

## ОЦЕНКА ЧАСТОТНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЧМ СИГНАЛОВ

к.т.н. В.И. Барсов, к.т.н. О.Г. Лебедев, О.Г. Симонова  
(представил д.т.н. В.И. Долгов)

Проводится сравнительная оценка частотной и энергетической эффективности различных видов фазо - частотно - модулированных (ФЧМ), многоосновно кодированных (МОК) сигналов.

Одной из важных оценок эффективности различных видов сигналов является занимаемая этими сигналами полоса частот, что, в свою очередь, связано с расчетом их спектров. При решении этой задачи будем исходить из того, что многоосновный ФЧМ сигнал любого типа представляется в виде суммы двух квадратурно связанных фазо - модулированных сигналов, выражающихся в свою очередь через два типа элементарных образующих их радиоимпульсов: прямоугольного или косинусоидального [1].

Все интересующие нас случаи определения одностороннего энергетического спектра могут быть объединены в две следующие модели [2]:

- для огибающей в виде косинусоидального импульса

$$G_+(\omega) = \frac{1}{4T} \left( \frac{S_0^2 T^2}{4} \right) \left\{ \frac{\text{Sin} \left[ \omega - \omega_0 - (2l-1) \frac{\Delta\Omega}{2} \right] \frac{T}{2}}{\left[ \omega - \omega_0 - (2l-1) \frac{\Delta\Omega}{2} \right] \frac{T}{2}} + \right. \\ \left. + \frac{\text{Sin} \left[ \omega - \omega_0 + (2l+1) \frac{\Delta\Omega}{2} \right] \frac{T}{2}}{\left[ \omega - \omega_0 + (2l+1) \frac{\Delta\Omega}{2} \right] \frac{T}{2}} \right\}^2, \quad (1)$$

где  $l = 1, 2, \dots, 2^{\alpha-1}$ ,

© к.т.н. В.И. Барсов, к.т.н. О.Г. Лебедев, О.Г. Симонова, 1998

$\Delta\Omega = \frac{\pi}{T}$  - для двухфазной модуляции и  $\Delta\Omega = \frac{2\pi}{T}$  - при четырехфазной;  
 - для огибающей в виде прямоугольного импульса

$$G_+(\omega) = \frac{1}{T} \left( \frac{S_0^2 T^2}{4} \right) \left[ \frac{\text{Sin}(\omega - \omega_0) \frac{T}{2}}{(\omega - \omega_0) \frac{T}{2}} \right]^2. \quad (2)$$

Решение задачи определения полосы частот, необходимой для передачи рассматриваемых сигналов, будет проводится в рамках обобщенной модели ФЧМ сигнала [1]. Каждая из квадратурных составляющих сигнала данного типа может быть представлена в виде суммы соответствующего числа амплитудно - фазо - модулированных последовательностей сигналов, содержащих радиоимпульсы с функциями амплитудной модуляции.

Используя методику [2], с учетом нормирования составляющих суммарного спектра, можно записать обобщенное выражение для одностороннего энергетического спектра ФЧМ сигнала справедливое и при произвольном значении девиации частоты  $\Delta\Omega$

$$G_+(\omega) = \frac{1}{T} \left( \frac{S_0^2 T^2}{2^{\alpha+2}} \right) \sum_{l=1}^{2^{\alpha+1}} \left\{ \left[ \frac{\text{Sin} \left[ \omega - \omega_0 - (2l-1) \frac{\Delta\Omega}{2} \right] \frac{T}{2}}{\left[ \omega - \omega_0 - (2l-1) \frac{\Delta\Omega}{2} \right] \frac{T}{2}} \right]^2 + \left[ \frac{\text{Sin} \left[ \omega - \omega_0 + (2l-1) \frac{\Delta\Omega}{2} \right] \frac{T}{2}}{\left[ \omega - \omega_0 + (2l-1) \frac{\Delta\Omega}{2} \right] \frac{T}{2}} \right]^2 \right\}. \quad (3)$$

Таким образом, спектр многочастотного сигнала, либо последовательности многочастотных сигналов, с симметричной противофазной модуляцией представляет собой нормированную в соответствии с числом частот  $2^\alpha$  многочастотного сигнала сумму спектров составляющих его радиоим-

пульсов различных частот, фазо - модулированных несущих для всего набора частот многочастотного сигнала.

Приведенные выше рассуждения позволяют заключить, что для определения спектров многоосновных ФЧМ сигналов любого типа и, соответственно, занимаемой ими полосы частот, достаточно иметь расчеты для двух видов радиоимпульсных сигналов: прямоугольного и косинусоидального.

Для оценки эффективности различных видов многоосновных ФЧМ сигналов воспользуемся конечными расчетными соотношениями, связывающими энергетические спектры рассмотренных типов сигналов с полосой частот каждого из них для неискаженной передачи по каналу связи.

