

УДК 621.396.96

СВОЙСТВА ФУНКЦИИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПСЕВДОХАОТИЧЕСКИХ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С ВЕСОВОЙ ОБРАБОТКОЙ

Е.Н. БУЙЛОВ, С.А. ГОРШКОВ, С.Ю. СЕДЫШЕВ, С.Н. ЯРМОЛИК

Военная академия Республики Беларусь
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 20 марта 2014

Проведен анализ свойств функций неопределенности псевдохаотических дискретных частотно-манипулированных сигналов при использовании в качестве парциальных дискретов линейно-частотно-модулированных радиоимпульсов. Рассмотрена возможность снижения уровня боковых лепестков такого широкополосного сигнала.

Ключевые слова: дискретные частотно-манипулированные сигналы, псевдохаотическая манипуляция частоты, функция неопределенности, весовая обработка.

Введение

Одним из представителей широкополосных сигналов является дискретный частотно-манипулированный сигнал (ДЧМС). Использование ДЧМС позволяет одновременно повышать разрешающую способность как по дальности, так и по скорости, повышая при этом скрытность и имитостойкость зондирующего сигнала. Определенный интерес представляет рассмотрение особенностей псевдохаотических частотно-манипулированных сигналов, а именно свойств их функций неопределенности (ФН). Известно, что псевдохаотический ДЧМС характеризуется узким пиком ФН и низким уровнем боковых лепестков (БЛ) при ненулевых рассогласованиях по времени и частоте. Для обеспечения «кнопочной» формы ФН рассматриваемого сигнала несущая частота парциальных дискретов изменяется по специальному закону. Большой вклад в разработку теории псевдослучайных оптимальных последовательностей внесли Костас, Голомб, Тейлор, Велч, Лемпель и др. [1–9].

Данная работа является второй в цикле статей, посвященных анализу свойств ФН ступенчатых ДЧМС. В первой статье [10] в качестве зондирующих сигналов рассматривались последовательности лестничных ДЧМС. Целью настоящей работы является анализ свойств ФН последовательностей псевдохаотических ДЧМС (одинаковых или различных) с ЛЧМ парциальными дискретами и иллюстрация возможности снижения уровня БЛ таких сигналов в процессе их обработки.

В настоящей статье тела неопределенности (ТН) одиночных псевдохаотических ДЧМС отображены в полном объеме, а их последовательностей – с ограничениями (ввиду больших вычислительных затрат). Вначале показана подробная структура когерентной последовательности псевдохаотических ДЧМС в пределах главного максимума (главного лепестка), а затем пределы отображения расширены до двух периодов повторения.

Одиночные дискретные частотно-манипулированные сигналы

Для обеспечения приближения ФН к кнопочному виду возможно использование последовательности импульсов с псевдослучайными скачкообразными изменениями несущей частоты парциальных импульсов на величину δf . В этом случае частота k -го импульса последовательности отличается от центральной несущей частоты f_0 на величину [8]:

$F_k = \left(\gamma(k) - \frac{M+1}{2} \right) \delta f$, ($k = 1, 2, \dots, M$), где $\gamma(k)$ – псевдослучайная целочисленная функция, M – число используемых частот (парциальных импульсов).

Выбор функций $\gamma(k)$ в числовых полях с конечным числом элементов (полях Галуа) рассмотрен в [8, 9, 11]. На рис. 1, а приведена частотно-временная диаграмма Габора псевдохаотического ДЧМС.

