

УДК 621.396.96

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ БОКОВЫХ ОСТАТКОВ В ЛЕСТНИЧНЫХ ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТНО-МАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛАХ С ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫМИ ДИСКРЕТАМИ

Е.Н. БУЙЛОВ, С.А. ГОРШКОВ

Военная академия Республики Беларусь
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 14 февраля 2014

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

Ключевые слова: дискретные частотно-манипулированные сигналы, лестничная манипуляция частоты, тело неопределенности, весовая обработка.

Введение

Среди большого многообразия широкополосных сигналов особый интерес вызывают дискретные частотно-манипулированные сигналы (ДЧМС). Такие сигналы при радиолокационном наблюдении позволяют обеспечивать возможность сверхразрешения по радиальной дальности Δr [1–9]. Формирование рассматриваемых дискретных сигналов оказывается технически проще, чем непрерывных линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов с той же шириной спектра [10]. Наиболее широкое практическое распространение получили частотно-манипулированные сигналы на основе парциальных простых прямоугольных импульсов. Такие сигналы характеризуются постоянной несущей частотой f_0 внутри парциального импульса и междуимпульсной перестройкой частоты $1/T_d$ (T_d – длительность одиночного дискрета), равной ширине спектра дискрета. Рассматриваемые сигналы, обеспечивая высокое разрешение по дальности, исключают возможность независимого управления частотными и временными параметрами сигнала. Следует отметить, что при использовании лестничных ДЧМС с модулированными парциальными дискретами (например, ЛЧМ) данный недостаток может быть устранен. В связи с этим определенный интерес представляет анализ свойств функций неопределенности (ФН) рассматриваемых сигналов и возможность снижения их уровня боковых лепестков, что и является целью настоящей статьи.

Одиночные лестничные дискретные частотно-манипулированные сигналы с ЛЧМ дискретами

На современном этапе развития техники генерирования и обработки радиолокационных сигналов большое внимание уделяется широкополосным сигналам, получаемым путем «синтеза» их спектра частот. В качестве таких сигналов, как правило, рассматриваются разомкнутые по времени частотно-манипулированные радиоимпульсы или их пачки [11]. Закон изменения несущей частоты парциального дискрета может быть как лестничным, так и псевдохаотическим. В рамках статьи рассматриваются особенности ФН лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами.

Лестничная частотная манипуляция предполагает равномерный интервал изменения несущей частоты дискретов [5]:

$$F_k = \left(k - \frac{M+1}{2} \right) \delta f, \quad (k = 1, 2, \dots, M),$$

где M – число частотных ступеней, а δf – шаг изменения несущей частоты.

На рис. 1 приведена диаграмма Габора для сигнала с лестничной манипуляцией несущей частоты.

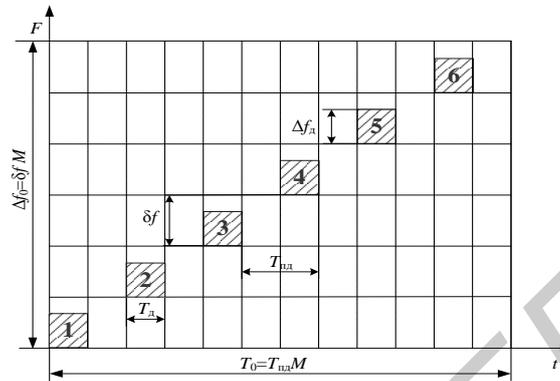


Рис. 1. Частотно-временная диаграмма Габора лестничных ДЧМС

Протяженные во времени сигналы с внутриимпульсной лестничной частотной манипуляцией, характеризующиеся большим числом парциальных дискретов, позволяют обеспечивать высокую разрешающую способность не только по радиальной дальности $\Delta r = c / (2M \cdot \delta f)$, но и по скорости $\Delta V_r = c / 2T_0 (f_0 + F_k)$. Отмеченный факт является немаловажным при решении задач классификации радиолокационных объектов.

