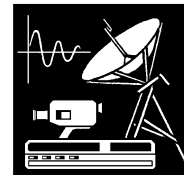


РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



УДК 621.376.56

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ С КВАЗИНЕПРЕРЫВНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ

Н.Е.Быстров, С.Д.Чеботарев

Институт электронных и информационных систем НовГУ, Sergey.Chebotarev@novsu.ru

Рассмотрены зависимости динамического диапазона квазинепрерывного энергетического спектра от его параметров. Отражены зависимости показателя качества синтеза сигнала от пик-фактора исходной троичной последовательности, уровня боковых лепестков ее периодической автокорреляционной функции, числа градаций фазы.

Ключевые слова: радиолокационные системы, сложные сигналы, квазинепрерывный энергетический спектр, критерий качества синтеза, оценка пик-фактора энергетического спектра

The dependence of the dynamic range of quasicontinuous energy spectrum on its parameters is considered. Synthesis quality characteristic dependencies on initial ternary sequence peak-factor, its periodic autocorrelation function sidelobe level and the phase gradation number are shown.

Keywords: radar systems, wideband signals, quasicontinuous energy spectrum, synthesis quality characteristic, energy spectrum peak-factor estimation

Введение

В работе [1] рассмотрен метод синтеза нового типа многофазных сигналов на основе троичных последовательностей (ТП) с идеальной и квазиидеальной периодической автокорреляционной функцией (ПАКФ), обладающих квазинепрерывной структурой энергетического спектра.

Напомним, что рассматриваемый метод синтеза многофазных сигналов с квазинепрерывным спектром заключается в использовании спектрально-корреляционных свойств исходной ТП $w_i \in \{\pm 1, 0\}$, $i = 0, \dots, N-1$, с идеальной или квазиидеальной ПАКФ. Выполнив дискретное преобразование Фурье исходной ТП, получим ее спектр:

$$\tilde{w}_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{i=0}^{N-1} w_i \exp\left(-j \frac{2\pi k i}{N}\right), \quad k = 0, \dots, N-1. \quad (1)$$

Используя дуальность частотно-временного преобразования, можно построить многофазную модулирующую последовательность:

$$d_i = \exp(j\phi_i), \quad \phi_i = \arg(\tilde{w}_i), \quad i = 0, \dots, N-1, \quad (2)$$

имеющую огибающую модуля спектра вида

$$|\tilde{d}_k| = \left| \sum_{i=0}^{N-1} d_i \exp\left(-j \frac{2\pi k i}{N}\right) \right|, \quad k = 0, \dots, N-1, \quad (3)$$

совпадающую по форме с модулем исходной ТП $|\tilde{d}_k| \approx |w_i| \in \{1, 0\}$.

В качестве иллюстрации на рис.1 приведен модуль исходной ТП длины 511 с пик-фактором 8 и амплитудный спектр синтезированного многофазного сигнала.

В огибающей амплитудного спектра синтезированного сигнала можно видеть спектральные ком-