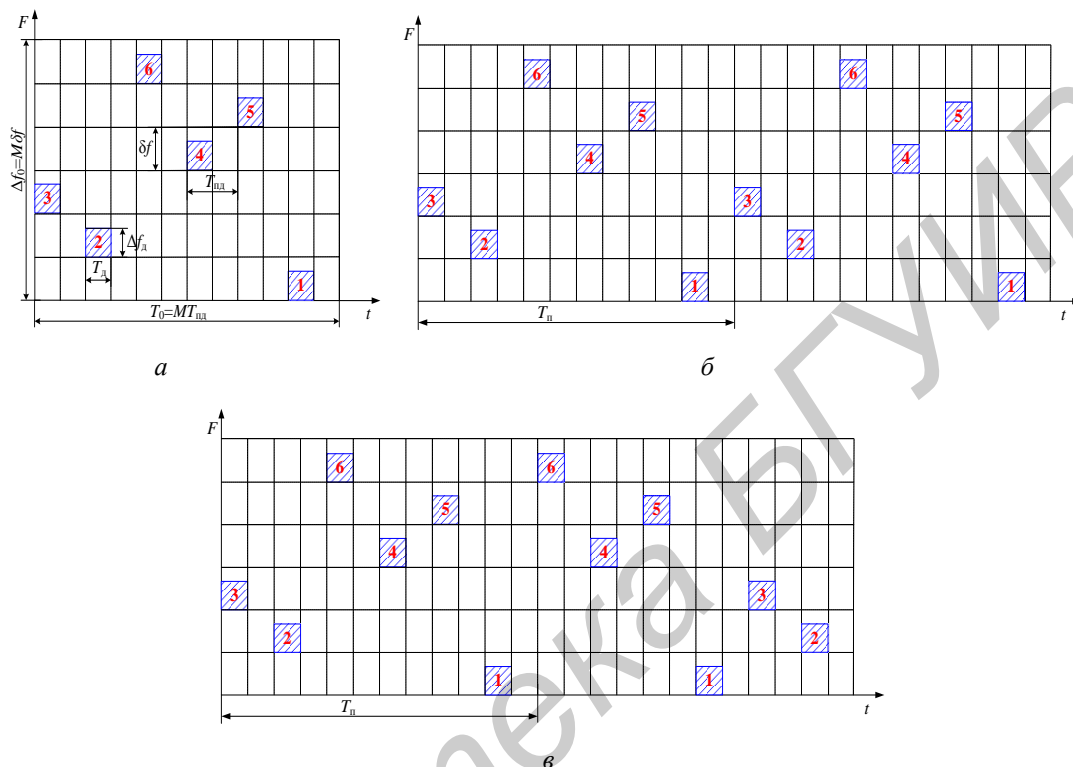


Рис. 1. Частотно-временная диаграмма Габора с длиной кода Костаса-Велча $M = 6$: а – одиночного псевдохаотического ДЧМС; б – когерентной последовательности из двух псевдохаотических с одинаковым кодом частоты ДЧМС; в – когерентной последовательности из двух псевдохаотических с различным кодом частоты ДЧМС

Среди всевозможных вариантов частотно-временного кодирования, тело неопределенности (ТН) псевдохаотического ДЧМС приближается к «кнопчному» виду с уровнем БЛ $1/M$ [1, 8]. В рамках статьи анализ свойств ФН проводится на примере псевдохаотического ДЧМС с ЛЧМ дискретами при длине кода $M = 1020$ ($M + 1$ – простое число) со скачком частоты $\delta f = 1$ МГц, периодом повторения ЛЧМ дискретов $T_{пд} = 20$ мкс, длительностью дискрета $T_d = 10$ мкс, девиацией частоты дискрета $\Delta f_m = \Delta f_d = 1$ МГц. Общая ширина полосы такого сигнала составляет $\Delta f_0 = 1020$ МГц, потенциальное разрешение по дальности $\Delta r \approx 0,15$ м, длительность сигнала $T_0 = 20,4$ мс, потенциальное разрешение по частоте Доплера – $\Delta F_d \approx 50$ Гц. На рис. 2 приведены сечения ФН анализируемого сигнала вертикальными плоскостями $F = 0$, $F > 0$ и ТН псевдохаотического ДЧМС с ЛЧМ парциальными дискретами.

Анализ полученных результатов показывает, что рассматриваемый ДЧМС характеризуется высоким уровнем БЛ в сечении ФН плоскостью $F = 0$ (порядка -13 дБ), уменьшающимися по закону функции $[\sin(x)/x]^2$ (рис. 2, а). В сечении ФН плоскостью $F > 0$ средний уровень БЛ соответствует теоретическому $1/M$ (порядка -30 дБ) с максимальными выбросами до $2/M$ (порядка -27 дБ) [8, 9]. Полученный центральный максимум ТН псевдохаотического ДЧМС обеспечивает высокую разрешающую способность не только по дальности $\Delta r = c/(2M \cdot \delta f)$, но и по радиальной скорости $\Delta V_r = c/(2T_0 f_0)$ (рис. 2, б).

Отмеченный факт является немаловажным при решении задач классификации радиолокационных объектов. Очевидно, что рассматриваемые широкополосные сигналы обладают приемлемым уровнем БЛ только при использовании большого числа парциальных импульсов M .

