

ИССЛЕДОВАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ФАЗО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С ДВУХКРАТНОЙ ФАЗОВОЙ МАНИПУЛЯЦИЕЙ

к.т.н. С.Г. Рассомахин, Н.Ф. Линник, В.А. Авиллов
(представил д.т.н., проф. Е.Л. Казаков)

Проведено исследование явления интерференции параллельных фазо-частотно-модулированных (ПФЧМ) сигналов вида $Lf - 2\varphi$ с целью оптимизации расчета энергетического спектра этих сигналов.

В ПФЧМ сигналах представляет интерес изучение явления интерференции. Рассмотрим ПФЧМ сигналы вида $Lf - 2\varphi$ – с двухкратной фазовой манипуляцией, где L – количество используемых частот, 2 – количество углов модуляции по фазе [3]. Простейшей реализацией такого составного сигнала является модель двухчастотного ПФЧМ сигнала $2f - 2\varphi$.

Представим реализацию двухчастотного ПФЧМ сигнала в виде

$$S(t) = \sin\left[\left(\omega_0 - \frac{\pi}{2T}\right) \cdot t\right] + \sin\left[\left(\omega_0 + \frac{\pi}{2T}\right) \cdot t\right] = v(t) \cdot \sin(\omega_0 t), \quad (1)$$

где $v(t) = 2 \cos\left(\frac{\pi}{2T} \cdot t\right)$ – комплексная огибающая; ω_0 – центральная частота в спектре.

Используя преобразование Фурье, определяем энергетический спектр комплексных огибающих для ПФЧМ сигналов вида $2f - 2\varphi$ [1, 2]:

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{1}{\pi^2} \left\{ \frac{\sin^2\left[\left(\omega - \frac{\pi}{2T}\right) \cdot \frac{T}{2}\right]}{\left(\omega - \left(\frac{\pi}{2T}\right)\right)^2} + \frac{\sin^2\left[\left(\omega + \frac{\pi}{2T}\right) \cdot \frac{T}{2}\right]}{\left(\omega + \left(\frac{\pi}{2T}\right)\right)^2} \right\} = G_n\left(\frac{\pi}{2T}\right) + G_n\left(-\frac{\pi}{2T}\right), \quad (2)$$

где G_n – энергетический спектр прямоугольной огибающей.

Для четырёхчастотного ПФЧМ сигнала вида $4f - 2\varphi$ энергетический спектр имеет вид

$$|G(j\omega)|^2 = \frac{1}{\pi^2} \left\{ \frac{\sin^2\left[\left(\omega - \frac{3\pi}{2T}\right) \cdot \frac{T}{2}\right]}{\left(\omega - \frac{3\pi}{2T}\right)^2} + \frac{\sin^2\left[\left(\omega - \frac{\pi}{2T}\right) \cdot \frac{T}{2}\right]}{\left(\omega - \frac{\pi}{2T}\right)^2} + \frac{\sin^2\left[\left(\omega + \frac{\pi}{2T}\right) \cdot \frac{T}{2}\right]}{\left(\omega + \frac{\pi}{2T}\right)^2} + \frac{\sin^2\left[\left(\omega + \frac{3\pi}{2T}\right) \cdot \frac{T}{2}\right]}{\left(\omega + \frac{3\pi}{2T}\right)^2} \right\}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\sin^2\left[\left(\omega - \frac{\pi}{2T}\right) \cdot \frac{T}{2}\right]}{\left(\omega - \frac{\pi}{2T}\right)^2} + \frac{\sin^2\left[\left(\omega + \frac{\pi}{2T}\right) \cdot \frac{T}{2}\right]}{\left(\omega + \frac{\pi}{2T}\right)^2} + \\
& + \left. \frac{2 \cos^2\left[\left(\omega - \frac{\pi}{2T}\right) \cdot \frac{T}{2}\right]}{\left(\omega - \frac{3\pi}{2T}\right)\left(\omega + \frac{\pi}{2T}\right)} + \frac{2 \cos^2\left[\left(\omega + \frac{\pi}{2T}\right) \cdot \frac{T}{2}\right]}{\left(\omega + \frac{3\pi}{2T}\right)\left(\omega - \frac{\pi}{2T}\right)} \right\} = \\
& = G_n\left(\frac{3\pi}{2T}\right) + G_n\left(-\frac{3\pi}{2T}\right) + G_n\left(\frac{\pi}{2T}\right) + G_n\left(-\frac{\pi}{2T}\right) + \\
& + G_n^1\left(\frac{3\pi}{2T}; -\frac{\pi}{2T}\right) + G_n^1\left(-\frac{3\pi}{2T}; \frac{\pi}{2T}\right), \quad (3)
\end{aligned}$$

где $G_n^1(\Delta\omega_i, \Delta\omega_l)$ – интерференционная составляющая первого порядка, аргументы $\Delta\omega_i$ и $\Delta\omega_l$, которой определяют смещение от средней частоты последующих частот параллельного сигнала, взаимодействие которых порождает интерференцию.

Интерференционная функция 1-го порядка порождается воздействием поднесущих частот, отстоящих друг от друга на величину $\Delta\omega = 2\pi/T$.