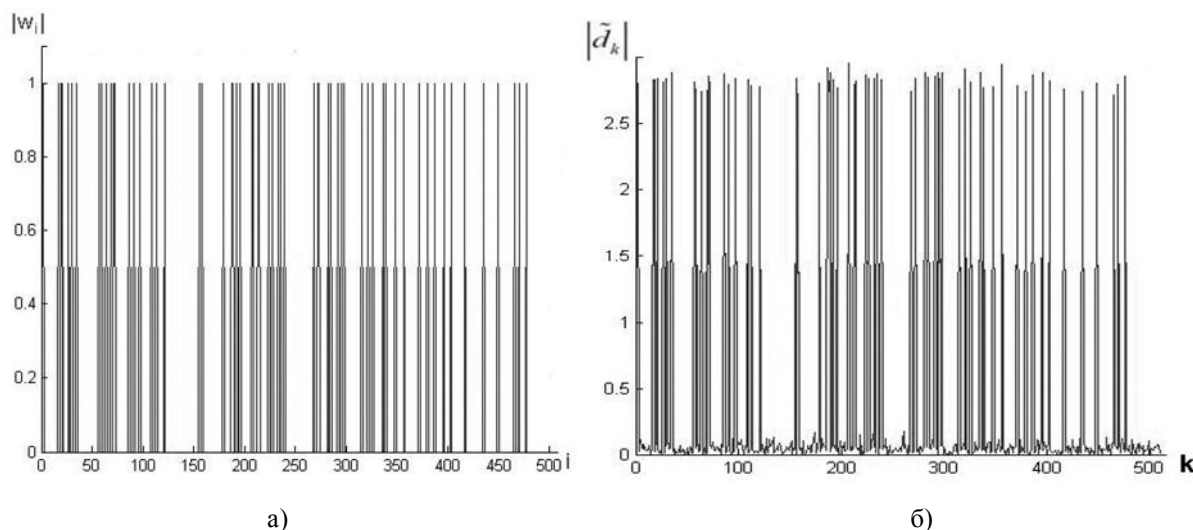


Рис. 1. а) Модуль исходной ТП; б) энергетический спектр синтезированного сигнала

поненты, сконцентрированные вблизи некоторых двух уровней, отличающихся друг от друга по амплитуде. Данные спектральные компоненты можно назвать активными и пассивными квантами. Ширина активных спектральных квантов и интервал их повторения различаются и носят псевдослучайный квазинепрерывный характер, задаваемый модулем исходной ТП.

Выполненные исследования [2] показали, что данный вид сигналов может быть применен для высокоэффективной частотной режекции мощных мешающих отражений, распределенных по задержке и сосредоточенных в узком доплеровском диапазоне.

Основным показателем эффективности частотной режекции помех и качества синтезируемых сигналов можно считать отношение среднеквадратических значений активных и пассивных спектральных компонент. Обозначив активные и пассивные отсчеты спектра соответственно $|\tilde{d}_h|$, $h=0, \dots, N_a-1$ и $|\tilde{d}_l|$, $l=0, \dots, N_p-1$ ($N_a + N_p = N$), введем показатель динамического диапазона спектральных компонент

$$\eta = \frac{\sqrt{N_p} \sqrt{\sum_{h=0}^{N_a-1} |\tilde{d}_h|^2}}{\sqrt{N_a} \sqrt{\sum_{l=0}^{N_p-1} |\tilde{d}_l|^2}}.$$

Оценка пик-фактора энергетического спектра вычисляется по формуле

$$v \approx \frac{N}{N_h}. \quad (4)$$

Динамический диапазон спектральных компонент, а также пик-фактор энергетического спектра и определяют эффективность частотной режекции мощных мешающих отражений.

В данной статье представлены результаты исследований зависимостей показателя динамического диапазона спектральных компонент синтезированных многофазных сигналов с квазинепрерывным энергетическим спектром от параметров и корреляционных свойств исходных ТП.

Оценка качества квазинепрерывного спектра синтезируемых сигналов в зависимости от числа градаций фазы

Представление отсчетов спектра (1) исходной ТП в качестве комплексного сигнала во времени (2) не искажает энергетический спектр (3) синтезированного многофазного сигнала, который в силу дуальности частотно-временного преобразования с точностью до постоянного множителя описывается модулем исходной ТП. Поэтому использование троичных последовательностей с идеальной ПАКФ и равномерным их энергетическим спектром в качестве исходных позволяет синтезировать многофазные сигналы с идеальной формой амплитудного спектра, т. е. равномерными активными и нулевыми пассивными компонентами.

Однако все вышесказанное справедливо для случая, когда в синтезированном многофазном сиг-

нале фаза может принимать все возможные непрерывные значения из диапазона $[0, 2\pi]$. В реальных цифровых системах значения фазы всегда дискретны, что делает необходимым исследование показателей синтезированных сигналов в зависимости от числа градаций фазы K_ϕ . Таким образом, фаза будет принимать значения $\varphi_i = \Delta\varphi \cdot \left\lceil \frac{\arg(\tilde{w}_i)}{\Delta\varphi} \right\rceil$, где

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{K_\phi}.$$

На рис.2 приведено семейство зависимостей показателя η синтезированных сигналов на основе ТП с идеальной ПАКФ от числа дискретных фаз K_ϕ . В качестве параметра зависимостей берется значение пик-фактора (4) квазинепрерывного спектра. Длина исходной ТП $N = 1023$.