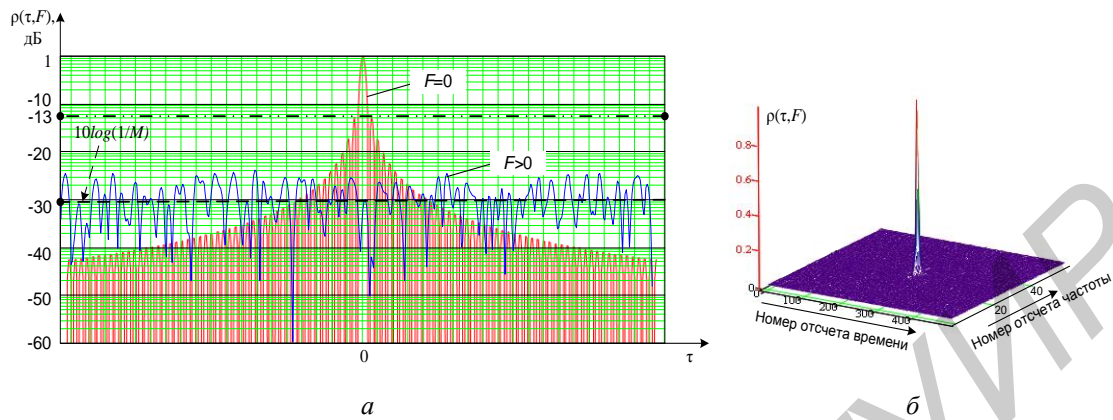


Рис. 2. Сечения ФН плоскостями $F = 0$ и $F > 0$ (а) и ТН псевдохаотического ДЧМС с ЛЧМ парциальными дискретами и длиной кода Костаса-Велча $M = 1020$ (б)

Весовая обработка одиночного дискретного частотно-манипулированного сигнала

Известно [12], что использование весовой обработки (ВО) сжатого сигнала позволяет существенно снизить уровень его БЛ. Особенностью ВО псевдохаотического ДЧМС заключается в необходимости учета того, что номер частотного дискрета растет последовательно (по «ступенчатому» закону), а значение частоты изменяется хаотически. В связи с этим каждый парциальный радиоимпульс сигнала (дискрет частоты) должен быть умножен на весовой коэффициент, соответствующий порядковому номеру дискрета частоты [1]. На рис. 3, а показан пример весовой функции Хемминга, обеспечивающей ВО отсчетов рассматриваемого сжатого ДЧМС сигнала ($M = 1020$).

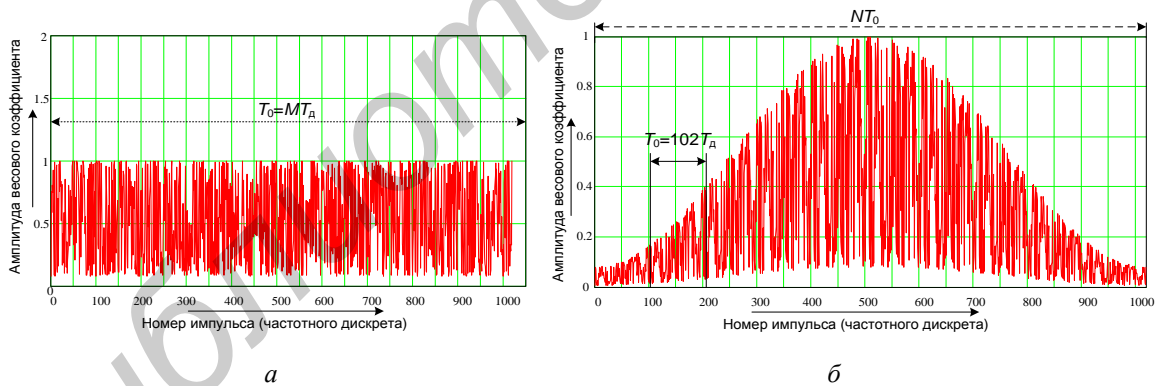


Рис. 3. Временная весовая функция Хемминга, обеспечивающая:

а – ВО одиночного псевдохаотического ДЧМС с длиной кода $M = 1020$; б – двойную ВО когерентной последовательности псевдохаотического ДЧМС с длиной кода $M = 1020$

С целью подтверждения факта снижения уровня БЛ ДЧМС при использовании ВО, на рис. 4 приведены сечения (плоскостями $F = 0$, $F = F_{\text{пд}}/2$ и $F = F_{\text{пд}}$, где $F_{\text{пд}} = 1/MT_{\text{пд}}$ – частота повторения парциальных дискрет) ФН псевдохаотического ДЧМС с ЛЧМ парциальными дискретами.

Результаты анализа сечений ФН рассматриваемого сигнала показывают, что использование весовой функции снижает уровень БЛ только в сечении плоскостью $F = 0$ (например, для функции Хемминга -43 дБ), что полностью соответствует теоретическим данным [12]. В остальных же сечениях уровень боковых остатков достаточно высок (порядка -30 дБ) и определяется только числом дискретов сигнала $1/M$.

