

УДК 621.391

Н.Ф. Линник

*Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков*

## **СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ФАЗОВО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННОГО СИГНАЛА**

*Проведено исследование спектральных характеристик параллельного фазово-частотно-модулированного сигнала.*

*спектральные характеристики, параллельный фазово-частотно-модулированный сигнал*

### **Введение**

**Постановка задачи.** Настоящее время – время информационных технологий и коммуникационных систем. Интернет, системы связи (в том числе находящиеся в стадии интенсивного развития – мобильные системы), телевизионные системы, системы мониторинга и другие различного назначения, менее распространенные, но не менее важные, это все проявления тенденций развития цивилизации.

Поэтому, в настоящее время происходит постоянное увеличение количества информации, передаваемой по радиоканалам, что приводит к дефициту радиочастотного спектра. В этих условиях задача повышения частотной эффективности использования канала связи становится одной из важнейших при построении современных систем передачи информации [1, 2]. Основным носителем информации всех известных и мыслимых систем описанного плана являются сигналы.

Существующие методы повышения частотной эффективности ансамблей сигналов основываются на использовании амплитудно-фазовых способов ограничения внеполосных излучений, а также на использовании частотной модуляции с минимальной девиацией частоты (ММС-сигналы) [3]. К основным недостаткам этих методов следует отнести сравнительно большой остаточный уровень внеполосных излучений, а также то, что указанные методы ориентированы на построение ансамблей с малой мощностью (числом сигналов).

Дополнительным аргументом в пользу перспективности исследований частотно-эффективных сигналов является глобальная тенденция к переходу всех аналоговых систем связи на цифровые методы передачи, которые требуют больших объемов цифровых потоков, передаваемых по каналам с ограничениями [4].

**Анализ литературы.** Анализ потенциальных свойств параллельных многочастотных многофазных сигналов, показывает, что перспективные решения по построению переносчиков информации в каналах связи систем связи и передачи данных следует искать на пути применения сложных многоосновных сигналов, к числу которых относятся параллельные фазово-частотно-модулированные (ПФЧМ) сигналы вида  $Lf-M\phi$ , где  $L$  – число поднесущих частот  $f$ , каждая из которых имеет  $M$  вариантов модуляции по фазе  $\phi$  [5, 6].

Первые разработки способов построения таких сигнальных конструкций выявили их повышенные потенциальные возможности. Впервые прототипы ПФЧМ сигналов использованы в изобретенной в США в конце 50-х годов прошлого столетия системе «Кинеплекс» [5]. В системе использованы 20 поднесущих частот, на каждой из которых с помощью относительно-фазовой манипуляции ОФМ-4 осуществлялась передача двух телеграфных сигналов со скоростью от 45 до 75 бод.

Однако, на сегодняшний день, оценки показателей, а также обоснования видов оптимальных ансамблей ПФЧМ сигналов носят весьма неоднозначный характер, что вызвано, прежде всего, несовершенством методологии спектрального анализа параллельных составных сигналов, содержащих в своем составе несколько взаимодействующих модулированных поднесущих частот.

**Целью статьи** является более глубокое изучение спектральных характеристик параллельных фазово-частотно-модулированных сигналов, что позволит реализовать предложения по формированию оптимальных ансамблей ПФЧМ сигналов.

### Основной материал

Информационно-технические характеристики ПФЧМ сигналов к настоящему времени в некоторой степени изучены [7]. Представляет интерес разра-

ботка методики описания спектральных характеристик последовательностей сигналов, в том числе и после их прохождения по каналам с ограниченным частотно-энергетическим ресурсом.

При передаче информации с помощью какого-либо ансамбля сигналов одним из основных является вопрос о необходимой частотной полосе пропускания канала связи. Естественно, емкость канала должна быть не меньше объема передаваемых сигналов. В этой связи на первый план выдвигается задача правильного определения эффективной ширины спектра  $\Delta F_{90\%}$  последовательностей сигналов.

В случае использования сигналов с несколькими поднесущими частотами, каждый из них обладает своим собственным значением показателя  $\Delta F_{90\%}$ . Спектр последовательности может быть определен двумя способами: – во-первых, как это упрощенно принято, за результирующий спектр принимается математическое ожидание, вычисленное по всем возможным спектрам отдельных сигналов ансамбля. Таким образом, спектр определяется «в среднем» и не учитывает возможных вариаций из-за частотной интерференции поднесущих колебаний; – во-вторых, в качестве характеристики ансамбля выбирается спектр тех сигналов, которые обладают наибольшей величиной  $\Delta F_{90\%}$ . Второй способ, более оправдан, так как создает для всех сигналов ансамбля равные частотно-энергетические условия для передачи. Он заключается в том, что выбор полосы пропускания канала для наихудшего случая (самый широкий спектр сигнала) гарантирует для всех остальных сигналов прохождение не менее 90% энергии за длительность интервала модуляции  $T$ .