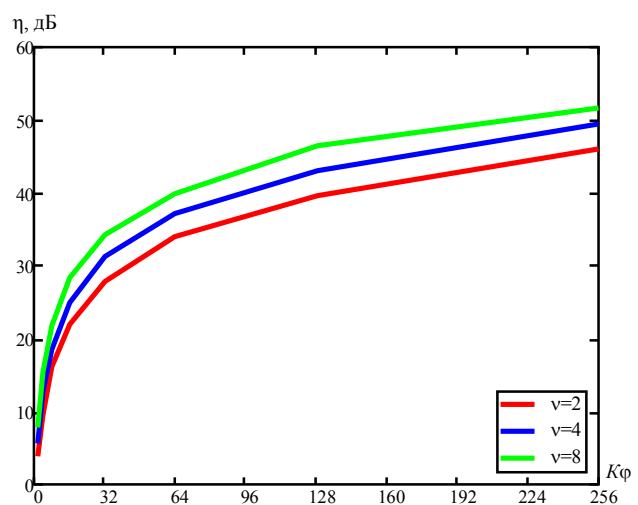
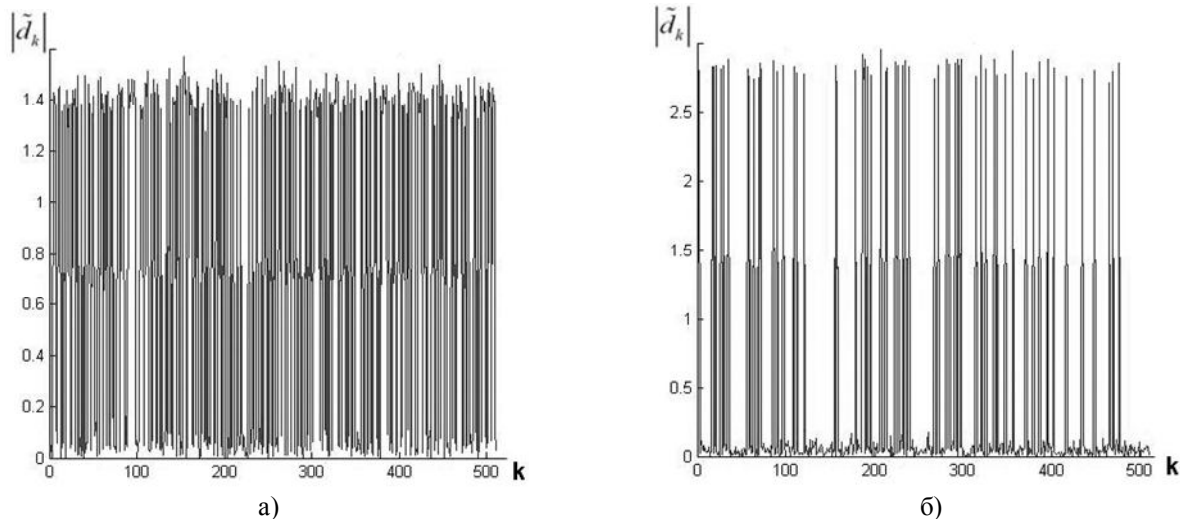


Рис.2. Семейство зависимостей показателя η от числа градаций фазы K_ϕ для различных пик-факторов квазинепрерывного спектра

Из зависимостей на рис.2 видно, что число уровней фазы сильно влияет на показатель качества квазинепрерывного спектра синтезированных сигналов. Однако в реальных условиях не представляется возможным бесконечно увеличивать число градаций фазы в силу влияния фазовых ошибок приемо-передающего тракта. Таким образом, число градаций фазы необходимо выбирать максимальным, но не противоречащим параметрам реальной системы.

