изменении спектральной «протяжённости» присутствия компонентов. Статистическим моделированием получены семейства вероятностных зависимостей, характеризующих эффективность поиска ФМ-ПСС в условиях наблюдения на фоне МП при отсутствии и наличии мер режекции. Даны количественные оценки и показано существенное повышение эффективности совокупной обработки ФМ-ПСС на основе Фурье-процедуры поиска с предварительной режекцией, использующей взвешивание реализаций смеси сигнала и помехи современными модификациями функций Дольфа-Чебышева.

бе с ГП за счёт режекции при обоснованном выборе весовой функции (ВФ) предварительного взвешивания, логичным продолжением является аналогичная борьба с МП и рассмотрение современных модификаций ВФ. В [3; 9] предпочтение отдаётся ВФ Парзена, в [10; 11] показано, что преимуществами обладает кубическая вариация ВФ Хеннинга, при этом класс весьма эффективных ВФ Дольфа-Чебышева (ДЧ) для задачи режекции ГП и МП не был рассмотрен. К проведению такого рассмотрения и соответствующих исследований дополнительно мотивирует наличие современных модификаций данных ВФ – Кравченко-ДЧ [12] и ДЧ-Дворковича [13].

¹ Детерминированных и хаотических.

Цель статьи – оценка влияния состава многокомпонентной помехи и сценария частотной локализации её компонентов на качество поиска фазоманипулированного псевдослучайного сигнала и повышение эффективности режекции многокомпонентной помехи за счёт применения некоторых модификаций современных весовых функций.

Модель наблюдений, Фурье-процедура поиска ПСС и алгоритм режекции МП

Пусть на входе обработки на временном интервале периода повторения псевдослучайной последовательности (ПСП) $t \in [0, T_c]$ доступны дискретные равноотстоящие через T отсчёты аддитивной смеси $x_\Sigma(nT)$ фазоманипулированного ПСС $s_{\text{псс}}(nT)$, многокомпонентной помехи $\sum_k m_k(nT)$ и шума $\xi(nT)$ со спектральной плотностью мощности N_0 (дисперсией $\sigma^2 = N_0/2T$):

$$\begin{aligned} x_\Sigma(nT) &= s_{\text{псс}}(nT) + \sum_{k=1}^{N_m} m_k(nT) + \xi(nT, \sigma^2), \\ s_{\text{псс}}(nT) &= A_s a(nT) \cos(2\pi f_s nT + \varphi_s), \\ a(nT) &= \sum_{i=0}^{N_g-1} g_i \text{rect}(nT - iT_c/N_g), \\ m_k(nT) &= A_{mk} \cos(2\pi f_{mk} nT + \varphi_{mk}). \end{aligned} \quad (1)$$

В выражении (1) использованы следующие обозначения: N_m – число ГП, образующих МП; $a(nT)$ – отсчёты видеосигнала, порождаемого символами $g_i = \{\pm 1\}$ ПСП длины N_g , образуемого гестимпульсами; $n = 0, 1, \dots, K-1$ – номера отсчётов; $K = T_c/T$ – число отсчётов; символы A , f и φ , используемые с буквенными индексами, соответственно означают амплитуду, частоту и начальную фазу колебаний ПСС (s) и МП (m).

Поиск по задержке² ФМ-ПСС $s_{\text{псс}}(nT)$, наблюдающегося в аддитивной смеси (1), производится на основе Фурье-процедуры, основанной на прямом и обратном дискретном (быстром) преобразовании Фурье (ДПФ, ОДПФ), применяемой для получения сигнального «всплеска» Z и определения на основе положения его максимума оценки времени запаздывания сигнала [3; 8]:

$$Z = |F^{-1}[F[x_\Sigma(nT) \cos(2\pi f_s nT) + j x_\Sigma(nT) \sin(2\pi f_s nT)] \cdot F^*[a_{\text{он}}(nT)]]|. \quad (2)$$

В выражении (2) и далее применены обозначения $F[\cdot]$ и $F^{-1}[\cdot]$ – операторы ДПФ и ОДПФ соответственно; символ звёздочка означает комплексное сопряжение; $a_{\text{он}}(nT)$ – отсчёты несмещённого опорного видеосигнала ПСП; $|\cdot|$ – операция взятие модуля; символом $j = \sqrt{-1}$ обозначена мнимая единица.