Анализ свойств ФН проводится на примере лестничного ДЧМС с ЛЧМ дискретами при длине кода $M = 1020$ со скачком частоты $\delta f = 1$ МГц, периодом повторения ЛЧМ дискретов $T_{пд} = 20$ мкс, длительностью дискрета $T_д = 10$ мкс, девиацией частоты дискрета $\Delta f_м = \Delta f_д = 1$ МГц. Общая ширина полосы такого сигнала составляет $\Delta f_0 = 1020$ МГц, потенциальная разрешающая способность по дальности $\Delta r \approx 0,15$ м, длительность сигнала $T_0 = 20,4$ мс, потенциальное разрешение по частоте Доплера – $\Delta F_д \approx 50$ Гц. На рис. 2 приведены сечения ФН такого сигнала вертикальными $F = 0$, $F > 0$ и горизонтальной $\rho(\tau, F) = \text{const}$ плоскостями.

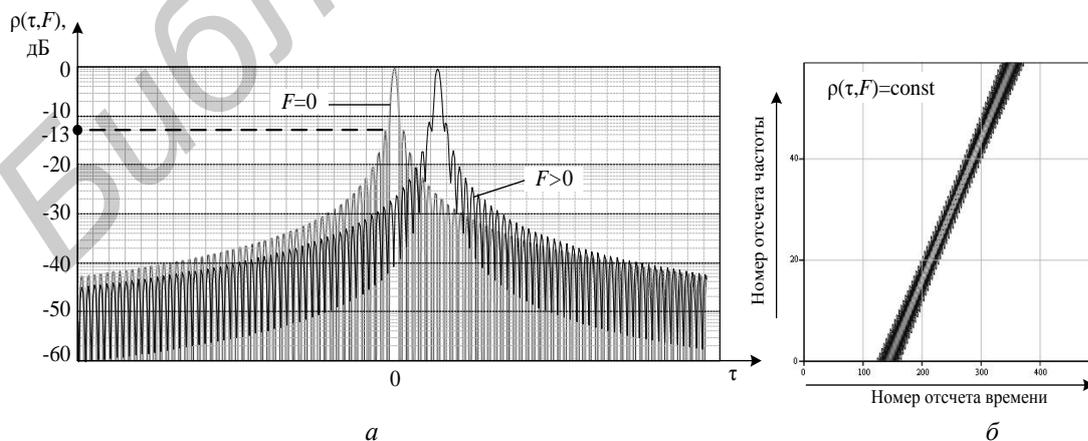


Рис. 2. Сечения ФН ДЧМС с длиной кода $M = 1020$: а – плоскостями $F = 0$, $F > 0$; б – горизонтальной плоскостью $\rho(\tau, F) = \text{const}$

Анализ полученных результатов показывает, что рассматриваемые ДЧМС характеризуются весьма значимым уровнем боковых лепестков (порядка -13 дБ), уменьшающимся по закону функции $[\sin(x)/x]^2$ (рис. 2, а). При линейном изменении несущей частоты наличие расстройки по частоте определяет величину временного сдвига сжатого импульса (рис. 2, б).

Весовая обработка лестничного дискретного частотно-манипулированного сигнала с ЛЧМ дискретами

Известно [12], что использование весовой обработки (ВО) сжатого сигнала позволяет существенно снижать уровень его боковых лепестков. С целью подтверждения отмеченного факта, на рис. 3 приведены сечения ФН ДЧМС с ЛЧМ парциальными дискретами плоскостями $F=0$, $F_{\Pi}/2 < F < F_{\Pi}$ и $F=F_{\Pi}$.