Оценка качества квазинепрерывного спектра синтезируемых сигналов в зависимости от пик-фактора энергетического спектра

На рис.2 можно видеть, что на показатель качества синтеза сигналов с квазинепрерывным спектром влияет пик-фактор исходной ТП. На рис.3 приведены энергетические спектры для двух синтезированных многофазных сигналов длины 511 со значениями пик-фактора квазинепрерывного спектра $v = 2$ и $v = 8$ соответственно при дискретизации фазы на $K_\phi = 32$.

Рис.3. Энергетические спектры многофазных сигналов: а) $v = 2$; б) $v = 8$

Анализ этих энергетических спектров показал, что глубина подавления пассивных спектральных компонент составляет 27,41 дБ и 34,13 дБ, т.е. больше для сигнала с большим пик-фактором. Более полные результаты анализа представлены в нижеследующей таблице для многофазных сигналов, синтезированных на основе ТП с идеальной ПАКФ и числом градаций фазы $K\varphi = 32$.

Глубина подавления пассивных компонент в зависимости от пик-фактора квазинепрерывного энергетического спектра и длины сигнала

Пик-фактор	Длина сигнала	η , дБ
$v = 2$	511	27,41
	2047	27,83
	8191	27,89
	32767	27,79
$v = 4$	1023	31,26
	16383	31,23
$v = 8$	511	34,13

Как следует из представленных результатов, параметр η для заданных значений пик-фактора практически не зависит от длины синтезируемого сигнала. На рис.4 представлена экстраполяция графиков зависимости глубины подавления спектральных компонент от пик-фактора квазинепрерывного спектра синтезированных сигналов.

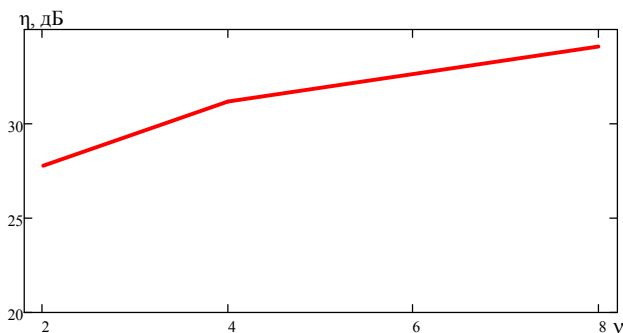


Рис.4. Экстраполяция зависимости глубины подавления пассивных спектральных компонент синтезированных сигналов от пик-фактора

Исходя из полученных данных, видно, что глубина подавления пассивных спектральных компонент η в сильной степени зависит от пик-фактора квазинепрерывного спектра. При изменении пик-фактора от 2 до 8 значение η выросло в среднем на 6 дБ.

Оценка качества квазинепрерывного спектра синтезируемых сигналов в зависимости от вида ПАКФ исходных ТП

Если в качестве исходной ТП использовать последовательность с неидеальной ПАКФ, то это приведет к флуктуациям активных и пассивных спектральных компонент (3) квазинепрерывного спектра синтезированного многофазного сигнала. Очевидно, уровень флуктуаций активных и пассивных спектральных компонент связан с рельефом боковых лепестков ПАКФ исходной ТП. Поэтому представляет интерес оценка эффективности синтеза многофазных сигналов с квазинепрерывным энергетическим спектром на основе ТП с неидеальной ПАКФ.

Рассмотрим модель построения квазиидеальной исходной ТП из идеальной ТП, искажив заданный процент символов исходной последовательности без изменения закона ее амплитудной манипуляции. Для этого произведем сопоставительный анализ квазинепрерывных спектров многофазных сигналов, синтезированных на основе ТП с идеальной и квазиидеальной ПАКФ. В качестве исходной последовательности возьмем ТП с идеальной ПАКФ длиной $N = 1023$, пик-фактором в частотной области $v = 4$ и числом уровней фазы $K\varphi = 32$ (см. рис.5).