Для восьмичастотного ПФЧМ сигнала вида $8f - 2\phi$ энергетический спектр имеет вид

$$\begin{aligned}
|G(j\omega)|^2 &= G_n\left(\frac{7\pi}{2T}\right) + G_n\left(-\frac{7\pi}{2T}\right) + G_n\left(\frac{5\pi}{2T}\right) + G_n\left(-\frac{5\pi}{2T}\right) + \\
& + G_n\left(\frac{3\pi}{2T}\right) + G_n\left(-\frac{3\pi}{2T}\right) + G_n\left(\frac{\pi}{2T}\right) + G_n\left(-\frac{\pi}{2T}\right) + G_n^1\left(\frac{7\pi}{2T}; \frac{3\pi}{2T}\right) + \\
& + G_n^1\left(-\frac{7\pi}{2T}; -\frac{3\pi}{2T}\right) + G_n^1\left(\frac{5\pi}{2T}; \frac{\pi}{2T}\right) + G_n^1\left(-\frac{5\pi}{2T}; -\frac{\pi}{2T}\right) + \quad (4) \\
& + G_n^1\left(\frac{3\pi}{2T}; -\frac{\pi}{2T}\right) + G_n^1\left(-\frac{3\pi}{2T}; \frac{\pi}{2T}\right) + G_n^2\left(\frac{7\pi}{2T}; -\frac{\pi}{2T}\right) + \\
& + G_n^2\left(-\frac{7\pi}{2T}; \frac{\pi}{2T}\right) + G_n^2\left(\frac{5\pi}{2T}; -\frac{3\pi}{2T}\right) + G_n^2\left(-\frac{5\pi}{2T}; \frac{3\pi}{2T}\right) + \\
& + G_n^3\left(\frac{7\pi}{2T}; -\frac{5\pi}{2T}\right) + G_n^3\left(-\frac{7\pi}{2T}; \frac{5\pi}{2T}\right),
\end{aligned}$$

где $G_n^1(\Delta\omega_i, \Delta\omega_l)$, $G_n^2(\Delta\omega_i, \Delta\omega_l)$, $G_n^3(\Delta\omega_i, \Delta\omega_l)$ – интерференционные составляющие 1-го, 2-го и 3-го порядков, аргументы $\Delta\omega_i$ и $\Delta\omega_l$, которых характеризуют величину смещения взаимодействующих поднесущих частот от центральной частоты в спектре ПФЧМ сигнала.

Суммарный спектр любого ПФЧМ сигнала с двухкратной фазовой манипуляцией $Lf - 2\phi$ имеет вид

$$\begin{aligned}
|G(j\omega)|^2 = & \sum_{i=0}^{L/2-1} \left\{ \frac{\sin^2 \left[\left(\omega - (2i+1)\pi/2T \right) \cdot T/2 \right]}{\left(\omega - (2i+1)\pi/2T \right)^2} + \frac{\sin^2 \left[\left(\omega + (2i+1)\pi/2T \right) \cdot T/2 \right]}{\left(\omega + (2i+1)\pi/2T \right)^2} \right\} + \\
& + \sum_{n=1}^{L/2-1} \sum_{i=n}^{L/2-1} \left\{ \frac{2 \cos \Delta\varphi \cos^2 \left[\left(\omega - (2i-2n+1)\pi/2T \right) \cdot T/2 - \pi/2 \cos^2 \pi n/2 \right]}{\left(\omega - (2i+1)\pi/2T \right) \left(\omega - (2i-n+1)\pi/2T \right)} + \right. \\
& \left. + \frac{2 \cos \Delta\varphi \cos^2 \left[\left(\omega - (2i-2n+1)\pi/2T \right) \cdot T/2 - \pi/2 \cos^2 \pi n/2 \right]}{\left(\omega + (2i+1)\pi/2T \right) \left(\omega - (2i+n+1)\pi/2T \right)} \right\}, \quad (5)
\end{aligned}$$

где n – порядок интерференционной функции; $\Delta\varphi$ – угол фазового сдвига между плоскостями k -й и j -й частотных составляющих.

Выводы. 1. В энергетическом спектре двухчастотного, двухфазного ПФЧМ сигнала вида $2f - 2\varphi$ явление интерференции не возникает.

2. Порядок интерференции для ПФЧМ сигнала вида $8f - 2\varphi$ в выражении (4) определяется величиной $(\Delta\omega_i - \Delta\omega_l) / (2\pi/T)$ и характеризует расстояние по оси частот между взаимодействующими поднесущими.

3. Для определения комплексного спектра ПФЧМ сигнала с двукратной фазовой манипуляцией $Lf - 2\varphi$ необходимо взять сумму спектров сигналов с прямоугольными огибающими на поднесущих частотах $G_n^m(\omega_i)$, $m = 1 \dots L$ и интерференционных составляющих G_n .

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров С.Б., Цикин И.А. *Передача дискретных сообщений по радиоканалам с ограниченной полосой пропускания.* – М.: Радио и связь, 1988. – 110 с.
2. Зюко А.Г., Кловский Д.Д., Назаров М.В., Финк Л.М. *Теория передачи сигналов.* – М.: Радио и связь, 1986. – 304 с.
3. Суворов Н.П., Медиченко М.П. *Принципы построения модемов с параллельными составными сигналами.* – Х.: ХВВКИУ, 1981. – 52 с.

Поступила 9.08.2002

РАССОМАХИН Сергей Геннадиевич, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник отдела научного центра при ХВУ. В 1980 году окончил ХВВКИУ. Область научных интересов – исследование частотных характеристик сложных сигналов.

ЛИННИК Николай Федорович, старший инженер научного центра при ХВУ. В 1986 году окончил ХВВКИУ. Область научных интересов – исследование частотных характеристик сложных сигналов.

АВИЛОВ Василий Андреевич, начальник лаборатории Ставропольского высшего

военного инженерного училища связи, которое окончил в 1988 году. Область научных интересов – исследование частотных характеристик сложных сигналов.