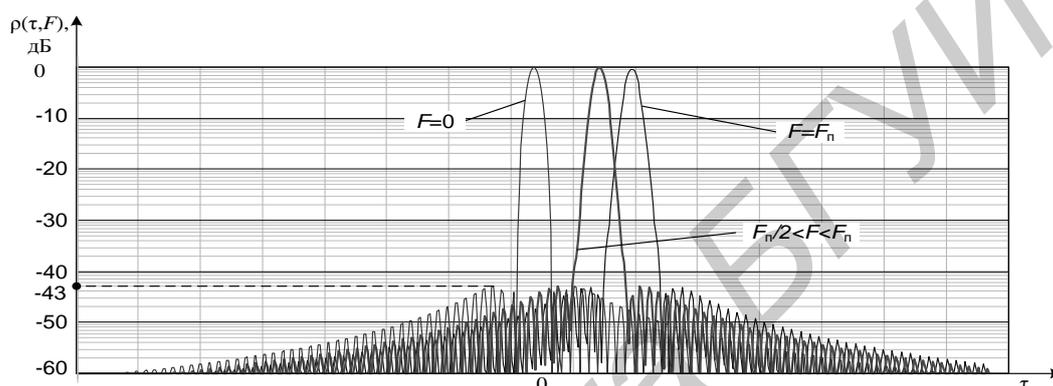


Рис. 3. Сечения ФН плоскостями $F=0$, $F_{\Pi}/2 < F < F_{\Pi}$ и $F=F_{\Pi}$ одиночного лестничного ДЧМС с ЛЧМ дискретами, ВО функцией Хемминга и длиной кода $M=1020$

Приведенный результат подтверждает, что использование весовой функции существенно снижает уровень боковых лепестков (например, для функции Хемминга -43 дБ), что полностью согласуется с теоретическими данными [12].

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 когерентной последовательности ДЧМС [5]. На рис. 4 приведена диаграмма Габора такого сигнала с лестничной частотной манипуляцией.

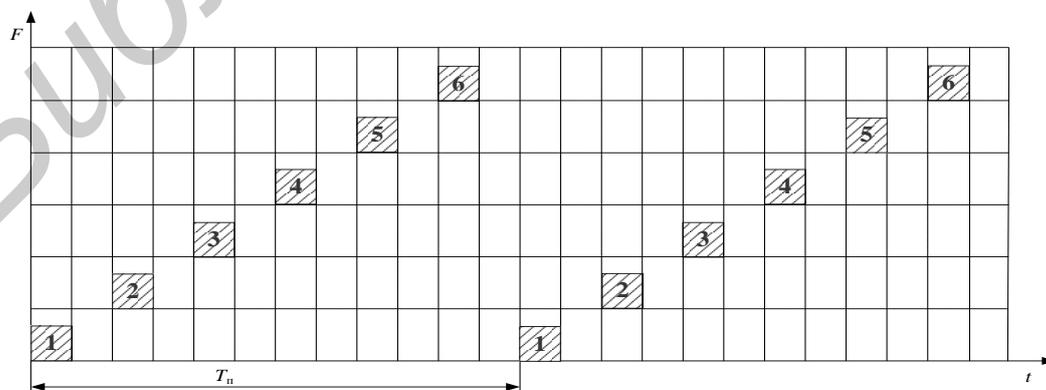


Рис. 4. Диаграмма Габора когерентной последовательности из двух лестничных ДЧМС

Анализ характеристик ФН приведен на примере когерентной последовательности из 10 ($N=10$) лестничных 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 импульса $T_d = 10$ мкс и периодом повторения $T_{пд} = 20$ мкс. Общая ширина спектра сигнала $\Delta f_0 = 1020$ МГц, длительность когерентной последовательности $T_0 = 20,4$ мс.

На рис. 5 приведены сечения ФН вертикальными плоскостями $F = 0; F_{п}/2; F_{п}$.

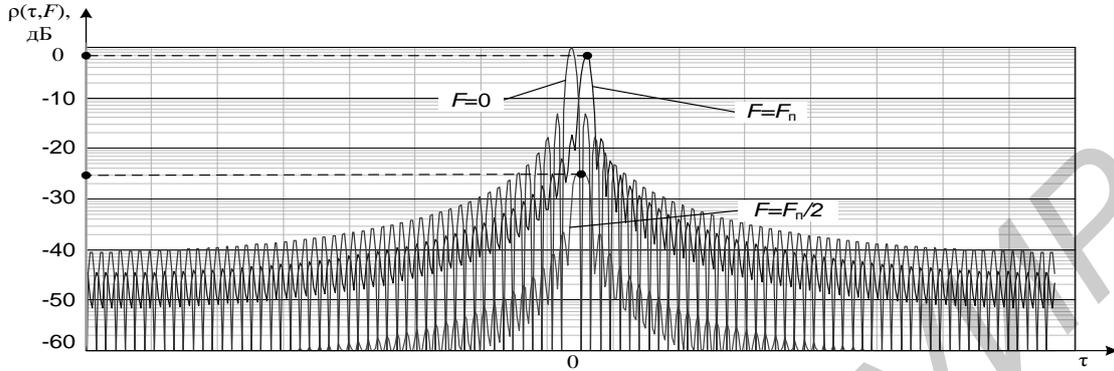


Рис. 5. Сечения ФН плоскостями $F = 0, F = F_{п} / 2$ и $F = F_{п}$ когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M = 102$