Применяемый алгоритм режекции МП, эффективность которого зависит от вида ВФ, предполагает переход в частотную область, поэлементное подавление $X_\Sigma[\cdot \cdot 00 \cdot \cdot]$ ограниченного количества максимальных

частотных выборок в спектре X_Σ взвешенной реализации аддитивной смеси (1) и возвращение к временной реализации [3]:

$$\begin{aligned} X_\Sigma &= F[x_\Sigma(nT)w(nT)], \\ \tilde{X}_\Sigma &= X_\Sigma[\cdot \cdot 00 \cdot \cdot], \\ \tilde{x}_\Sigma(nT) &= F^{-1}[\tilde{X}_\Sigma], \end{aligned} \quad (3)$$

где $w(nT)$ – коэффициенты ВФ предварительного взвешивания. Обработанная реализация $\tilde{x}_\Sigma(nT)$ (3), с существенно ослабленными компонентами МП, используется в (2) для решения целевой задачи³ цифровой обработки сигналов.

Результаты моделирования

На рис. 1 представлены результаты статистического моделирования, полученные при проведении 10^5 независимых испытаний, предполагающих обновление реализаций дискретизированного гауссовского шума, внесение случайной⁴ задержки фазоманипулированного ПСС и случайной начальной фазы помеховых компонентов. Энергетический потенциал $q_{\text{эп}} = 10 \lg(0,5 A_s^2/N_0) = 45$ дБГц. Корреляционная обработка (2) смеси (1) ШПС, помехи ($1 \leq N_m \leq 25$) и шума выполнялась на интервале длительности периода ПСП. Объём выборки за период ПСП $K = 4096$, длина ПСП $N_g = 511$. Показаны три группы семейств зависимостей вероятностей правильного выполнения поиска $P(q_{\text{пс}})$ по задержке от отношения «помеха/сигнал» $q_{\text{пс}}$. Шаг изменения аргумента $\Delta q_{\text{пс}} = 1$ дБ. При проведении моделирования применялись неоднократно ранее опробованные методика моделирования и способ получения выходного эффекта Фурье-процедуры поиска ПСС [7; 8; 10; 11]. Нумерация групп семейств на рис. 1 означает принадлежность к применённому сценарию частотной локализации помеховых компонентов: 1 – хаотические (случайные) частоты в спектральном интервале главного лепестка (ГЛ) спектра сигнала и граничащих с ним первых боковых лепестков (БЛ); 2 и 3 – соответственно хаотические и фиксированные частоты в спектральном интервале ГЛ. В группах семейств 1–3 по семь кривых, каждая из которых соответствует определённому количеству N_m воздействующих помеховых компонентов. При значениях $P(q_{\text{пс}}) < 0,9$ очередность расположения кривых, обсуждаемая далее, является ожидаемой: правые зависимости в группах соответствуют случаям $N_m = 1$, а левые – $N_m = 25$, при этом между ними находятся зависимости, соответствующие $N_m = 2-5, 10$. В табл. 1 даны некоторые частные количественные оценки эффективности

³ В данном случае это поиск ПСС по задержке, но целевая задача приведена для примера, который никак не ограничивает область применения результата фильтрации (3).

⁴ Здесь и далее при указании на случайный (хаотический) характер параметра (задержка, начальная фаза, частота) предполагается равномерный закон распределения.

² Частота сигнала при данном рассмотрении полагается известной.

Фурье-процедуры поиска ПСС при воздействии различного числа $N_{\text{гн}} \geq 1$ помеховых компонентов. При отрицковке зависимостей (рис. 1) и их вычислительной обработке (табл. 1) применялась интерполяция.