На рис.5 четко прослеживаются два уровня амплитудного спектра. Несмотря на то, что исходная ТП обладает идеальной ПАКФ, в энергетическом спектре присутствуют ненулевые пассивные компоненты. Эта неравномерность спектральных компонент обусловлена квантованием фазы. В данном случае показатель глубины подавления пассивных спектральных компонент составил $\eta = 31,25$ дБ.

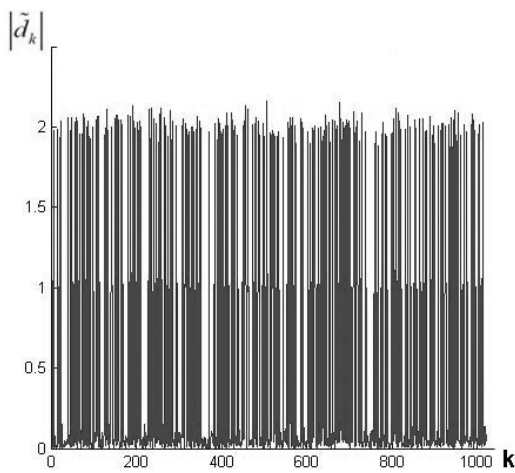


Рис.5. Энергетический спектр синтезированного сигнала

В качестве квазиидеальной ТП возьмем ту же исходную последовательность, исказив 5% символов исходной последовательности без изменения закона ее амплитудной манипуляции (см. рис.6). В данном

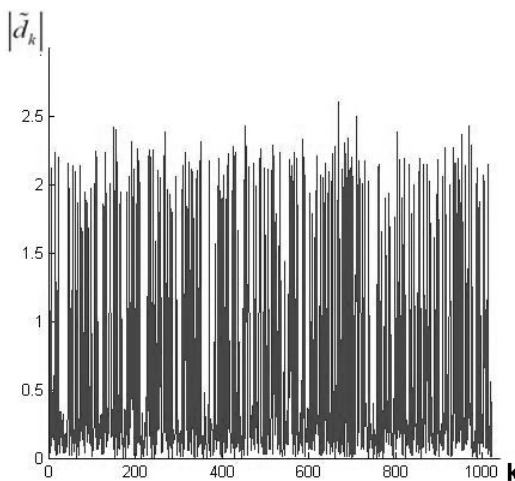


Рис.6. Энергетический спектр синтезированного сигнала

случае боковые лепестки ПАКФ исходной ТП не равны нулю — их среднеквадратический уровень составляет $-35,48$ дБ. Как показали расчеты, показатель глубины подавления пассивных спектральных компонент составил $\eta = 19,11$ дБ.

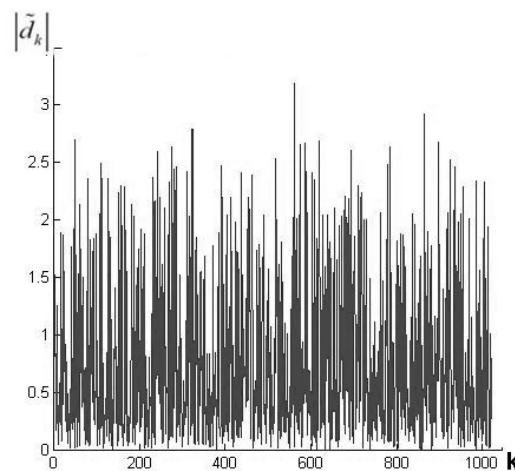


Рис.7. Энергетический спектр синтезированного сигнала

Рассмотрим случай искажения 50% символов исходной последовательности при сохранении прежней амплитудной огибающей (см. рис.7). Стоит сказать, что среднеквадратический уровень боковых лепестков ПАКФ исходной ТП для данного случая составил $-29,75$ дБ. Ожидаемо снизился и показатель качества синтеза: $\eta = 11,77$ дБ.