Результаты анализа подтверждают известные факты о том, что на частотах кратных $\pm F_{п}$ наблюдаются максимумы сечения ФН, которые смещены относительно главного лепестка в соответствии с существующей для данного сигнала время-частотной зависимостью. При этом, амплитуды данных максимумов практически равны величине главного лепестка. Отмеченный факт является весьма существенным при решении задачи классификации радиолокационных целей с использованием их дальностно-частотных радиолокационных портретов.

Применительно к рассматриваемому сигналу на рис. 6 представлены фрагмент тела неопределенности (ТН) и его сечение горизонтальной плоскостью $\rho(\tau, F) = \text{const}$.

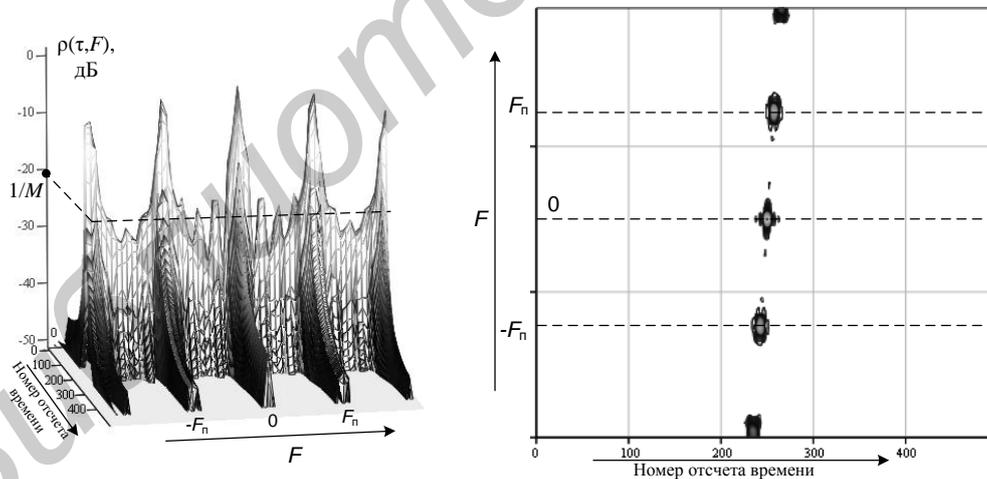


Рис. 6. Фрагмент ТН и его сечение горизонтальной плоскостью $\rho(\tau, F) = \text{const}$ когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M = 102$

Анализ полученных результатов показывает, что вдоль оси частот располагаются ярко выраженные пики (на частотах кратных $\pm F_{п}$). При этом каждый частотный пик характеризуется высоким уровнем боковых лепестков вдоль оси времени (порядка -13 дБ), а уровень боковых лепестков вдоль оси частот определяется значением $1/M$.

Весовая обработка когерентной последовательности лестничных дискретных частотно-манипулированных сигналов с ЛЧМ дискретами

Определенный интерес вызывает исследование возможности снижения уровня боковых остатков, при использовании зондирующего сигнала в виде когерентной последовательности лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами. С этой целью целесообразно использовать известные функции ВО [5].

Особый интерес представляет возможность ВО каждого одиночного ДЧМС из когерентной последовательности (рис. 7 и рис. 8, а). На рис. 7 приведены сечения ФН вертикальными плоскостями при различных расстройках по частоте.