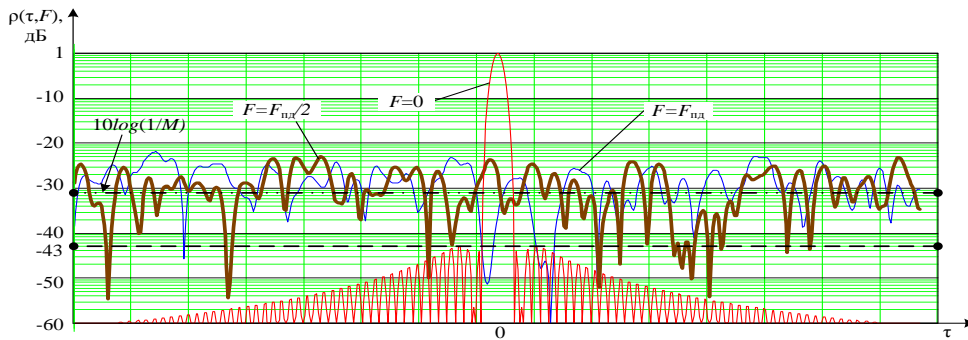


Рис. 4. Сечения ФН плоскостями $F = 0$, $F = F_{пд}/2$ и $F = F_{пд}$ одиночного псевдохаотического ДЧМС с длиной кода $M = 1020$ (использована ВО функцией Хемминга)

Когерентная последовательность дискретных частотно-манипулированных сигналов

Для улучшения энергетического потенциала радиолокационных станций, селекции движущихся целей на фоне пассивных помех и повышения точности сопровождения объектов по радиальной скорости, используют зондирующие сигналы в виде когерентных последовательностей ДЧМС [8] с одинаковыми (рис. 1, б) или различными (рис. 1, в) законами псевдохаотической частотной манипуляции.

Анализ характеристик ФН проведен на примере когерентной последовательности из 10 ($N = 10$) псевдохаотических ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M = 102$, величиной скачка частоты $\delta f = 10$ МГц, шириной спектра ЛЧМ дискрета $\Delta f_d = 10$ МГц, длительностью $T_d = 10$ мкс и периодом повторения дискрета $T_{пд} = 20$ мкс. Длительность одиночного ДЧМС $T_0 = 2,04$ мс. Общая ширина спектра сигнала $\Delta f_0 = 1020$ МГц, длительность когерентной последовательности $T_0 N = 20,4$ мс. На рис. 5 приведены сечения ФН вертикальными плоскостями $F = 0$; $F_{пд} / 2$; $F_{пд}$.

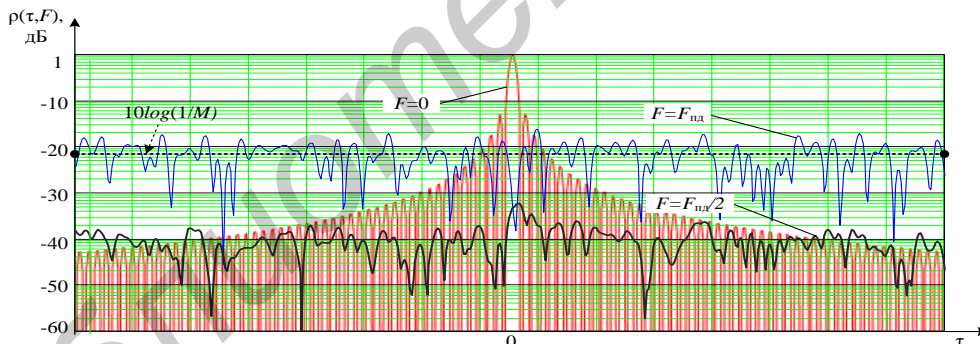


Рис. 5. Сечения ФН плоскостями, $F = 0$, $F = F_{пд}/2$ и $F = F_{пд}$ когерентной последовательности из 10 псевдохаотических ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода Костаса-Велча $M = 102$

Результаты анализа показывают, что при нулевой расстройке по частоте $F = 0$ сечение ФН характеризуется высоким уровнем БЛ (порядка -13 дБ), снижающимся по закону функции $[\sin(x)/x]^2$. Максимальный уровень БЛ соответствует сечению ФН при $F = F_{пд}$. Применительно к рассматриваемому сигналу (с одинаковым кодом частоты) фрагмент ТН и его сечение горизонтальной плоскостью $\rho(\tau, F) = \text{const}$ представлены на рис. 6.

Анализ полученных результатов показывает, что вдоль оси частот располагаются ярко выраженные пики (на частотах кратных $\pm F_{пд}$). При этом уровень частотных пиков вдоль оси времени составляет порядка -20 дБ, что соответствует уровню $1/M$ одиночного ДЧМС. Между пиками наблюдается провал до уровня порядка $(-35 \dots -40)$ дБ. Увеличивая частоту повторения $F_{пд}$ возможно расширить зоны с пониженным уровнем боковых остатков.