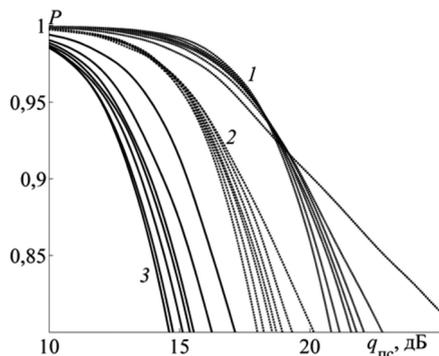


Рис. 1. Семейства зависимостей вероятности правильного выполнения поиска от отношения «помеха/сигнал» в условиях воздействия МП при $N_{\text{гн}}=1-5, 10, 25$. Фурье-процедура (2)

На рис. 2 представлено семейство зависимостей $P(q_{\text{пс}})$, полученное при проведении $2 \cdot 10^4$ испытаний, $q_{\text{зн}}=40$ дБГц, воздействии пятикомпонентной МП ($N_{\text{гн}}=5$) с хаотическим сценарием частотной локализации в области ГЛ и предкорреляционной обработке смеси (1) режектором (3), в котором применено взвешивание различными весовыми функциями, прошедшими предварительный отбор. Нумерация кривых на рис. 2 означает вид ВФ в (3): 1 – кубическая вариация ВФ Хеннинга (X^3) [13, с. 40]; 2 – Дольфа-Чебышева (ДЧ_5) [12]; 3 – Кравченко-Дольфа-Чебышева ($\text{К}_4\text{ДЧ}_5$) [12]; 4 – Дольфа-Чебышева-Дворковича (ДЧД , см. ф-лу (4.11) в [13, с. 70], коэфф. в правом столбце табл. 4.4 [13, с. 71]). Режектор настраивался на поэлементное удаление 50 максимальных частотных выборок из спектра аддитивной смеси с учётом результатов [11]. Обработанная режектором смесь с существенно ослабленным помеховым процессом подавалась на Фурье-процедуру поиска (2), в которой выполнялось пять когерентных накоплений. Частная количественная констатация установленных положительных эффектов, обусловленных введением предварительного подавления помеховых компонентов, представлена в табл. 2.

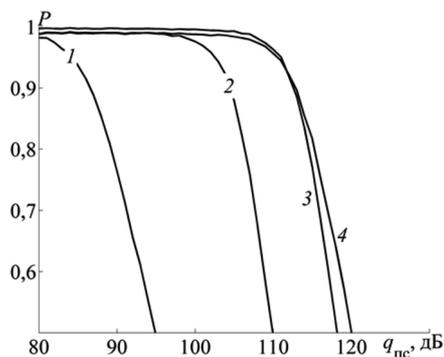


Рис. 2. Семейство зависимостей вероятности правильного выполнения поиска от отношения «помеха/сигнал» при обработке хаотической МП ($N_{\text{гн}}=5$) режектором (3) и Фурье-процедурой (2)

Таблица 1. Оценки значений отношений «помеха/сигнал» $q_{\text{пс}}$ при различном количестве помеховых компонентов $N_{\text{гн}}$. Фурье-процедура (2)

$N_{\text{гн}}$	Частоты помеховых компонентов		
	Хаотич.		Фикс.
	ГЛ	ГЛ и два БЛ	ГЛ
	$q_{\text{пс}}, \text{дБ}$ при $P=0,9(0,99)$		
1	17,5 (12,4)	20,2 (13,8)	15,4 (11,0)
2	17,3 (12,7)	19,8 (14,4)	14,4 (10,1)
5	16,9 (12,7)	19,6 (14,9)	13,6 (9,5)
10	16,7 (12,8)	19,4 (15,1)	13,3 (9,5)

Таблица 2. Оценки значений отношений «помеха/сигнал» $q_{\text{пс}}$ при $N_{\text{гн}}=5$. Режектор (3) и Фурье-процедура (2). Частоты компонентов МП хаотические в пределах ГЛ

ВФ	X^3	ДЧ_5	$\text{К}_4\text{ДЧ}_5$	ДЧД
$q_{\text{пс}}, \text{дБ}$ при $P=0,9(0,985)$	86,7 (79,8)	104,6 (98,3)	112,7 (107,5)	113,0 (104,4)