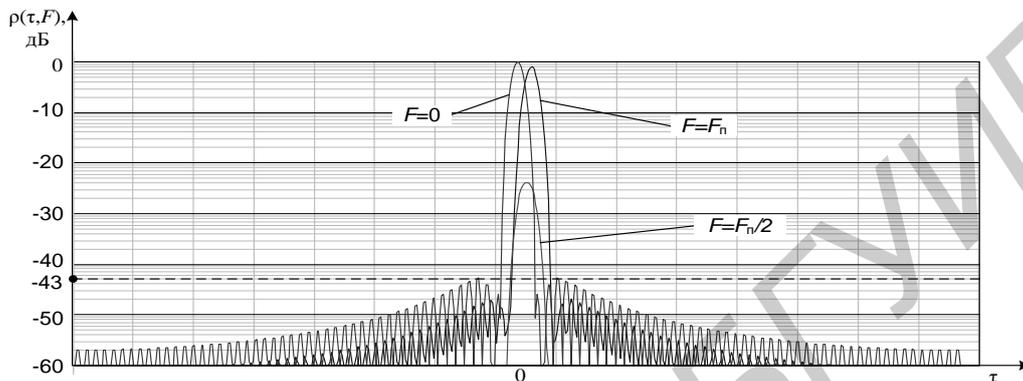


Рис. 7. Сечения ФН плоскостями $F = 0$, $F = F_n / 2$ и $F = F_n$ когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами, ВО функцией Хемминга и длиной кода $M = 1020$

Анализ показывает, что при использовании функции Хемминга уровень боковых остатков ДЧМС не превышает -43 дБ (согласуется с теоретическими данными [12]).

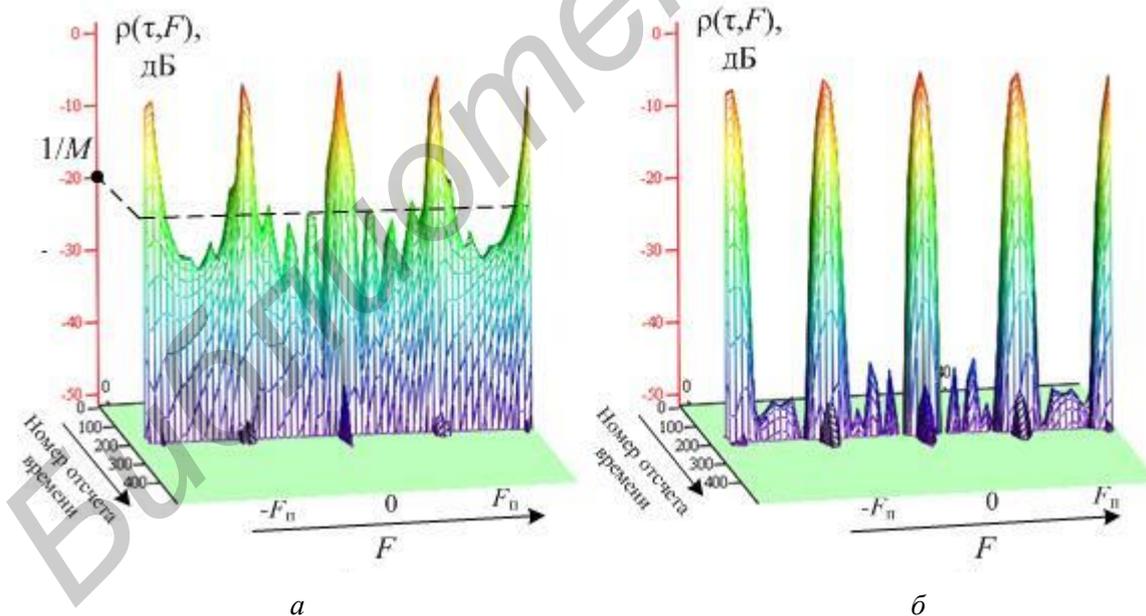


Рис. 8. Фрагмент ТН когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M = 102$ при: а – ВО каждого ДЧМС в отдельности; б – дополнительной ВО всей последовательности импульсов

На рис. 8, а показан фрагмент ТН когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами, при использовании ВО для каждого ДЧМС в отдельности. На данном рисунке наблюдается существенное снижение уровня боковых остатков вдоль временной оси. Однако уровень боковых лепестков частотных сечений определяется величиной $1/M$.

На рис. 8, б показан фрагмент ТН когерентной последовательности из 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами 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. 9 показан вид двойной весовой функции, обеспечивающей минимизацию боковых остатков сигнала в сечениях по времени и частоте, при использовании зондирующего сигнала в виде когерентной последовательности лестничных ДЧМС.

