

УДК 621.391.019

А.М.Марков (5 курс, каф. РЭСЗИ), С.Б.Макаров, д.т.н., проф.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ СЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ СИГНАЛОВ С ПРОТЯЖЕННЫМИ ФАЗОВЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ

Вследствие растущей необходимости более плотного расположения каналов в эфире в системах с частотным разделением каналов для уменьшения их взаимного влияния необходимо использовать соответствующие методы модуляции, позволяющие сузить спектр передаваемой последовательности сигналов.

В качестве базового метода модуляции в данной работе выбрана манипуляция с минимальным сдвигом частоты (ММС, в английской терминологии – MSK) [1]. При такой модуляции символу $d_1^{(k)} = +1$ соответствует частота $f_0 + 1/(4T)$, а символу $d_2^{(k)} = -1$ – частота $f_0 - 1/(4T)$, где f_0 – несущая частота радиосигнала, T – длительность импульса, k – порядковый номер импульса в последовательности. При этом фаза передаваемой последовательности изменяется на интервале одного импульса на величину $\pi/2$. Благодаря непрерывности фазы последовательности сигналов с ММС (первая производная фазы уже имеет разрыв) скорость убывания энергетического спектра сигналов с ММС равна $1/\omega^4$.

Для получения более высокой скорости убывания спектра нужно переходить к более плавному изменению фазы колебаний. Для этого можно перейти к зависимым сигналам длительностью $2T$ и $3T$ и скруглять частоту по закону выбранной функции $g(t)$ [1,2]. Форму скругляющей функции $g(t)$ будем выбирать из требований получения более узкого спектра, т.к. скорость убывания энергетического спектра равна $1/\omega^{2n+2}$, где n – порядок наименьшей имеющей разрывы производной случайной последовательности сигналов. Вычисление энергетического спектра производилось усреднением по всем возможным реализациям квадрата модуля спектра случайной последовательности сигналов длиной $N \rightarrow \infty$ для равновероятных и независимых символов.

Последовательность зависимых сигналов длительностью $2T$ имеет вид:

$$s(t) = \cos(2\pi f_0 t + \frac{\pi}{2T} \int_0^t s_f(u) du),$$

где

$$s_f(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \psi_T(t-kT) \{d_r^{(k)} g(t-kT) + d_r^{(k-1)} g(T-t+kT)\}, \quad \psi_T(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}.$$

В качестве $g(t)$ будем использовать следующие функции:

1. $g(t) = \sin^2(\frac{\pi t}{2T})$ [1,2]
2. $g(t) = a_m t^m + a_{m-1} t^{m-1} + \dots + a_1 t + a_0$, где m – четное.

Функция $g(t)$ для наилучшего сужения спектра должна удовлетворять следующим условиям:

$$1) \int_0^T g(t)dt = T/2; 2) g(0) = 0, g(T) = 1; 3) g^{(i)}(0) = g^{(i)}(T) = 0, i = 1 \dots \frac{1}{2}m - 1.$$

В результате выполнения этих условий получается полином $m-1$ –го порядка. В этом случае скорость убывания спектра равна $1/\omega^{m+4}$.

Для зависимых сигналов длительностью $3T$ последовательность частотных импульсов имеет вид:

$$s_f(t) = \sum_{k=0}^{N-1} \psi_T(t - kT) \{d_r^{(k)} g(t - kT) + d_r^{(k-1)} g(t - kT + T) + d_r^{(k-2)} g(t - kT + 2T)\}.$$

Выберем $g(t) = 2/3 \sin^2(\pi/(3T))$ [1,2] и $g(t) = 8/9 \sin^4(\pi/(3T))$. Коэффициенты перед функциями $g(t)$ выбраны из условия, чтобы $\int_0^{3T} g(t)dt = T$.

На рис. 1 приведены нормированные к максимальным значениям графики энергетических спектров.

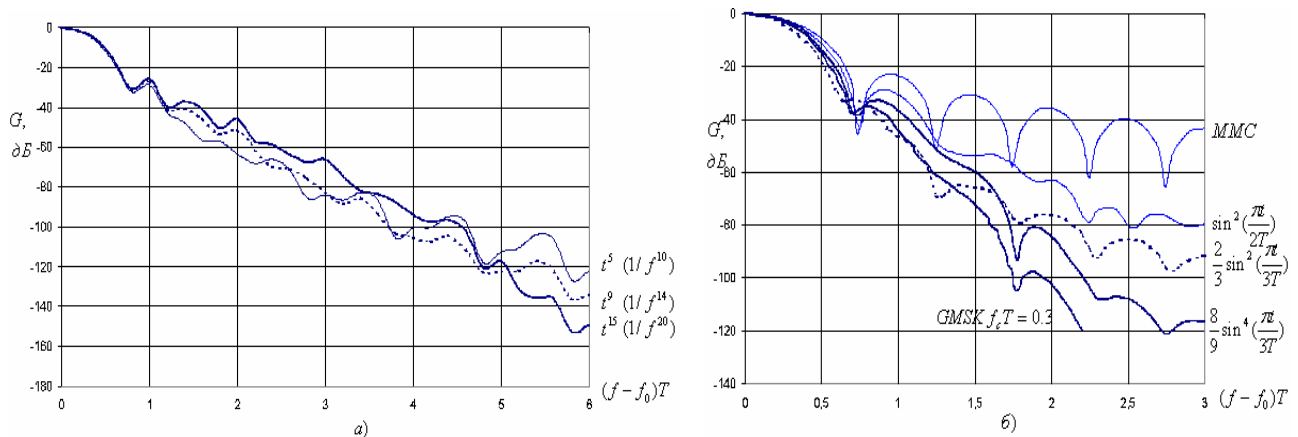


Рис. 1. Графики энергетических спектров.

а) полиномы 5, 9 и 15-го порядков для зависимых сигналов длительностью $2T$;

б) сигнал с MMC, $g(t) = \sin^2(\pi/(2T))$, $g(t) = 2/3 \sin^2(\pi/(3T))$, $g(t) = 8/9 \sin^4(\pi/3T)$, GMSK ($f_c T = 0.3$).

Использование в качестве скругляющих функций полиномов 9 и 15-го порядков позволяет добиться более быстрой скорости спада энергетического спектра только начиная с $(f - f_0)T = 4 - 6$ по сравнению с полиномом 5-го порядка. При увеличении порядка полинома происходит увеличение ширины спектра по критерию 99% содержания мощности. Минимальное значение $\Delta F_{99\%}T = 1$ среди всех полиномов и $g(t) = \sin^2(\pi/(2T))$ будет для полинома первого порядка.

При использовании зависимых сигналов длительностью $3T$ применение в качестве скругляющих функций $g(t) = 2/3 \sin^2(\pi/(3T))$ и $g(t) = 8/9 \sin^4(\pi/(3T))$ позволяет увеличить скорость спада спектра, начиная с меньших значений $(f - f_0)T$ и уменьшить полосу частот, в которой содержится 99% мощности сигналов по сравнению с использованием зависимых сигналов длительностью $2T$. Для $g(t) = 8/9 \sin^4(\pi/(3T))$ значение $\Delta F_{99\%}T = 1$, а для $g(t) = 2/3 \sin^2(\pi/(3T))$ $\Delta F_{99\%}T = 0.88$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Банкет В.Л., Дорофеев В.М. Цифровые методы в спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 1998.
2. Anderson J., Aulin T., Sundberg G. Digital Phase Modulation. – Plenum Press. New York and London. 1992.