Полосу частот, занимаемую последовательностью сигналов, будем определять из условия сосредоточения в этой полосе 90% энергии сигналов, т.е.  $\Delta F_3 = \Delta F_{90\%}$ , а для определения доли энергии, сосредоточенной в полосе  $\Delta F_3$ , будем пользоваться выражением [2]

$$K\% = 100\% \frac{\int_{\omega_0 - \pi\Delta F_3}^{\omega_0 + \pi\Delta F_3} G_+(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} G_+(\omega) d\omega}. \quad (4)$$

Для прямоугольного импульса

$$K\% = 100\% \frac{2}{\pi} \left[ S_i \pi \Delta F_3 T - \frac{\text{Sin}^2 \pi \Delta F_3 \frac{T}{2}}{\pi \Delta F_3 \frac{T}{2}} \right], \quad (5)$$

где  $S_i(a) = \int_0^a \frac{\text{Sin}x}{x} dx$  - табулированная функция .

Тогда, используя выражение (4), получаем

$$\Delta F_{90\%} = \frac{1,62}{T}. \quad (6)$$

С учетом отмеченного для определения полосы, занимаемой многочастотными сигналами с огибающей в виде косинусоидального импульса,

можно прийти к простой формуле

$$K\% = \frac{100\%}{\pi} \left[ -\frac{\sin^2 \frac{(a-1)b}{2}}{(a-1)b} - \frac{\sin^2 \frac{(a+1)b}{2}}{(a+1)b} + S_1(a-1)b + S_1(a+1)b \right], (7)$$

где  $a = \frac{2\pi\Delta F_3}{(2^\alpha - 1)\Delta\Omega}$ ;  $b = \frac{\Delta\Omega T}{2}(2^\alpha - 1)$ ;

$$S_1(a) = \int_0^a \frac{1 - \cos x}{x} dx - \text{табулированная функция.}$$

В этом случае

$$\Delta F_{90\%} = \frac{1,46}{T} \dots (8)$$

Полученные простые соотношения (6) и (8) можно уже непосредственно использовать для определения частотной эффективности всех методов передачи ФЧМ сигналов, в основе которых лежат "сдвиговые" методы модуляции и многофазные одночастотные методы передачи многоосновных сигналов.

Изложенный выше подход к расчету спектров ФЧМ сигналов позволяет перейти к оценке их характеристик. Результаты расчетов, проведенных в соответствии с полученными соотношениями, вместе с соответствующими результатами оценки энергетических характеристик различных ФЧМ сигналов представлены в таблице 1.

При определении энергетической эффективности использовались числовые данные по оценке помехоустойчивости (средней вероятности ошибки, приходящейся на бит передаваемой информации) оптимальных когерентных методов обработки ансамблей биортогональных сигналов, приведенные в [3].

Анализ представленных в таблице 1 данных позволяет рекомендовать методы передачи, обладающие более высокими характеристиками по скорости убывания уровня внеполосных излучений. Предпочтительными здесь будут методы, в основе которых лежит двухчастотная модуляция с непрерывной фазой.

При стремлении улучшить энергетические характеристики метеорной системы связи серьезного практического интереса заслуживают метода ММС-4, МОК-4, 8f-4φ и КФМС-4.

Таблица 1 - Результаты оценки частотно - энергетических характеристик  
ФЧМ сигналов

Метод передачи	$\gamma_F = \Delta F_{90\%} T_B$	$\gamma_E = \frac{S_0^2 T_B}{2N_0}$		$\gamma \cdot 10^{-3} = \gamma_F \gamma_E$
		$P_{\text{ош}} = 10^{-3}$	$P_{\text{ош}} = 10^{-6}$	
ФМ -2	1,62	4,8	11,33	7,78
ФМ -4	0,81	4,8	11,33	3,9
ФМ -8	0,54	11	37	5,94
2f - 2φ	1,06	4,8	11,33	5,1
2f - 4φ	(0,87) 0,76	3,7	8,5	(3,30) 2,8
2f - 8φ	(0,65) 0,57	8	28	(5,20) 4,56
4f - 2φ	(1,04) 0,93	3,7	8,5	(3,85) 3,33
4f - 4φ	(1,15) 1,04	3,125	6,84	(3,60) 3,25
8f - 2φ	(1,28) 1,16	3,125	6,84	(4,00) 3,62
8f - 4φ	(1,72) 1,63	2,7	5,4	(4,64) 4,4
МОСК - 3	1,08	3,7	8,5	4,0
МОСК - 4	1,62	3,125	6,84	5,06
КФМС	0,81	4,8	11,33	3,9
КФМС - 3	1,08	3,7	8,5	4,0
КФМС - 4	1,62	3,125	6,8	5,06
ММС	0,73	4,8	11,33	3,5
ММС - 3	0,97	3,7	8,5	3,6
ММС - 4	1,46	3,125	6,84	4,56

## ЛИТЕРАТУРА

1. Долгов В.И., Барсов В.И., Болотнова Т.Н. Многоосновное кодирование в каналах связи с ограниченной полосой пропускания // Информационные системы: Сб. науч. тр., - Вып. 1 (5). - Харьков: НАНУ, ПАНИ, ХВУ, 1997. - С. 82 - 86.
2. Макаров С.Б., Цикин И.А. Передача дискретных сообщений по радиоканалам с ограниченной полосой пропускания. - М.: Радио и связь, 1988. - 304 с.
3. Цифровые методы в космической связи / Под ред. С. Голомба. - М.: Связь, 1969. - 272 с.