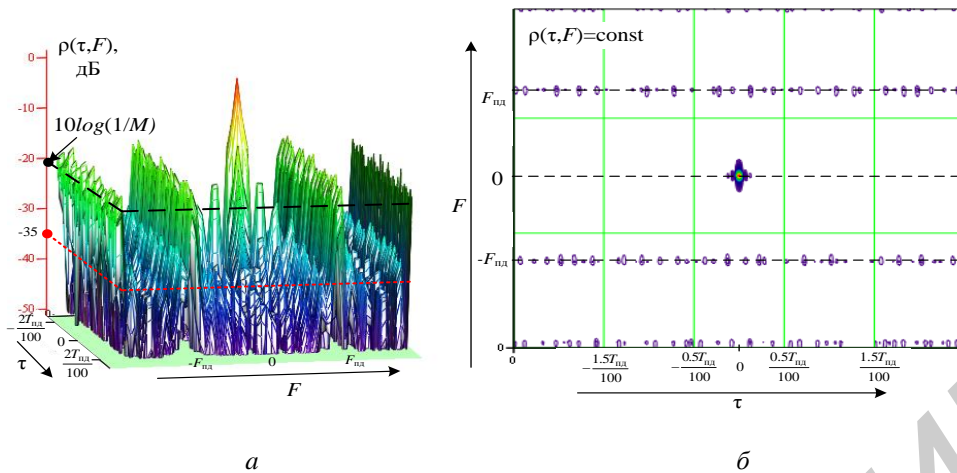


Рис. 6. Фрагмент ТН (а) и сечение ТН горизонтальной плоскостью $\rho(\tau, F) = \text{const}$ когерентной последовательности из 10 псевдохаотических ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода Костаса-Велча $M = 102$ (б)

Весовая обработка когерентной последовательности дискретных частотно-манипулированных сигналов

Интерес вызывает исследование возможности снижения уровня боковых остатков зондирующего сигнала в виде когерентной последовательности псевдохаотических ДЧМС с ЛЧМ дискретами. С этой целью целесообразно использовать известные функции ВО [12]. На рис. 7 приведены сечения ФН каждого ДЧМС из рассматриваемой последовательности вертикальными плоскостями при различных расстройках по частоте.

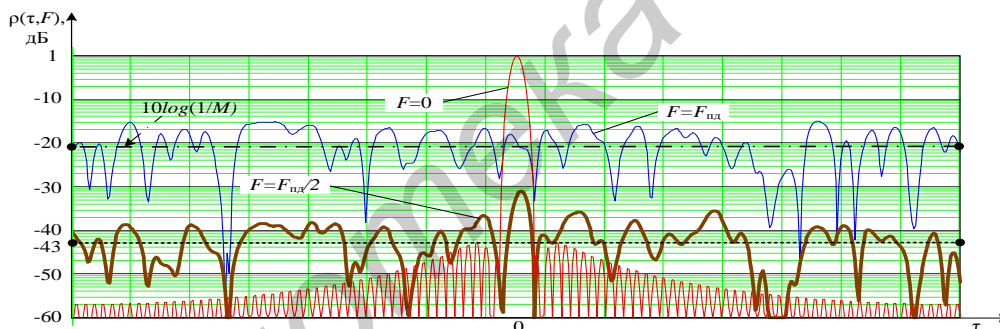


Рис. 7. Сечения ФН плоскостями $F = 0$, $F = F_{\text{пд}}/2$ и $F = F_{\text{пд}}$ когерентной последовательности из 10-ти псевдохаотических ДЧМС с ЛЧМ дискретами, ВО функцией Хемминга и длиной кода $M = 102$

Анализ полученных результатов показывает, что использование функции Хемминга снижает уровень боковых остатков ДЧМС до -43 дБ (согласуется с результатами [12]) только при $F = 0$. При ненулевых расстройках по частоте ($F = F_{\text{пд}}/2$ и $F = F_{\text{пд}}$) уровень БЛ остался неизменным относительно сечений ФН ДЧМС до ВО (рис. 5). На рис. 8 отображены фрагменты ТН когерентной последовательности из 10 псевдохаотических ДЧМС с ЛЧМ дискретами и различными вариантами кода частоты при ВО каждого сигнала в отдельности и дополнительной ВО всей последовательности (двойная ВО). Такой подход позволяет снизить уровень боковых остатков сжатого сигнала, как вдоль оси времени, так и вдоль оси частот до теоретического (например, для функции Хемминга -43 дБ). На рис. 8, а код частоты в каждом ДЧМС одинаковый (рис. 1, б). Уровень БЛ в частотных сечениях кратных $\pm F_{\text{пд}}$ определяется величиной $1/M$ (порядка -20 дБ).