Построим семейство зависимостей величины η от функции, характеризующей уровень боковых лепестков ПАКФ исходной ТП.

$$\bar{R}_{\text{норм}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} |R_{\text{норм},i}|^2}{N-1}},$$

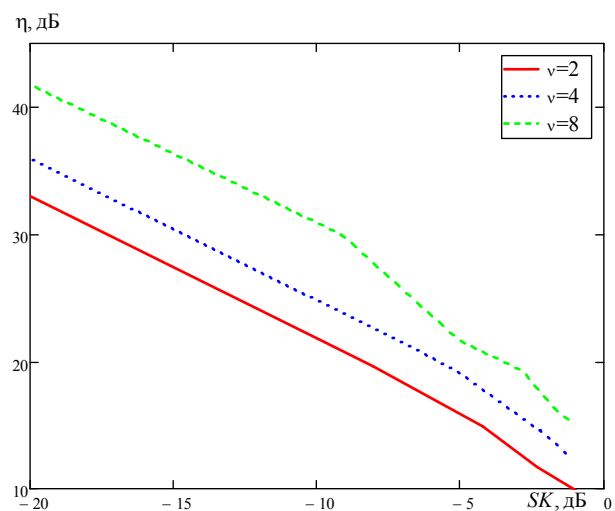
где $R_{\text{норм}}$ — нормированная ПАКФ исходной ТП; N — длина исходной ТП.

В связи с тем, что ТП различной длины обладают разным уровнем боковых лепестков ПАКФ, было принято решение нормировать функцию $\bar{R}_{\text{норм}}$ к

значению $\frac{1}{\sqrt{N}}$:

$$SK = \frac{\bar{R}_{\text{норм}}}{\frac{1}{\sqrt{N}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} |R_{\text{норм},i}|^2}{N-1}} \cdot \sqrt{N} \approx \sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} |R_{\text{норм},i}|^2}.$$

Полученное выражение фактически описывает сумму боковых лепестков нормированной ПАКФ. На рис.8 представлено семейство зависимостей η от нормированного уровня боковых лепестков ПАКФ исходных ТП при различных пик-факторах квазинепрерывного спектра, длина сигнала $N = 1023$, число уровней фазы $K\varphi = 32$.

Рис.8. Семейство зависимостей показателя η от среднеквадратического уровня боковых лепестков исходной ТП

Сравнивая полученные результаты, можно сделать вывод, что чем больше суммарный уровень боковых лепестков нормированной ПАКФ, тем меньшие значения принимает показатель эффективности синтеза сигнала η . Для получения одинаковых показателей η средний уровень боковых лепестков

ПАКФ более длинных последовательностей должен быть ниже аналогичного параметра более коротких исходных ТП. Кроме того, при равных уровнях боковых лепестков сигналы, синтезированные на основе последовательностей с большим пик-фактором квазинепрерывного спектра, имеют большие значения η .

Таким образом, на показатель η синтезируемого сигнала основное влияние оказывают два параметра: уровень боковых лепестков ПАКФ исходной ТП и число градаций фазы при квантовании многофазного сигнала. Именно эти два параметра и определяют динамический диапазон активных и пассивных спектральных компонент квазинепрерывного спектра синтезируемых многофазных сигналов.

Для повышения эффективности синтеза многофазных сигналов с квазинепрерывным энергетическим спектром целесообразно использовать ТП с дос-

точно низким уровнем боковых лепестков ПАКФ и максимально возможное число уровней фазы синтезированного сигнала.

1. Гантмахер В.Е., Быстров Н.Е., Чеботарев Д.В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. СПб.: Наука и техника, 2005. С.258-263.
2. Быстров Н.Е., Чеботарев С.Д. Энергетические показатели частотной режекции мешающих отражений // Вестник НовГУ. 2012. №67. С.4-8.

Bibliography (Transliterated)

1. Gantmakher V.E., Bystrov N.E., Chebotarev D.V. Shumopodobnye signaly. Analiz, sintez, obrabotka. SPb.: Nauka i tekhnika, 2005. S.258-263.
2. Bystrov N.E., Chebotarev S.D. Ehnergeticheskie pokazateli chastotnoj rezhekcii meshajushhikh otrazhenij // Vestnik NovGU. 2012. №67. S.4-8.