Обсуждение результатов

Как видно из результатов статистического моделирования, представленных в графическом (рис. 1) и табличном виде (табл. 1), для рассмотренных условий присутствия в наблюдениях аддитивной смеси (1) помеховых компонентов при $N_{\text{гн}} > 1$ дополнительно снижает эффективность Фурье-процедуры (2) поиска ПСС. Обработка статистических зависимостей (рис. 1) показала, что при различных сценариях частотной локализации помеховых компонентов дополнительное ухудшение эффективности поиска при $N_{\text{гн}} > 1$ оказывается в пределах 2 дБ. Взаимное расположение групп кривых 1–3 объясняется результатами [14]. В области значений $P(q_{\text{пс}}) > 0,9$, в группах 1, 2 (рис. 1), наблюдается аномальная (на первый взгляд) «перестановка» зависимостей. Такой ход кривых фиксируется, по-видимому, из-за существенного изменения характера распределения МП при $N_{\text{гн}} > 1$. Согласно центральной предельной теореме (т. А.М. Ляпунова), сложение процессов с произвольными распределениями приводит к гауссовости распределения суммарного процесса [15, с. 348; 16, с. 154]. Таким образом, с ростом $N_{\text{гн}}$ распределение МП стремится к гауссовскому, при котором процедура корреляционной обработки является оптимальной⁵ [17, с. 11]. Данное явление «перестановки» зависимостей выражено тем сильнее, чем больше интервал значений хаотических частотных расстройек помеховых компонентов. На рис. 3 данный эффект визуализирован – представлены гистограммы распределения помеховых процессов, показывающие количество отсчётов $N_{\text{отсч}}$ «попавших» в каждый из интервалов⁶ при одной гармонике помехи ($N_{\text{гн}}=1$), а так-

⁵ По критерию максимума отношения мощностей сигнала и помехи на выходе.

⁶ Количество интервалов выбрано равным 31 и определено как одно из ближайших нечётных целых к значению, получаемому по правилу Райса: $2\sqrt[3]{K}$.

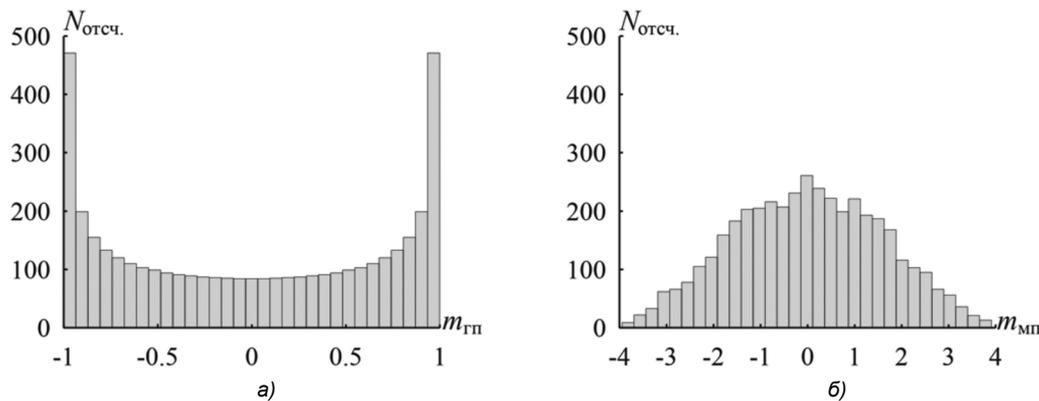


Рис. 3. Гистограммы распределения помехового процесса при $N_{\text{отсч}}=1$ (а) и $N_{\text{отсч}}=5$ (б)

же при $N_{\text{отсч}}=5$. Общее число отсчётов помеховых процессов $K=4096$ соответствует принятому при моделировании объёму выборки за период ПСП. Амплитуды помеховых гармоник единичные, а начальные фазы – случайные.