На рис. 8, б код частоты в каждом ДЧМС различный (рис. 1, в). В отличие от результатов рис. 8, а, наблюдается увеличение уровня боковых остатков сжатого сигнала, как вдоль оси частот, так и вдоль оси времени до -45 дБ. Уровень БЛ в частотных сечениях кратных $\pm F_{\text{пд}}$ остается неизменным и определяется величиной $1/M$ (порядка -20 дБ). Использование рассматриваемой когерентной последовательности ДЧМС позволяет повысить помехозащищенность радиолокационных станций от воздействия активных шумовых помех.

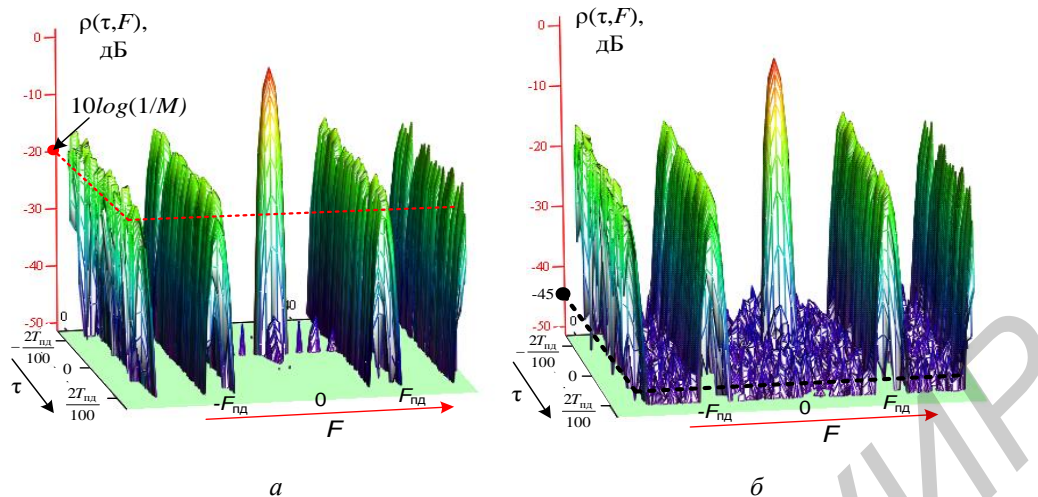


Рис. 8. Фрагмент ТН когерентной последовательности из 10 псевдохаотических ДЧМС с ЛЧМ дискретами после двойной ВО и одинаковым (а) и различным (б) кодами частоты в каждом ДЧМС

На рис. 3, б показан вид двойной весовой функции, обеспечивающей минимизацию боковых остатков сигнала в сечениях по времени и частоте, при использовании зондирующего сигнала в виде когерентной последовательности псевдохаотических ДЧМС. Рассматриваемая функция представляет собой произведение десяти весовых функций псевдохаотических сигналов на общую весовую функцию всей последовательности.

Вид тела неопределенности когерентной последовательности дискретных частотно-манипулированных сигналов на интервалах времени $2T_{\text{пд}}$ и частоты $F_{\text{пд}}$

Необходимость данного анализа обусловлена тем, что представленный фрагмент ТН ДЧМС (рис. 8) отображает лишь небольшую часть ТН вдоль осей времени ($4T_{\text{пд}}/100$) и частоты ($2F_{\text{пд}}$). В связи с этим рассматривается ТН когерентной последовательности ДЧМС в следующих пределах: вдоль оси времени ($-T_{\text{пд}} - T_{\text{пд}}$), вдоль оси частот ($0 - F_{\text{пд}} = 1/T_{\text{пд}}$).

На рис. 9 отображен фрагмент ТН на примере когерентной последовательности из 5 ($N=5$) псевдохаотических ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M=10$, величиной скачка частоты $\delta f = 1$ МГц, шириной спектра ЛЧМ дискрета $\Delta f_{\text{д}} = 1$ МГц, длительностью дискрета $T_{\text{д}} = 10$ мкс и периодом повторения дискретов $T_{\text{пд}} = 20$ мкс. Длительность одиночного ДЧМС $T_0 = 0,2$ мс. Общая ширина спектра ДЧМС и всего сигнала $f_0 = 10$ МГц, а его длительность $T_0 N = 1$ мс. Шаг дискретизации по времени $\Delta t = 20$ нс.