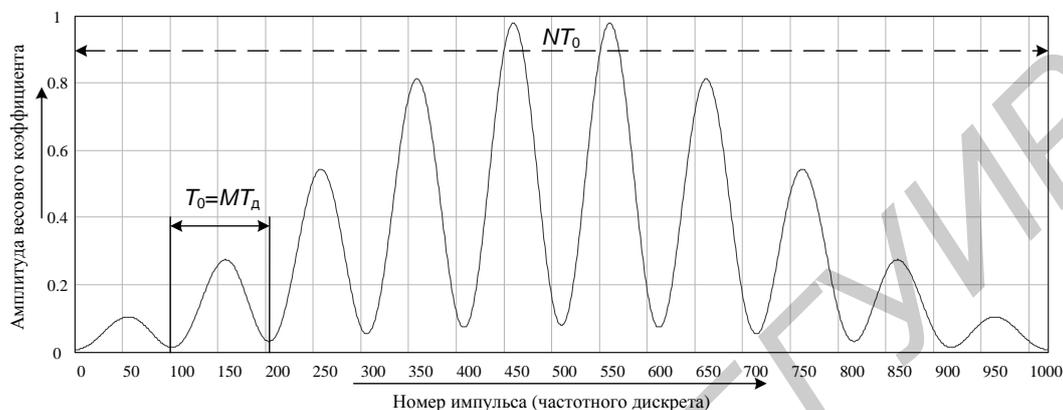


Рис. 9. Двойная весовая функция, обеспечивающая ВО функцией Хемминга когерентной последовательности 10 лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами и длиной кода $M = 102$

Проведенный анализ показывает, что использование двойной весовой функции (функция Хемминга) позволяет снизить уровень боковых остатков когерентной последовательности лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами до теоретического (порядка -43 дБ).

Заключение

Проведенный анализ свойств ФН лестничных ДЧМС с ЛЧМ дискретами подтверждает наличие высокого уровня боковых лепестков сжатого сигнала (порядка -13 дБ). Одним из способов уменьшения их уровня является использование двойной весовой обработки. Рассмотренный подход позволяет снизить уровень боковых остатков сжатого сигнала как вдоль оси времени, так и вдоль оси частот, до теоретически известного (например, для функции Хемминга -43 дБ). При этом на частотах кратных $\pm F_{\Pi}$ наблюдаются выраженные максимумы сечения ФН, которые смещены относительно главного лепестка в соответствии с существующей время-частотной зависимостью, присущей данному сигналу. Амплитуды максимумов практически соответствуют величине главного лепестка.

LEVEL DECREASING OF THE LATERAL RESTS IN THE LADDER DISCRETE IN FREQUENCY MANIPULATED SIGNALS WITH THE LINEARLY-FREQUENCY-MODULATED IMPULSES

E.N. BUILOV, S.A. GORSHKOV

Abstract

The analysis of uncertainty functions properties of the ladder discrete frequency-manipulated signals is carried out, at use in quality discrete the linearly-frequency-modulated radio impulses. Possibilities of decrease in level of lateral petals of such broadband signal are considered.

Список литературы

1. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы. Теория и применение. М., 1971.
2. Плекин В.Я. Широкополосные дискретно-кодированные сигналы в радиотехнике и радиолокации. М., 2005.
3. *Levanon N., Mozeson E. Radar Signals.* New Jersey, 2004.
4. *James D. Taylor. Ultra-Wideband Radar Technology.* New York, 2000.
5. Ширман Я.Д. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. М., 2007.
6. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М., 1985.
7. *Shirman Ya.D., Gorshkov S.A., Leshchenko S.P. et. al. Computer simulation of aerial target radar scattering, recognition, detection, and tracking/* Boston–London, 2002.
8. *Wehner D. High Resolution Radar.* Norwood, 1987.
9. Орленко В.М., Ширман Я.Д. // Электромагнитные волны и электронные системы. 1999. № 4. С. 86–89.
10. Гомозов В.И. Теория и техника формирования сложных СВЧ сигналов с высокой скоростью угловой модуляции для радиотехнических систем. Харьков, 2002.
11. Орленко В.М., Ширман Я.Д. Тенденции повышения радиолокационного разрешения. Космическая радиофизика. 1998. № 3. С. 44–51.
12. Марпл С.Л. мл. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М., 1990.