Результаты статистического моделирования совокупной обработки (рис. 2, табл. 2), предполагающей режекцию (3) и последующий поиск ПСС на основе Фурье-процедуры (2), свидетельствуют о существенной эффективности режектора в условиях применения для взвешивания современных модификаций ВФ Дольфа-Чебышева, обеспечивающих выигрыш в сравнении со случаем применения обоснованной ранее [10; 11] кубической вариации ВФ Хеннинга⁷. Установленный выигрыш совокупной обработки составляет до 26 дБ ($P=0,9$) при $N_{\text{отсч}}=5$, что является существенным потенциальным алгоритмическим преимуществом.

Заключение

В статье проведено исследование влияния многотональной помехи с различным составом, интенсивностью и сценариями частотной локализации на вероятность правильного выполнения поиска псевдослучайного сигнала. Установлено, что при многокомпонентном составе ($2 \leq N_{\text{отсч}} \leq 25$) рассмотренной помехи эффективность поиска псевдослучайного сигнала дополнительно снижается, что количественно характеризуется уменьшением допустимого отношения «помеха/сигнал» в пределах 2 дБ. Кроме того, исследована эффективность совокупной обработки, включающей режекцию многотональной помехи и последующий поиск сигнала на основе Фурье-процедуры. Установлено существенное (порядка 20 дБ и более) преимущество совокупной обработки при применении современных модификаций ВФ Дольфа-Чебышева – Кравченко-ДЧ и ДЧ-Дворковича, в сравнении со случаями использования других рассмотренных ВФ.

Литература

1. Тузов Г.И., Сивов В.А., Прытков В.И. и др. Помехозащищенность радиосистем со сложными сигналами. М.: Радио и связь, 1985.
2. Смирнов Н.И., Горгадзе С.Ф. Помехоустойчивость асинхрон-

ных систем передачи с шумоподобными сигналами при действии узкополосных помех. Радиотехника. 1993. №7. С. 27-36.

3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. М.: Радиотехника, 2010.

4. Авдеев В.А., Кошкарлов А.С., Коннов Е.В. Обнаружение помех в частотных диапазонах космических навигационных систем. Журнал радиоэлектроники. 2015. №10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct15/12/text.pdf>.

5. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. М.: Радио и связь, 2003.

6. Borio D. GNSS acquisition in the presence of continuous wave interference. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. 2010, vol. 46, no. 1, pp. 47-60.

7. Кузьмин Е.В. О влиянии квантования по уровню на эффективность процедуры поиска шумоподобного сигнала по задержке на фоне шума и гармонической помехи. Цифровая обработка сигналов. 2020. № 2. С.41-45.

8. Кузьмин Е.В., Зограф Ф.Г. Влияние гармонической помехи на эффективность процедуры беспорогового поиска шумоподобного сигнала по времени запаздывания с переходом в частотную область определения. Радиотехника и электроника. 2022. Т.67. №8. С.774-781.

9. Бакитко Р.В., Польщиков В.П., Шилов А.И., Хацкевич Я.Д., Болденков Е.Н. Использование весовых функций для предварительной обработки шумоподобных сигналов при наличии сильных интерференционных помех. Радиотехника. 2006. № 6. С.13-17.

10. Кузьмин Е.В. Повышение эффективности обработки сигналов на фоне гармонической помехи за счёт выбора функции предварительного взвешивания для частотного режектора. Цифровая обработка сигналов. 2021. № 4. С.16-20.

11. Кузьмин Е.В. Показатели качества алгоритма ДПФ-режекции узкополосной помехи при различных функциях предварительного взвешивания. Цифровая обработка сигналов. 2023. №1. С.48-53.

12. Кравченко В.Ф., Пустовойт В.И. Новый класс весовых функций и их спектральные свойства. Доклады академии наук. 2002. Т.386. №1. С.38-42.

13. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. М.: Техносфера, 2016.

14. Кузьмин Е.В. Анализ частотных характеристик процедур квадратурной корреляционной обработки комплексных сигналов. Цифровая обработка сигналов. 2020. № 4. С.13-20.

15. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975.

16. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2000.

17. Варакин Л.Е. Теория сложных сигналов. М.: Советское радио, 1970.

⁷ Которая в свою очередь выигрывает у ВФ Парзена (см. [10; 11]).