На рис. 9, а использован одинаковый код частоты в каждом ДЧМС. Главные лепестки (ГЛ) ТН последовательности ДЧМС располагаются на частотах кратных $\pm F_{\text{пд}}$. На частотах кратных $F_{\text{пд}}$, и при временных расстройках кратных $\pm T_{\text{пд}}$, значение БЛ определяется величиной $1/M$ (порядка -10 дБ), а их количество – числом дискрет ДЧМС ($M=10$). Уровень ГЛ убывает по закону $[\sin(x)/x]^2$ в пределах ширины спектра всей последовательности (10 МГц). Вдоль оси времени ГЛ следуют с шагом кратным $\pm T_{\text{пд}}$, а их уровень снижается по параболе. Среднее значение боковых остатков составляет порядка -30 дБ, и зависит от скачка частоты δf . Их минимальный уровень достигается при $\delta f = \Delta f_{\text{д}}$. Интервал между ГЛ ТН ДЧМС вдоль оси времени $T_{\text{пд}}$ характеризует интервал однозначного определения дальности $r_{\text{одн}} = cT_{\text{пд}}/2 = 30$ км. Интервал между лепестками ТН ДЧМС вдоль оси частот характеризует интервал однозначного определения доплеровского смещения частоты $F_{\text{д одн}} = F_{\text{пд}} = 1/T_{\text{пд}} = 50$ кГц. Однако это не исключает проблему неоднозначности оценивания дальности и частоты (неоднозначности будут возникать на дальностях кратных 3000 м и частотах кратных 5 кГц).

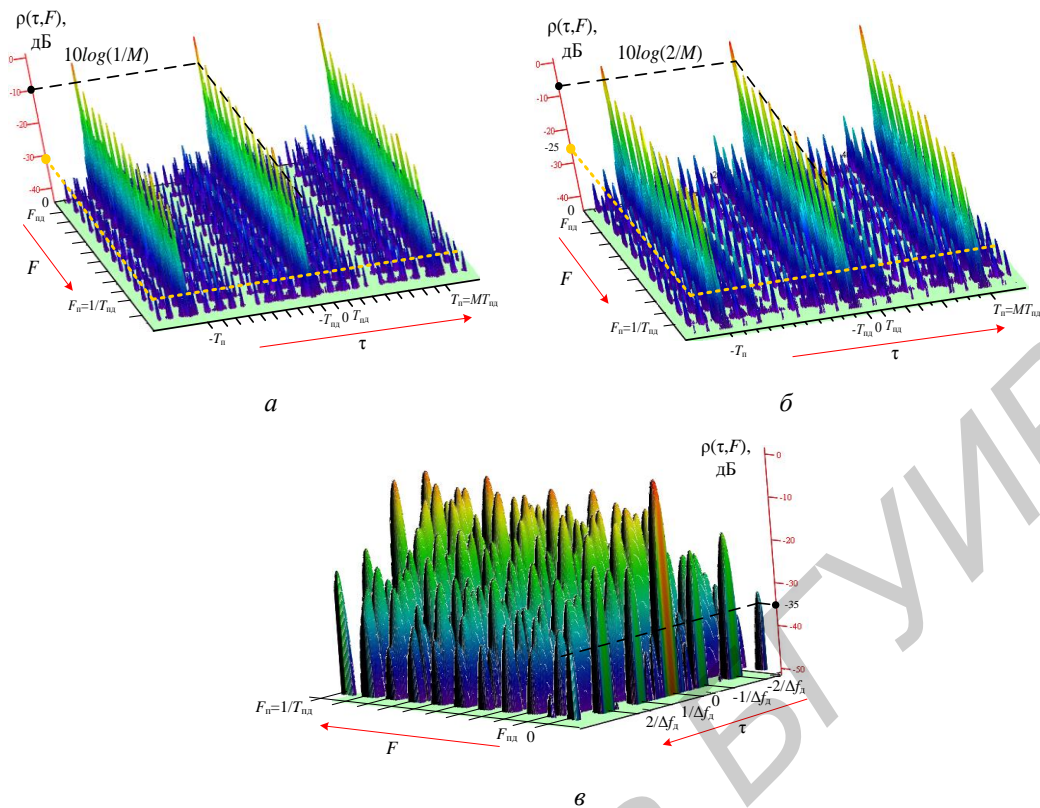


Рис. 9. Фрагмент ТН когерентной последовательности из 5 псевдохаотических ДЧМС с ЛЧМ дискретами: *а* – без ВО; *б* – после двойной ВО; *в* – главного лепестка после двойной ВО

На рис. 9, *б* представлен фрагмент ТН ДЧМС с учетом проведения двойной ВО. На частотах кратных $F_{\text{пд}}$ и при временных расстройках кратных $\pm T_{\text{пд}}$ значение БЛ определяется величиной $2/M$ (порядка -7 дБ). Средний уровень боковых остатков на временных интервалах кратных $\pm T_{\text{пд}}$ и на частотах кратных $\pm F_{\text{пд}}$ составляет порядка -25 дБ. В сечении $\tau=0$ уровень остатков между БЛ составляет менее -43 дБ. Однако во временных сечениях кратных $\pm T_{\text{пд}}$ уровень боковых остатков достигает порядка -35 дБ. Основным недостатком применения двойной весовой обработки является расширение ГЛ ТН, что приводит к ухудшению разрешающей способности как по дальности, так и по частоте Доплера. При этом потери в отношении сигнал-шум составляют порядка $1,7$ дБ.

На рис. 9, *в* представлен ГЛ ДЧМС после двойной ВО (временной интервал $\pm 2/\Delta f_{\text{д}}$ (рис. 9, *а*)). Вдоль оси времени уровень боковых остатков вблизи ГЛ (от $-1/\Delta f_{\text{д}}$ до $1/\Delta f_{\text{д}}$), составляет порядка -35 дБ. При увеличении базы сигнала уровень боковых остатков стремится к пределу, определяемому видом весовой функции. В других временных сечениях, не кратных $\pm 1/\Delta f_{\text{д}}$, и вдоль оси частот не кратных $\pm F_{\text{пд}}$, уровень БЛ снижается до -43 дБ и менее. Огибающая ГЛ вдоль оси времени определяется квадратом модуля корреляционной функции одиночного ЛЧМ дискрета (преобразованием Фурье от квадрата модуля амплитудно-частотного спектра). Ширина зубца вдоль осей времени и частоты определяет разрешающую способность по дальности $\Delta r = c/2\Delta f_0 = 15$ м и частоте Доплера $\Delta F_{\text{д}} = 1/MT_{\text{пд}} = 1$ кГц. Расстояние между зубцами ГЛ ТН ДЧМС вдоль оси времени равно 1 мкс (обратно пропорционально ширине спектра одиночного дискрета $\Delta f_{\text{д}}$), что соответствует 150 м.

В случае использования когерентной последовательности ДЧМС с различными кодами частотной манипуляции (рис. 1, *в*), уровень боковых остатков вдоль оси времени вблизи ГЛ (от $-1/\Delta f_{\text{д}}$ до $1/\Delta f_{\text{д}}$) возрастает до -20 дБ (по сравнению с использованием одинакового закона частотной манипуляции). Уровень БЛ вдоль оси частот (без учета лепестков, кратных $\pm F_{\text{пд}}$) достигает -20 дБ и зависит от базы сигнала.

Заключение

Проведен анализ свойств ФН когерентных последовательностей псевдохаотических ДЧМС с ЛЧМ дискретами. Модулированные парциальные дискреты (например, ЛЧМ) обеспечивают не только высокое разрешение по дальности, но и независимое управление частотными и временными параметрами сигнала. Использование последовательностей рассматриваемых сигналов улучшает энергетический потенциал РЛС и повышает точность сопровождения объектов по радиальной скорости. При высокой разрешающей способности по дальности (за счет увеличения ширины спектра) и частоте Доплера (за счет увеличении времени наблюдения) появляется возможность формировать дальностные и частотные радиолокационные портреты целей, что позволяет переходить к решению задач распознавания. Формирование ДЧМС, с учетом современных цифровых и аналоговых технологий, оказывается технически не очень сложным.

PROPERTIES OF UNCERTAINTY FUNCTION OF THE PSEUDO-CHAOTIC DISCRETE FREQUENCY MANIPULATED SIGNALS WITH WEIGHT PROCESSING

E.N. BUILOV, S.A. GORSHKOV, S.Y. SEDISHEV, S.N. YARMOLIK

Abstract

The analysis of uncertainty functions properties of pseudo-chaotic discrete frequency-manipulated signals with use of linearly-frequency-modulated radio impulses as partial discrete is carried out. Possibility of decrease in level of lateral petals of such broadband signal is considered.

Список литературы

1. Плекин В.Я. Широкополосные дискретно-кодированные сигналы в радиотехнике и радиолокации. М., 2005.
2. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. Теория и применение. М., 1971.
3. Levanon N., Mozeson E. Radar Signals. New Jersey, 2004.
4. James D. Taylor. Ultra-Wideband Radar Technology. New York, 2000.
5. Computer simulation of aerial target radar scattering, recognition, detection and tracking / Editor Y.D. Shirman. Boston–London, 2002.
6. Wehner D. High Resolution Radar. Norwood, 1987.
7. Орленко В.М., Ширман Я.Д. // Электромагнитные волны и электронные системы. 1999. № 4. С. 86–89.
8. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. / Под ред. Я.Д. Ширмана. М., 2007.
9. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М., 1985.
10. Буйлов Е.Н., Горшков С.А. // Докл. БГУИР. 2014. № 3 (81). С. 78–84.
11. Виноградов И.М. Основы теории чисел. М., 1952.
12. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Под ред. И.С. Рыжака. М., 1990.