Проведем исследования энергетического спектра на примере ансамбля ПФЧМ сигналов вида  $2f - 4\phi$ . Математическое описание произвольного сигнала ансамбля  $2f - 4\phi$  имеет вид [7]:

$$S(t) = \sum_{r=0}^1 \sin \left\{ \left[ \omega_0 + (-1)^r \frac{\pi}{T} \right] t + \phi_j^r \right\}, \quad (1)$$

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$  – средняя (несущая) частота в спектре ПФЧМ сигнала,  $\phi_j^r$  – фазовый сдвиг  $r$ -ой частотной компоненты, принимающий одно из значений  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ .

Число различных сигналов в ансамбле (мощность ансамбля)  $m = 16$ .

Несмотря на такое значение мощности, все сигналы ансамбля могут быть охарактеризованы тремя типами огибающих функций со своим значением эффективной ширины спектра  $\Delta F_{90\%}$ .

Ниже представлены три группы ПФЧМ сигналов одного ансамбля, имеющие одинаковую энергию, и определены их характеристики.

Если  $\vec{G}_k = (g_0^k, g_1^k, \dots, g_n^k) = F(s(t_\xi))$  – вектор дискретного преобразования Фурье k-го сигнала  $S_k(t)$  на интервале  $T_\Pi$ , значительно превышающем длительность сигнала  $T_\Pi \gg T$ , с шагом  $1/T_\Pi$  по оси частот, то эффективная ширина спектра  $\Delta f_k$  может быть найдена путем приближенного решения следующего трансцендентного неравенства [6]:

$$\left\{ \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{T_\Pi \cdot \Delta f_k}{2} \rfloor} \left( |g_{q-i}^k|^2 + |g_{q+i}^k|^2 \right) \leq 0,9 E_s T_\Pi - |g_q^k|^2 \right\} \leq \left\{ \sum_{i=1}^{\lfloor \frac{T_\Pi \cdot \Delta f_k}{2} \rfloor} \left( |g_{q-i}^k|^2 + |g_{q+i}^k|^2 \right) \right\}, \quad (2)$$

где  $E_s = \int_{t \in T} (s_k(t))^2 dt$  – полная энергия произвольного сигнала, одинаковая для всех  $M^L$  сигналов длительностью  $T$  данного ансамбля;  $\lfloor \dots \rfloor$  – операция округления в сторону ближайшего меньшего целого числа;  $g_q^k$  – значение комплексной гармоники спектра на центральной (несущей) частоте.

Эффективная ширина спектра для сигналов из первой группы (табл. 1, рис. 1) составляет:  $\Delta F_{90\%} \approx 4,133/T$  Гц. Это самое большое значение для сигналов данного ансамбля.

Таблица 1

Сигналы 1-й группы

| N<br>п/п | Фазы поднесущих |             | Огибающая                 |
|----------|-----------------|-------------|---------------------------|
|          | $\varphi_0$     | $\varphi_1$ |                           |
| 1        | 0               | 0           | $s = \text{Cos}[t\pi/T]$  |
| 2        | $\pi/2$         | $\pi/2$     |                           |
| 3        | $\pi$           | $\pi$       | $s = -\text{Cos}[t\pi/T]$ |
| 4        | $3\pi/2$        | $3\pi/2$    |                           |

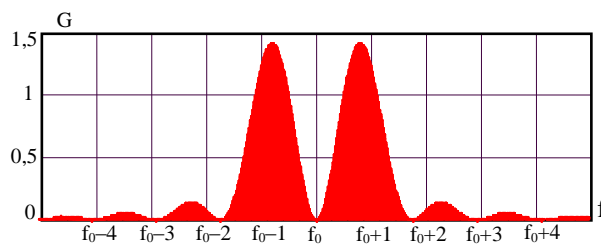


Рис. 1. Энергетический спектр сигналов 1-й группы

Эффективная ширина спектра для сигналов из второй группы (табл. 2, рис. 2) составляет:  $\Delta F_{90\%} \approx 2,28/T$  Гц. Это самая многочисленная группа для данного ансамбля. Найденное значение  $\Delta F_{90\%}$  приблизительно совпадает с математическим ожиданием эффективной ширины спектра, вычисленным «в среднем» по всем отдельным реализациям сигналов.

Эффективная ширина спектра для сигналов из

третьей группы (табл. 3, рис. 3) составляет:  $\Delta F_{90\%} \approx 1,56/T$  Гц. Это минимальное значение для данного ансамбля. Сигналы третьей группы обладают самым низким уровнем внеполосных излучений.

Таким образом, рассмотренные характеристики позволяют утверждать, что сигналы одного и того же ансамбля, имеющие одинаковый вид модуляции и фиксированные несущие частоты, обладают, тем не менее, различными спектрами. Минимальная эффективная ширина спектра составляет  $1,56/T$  Гц, максимальная –  $4,13/T$  Гц, а средняя по всему ансамблю –  $2,28/T$  Гц.

Таблица 2

Сигналы 2-й группы

| N<br>п/п | Фазы поднесущих |             | Огибающая                         |
|----------|-----------------|-------------|-----------------------------------|
|          | $\varphi_0$     | $\varphi_1$ |                                   |
| 1        | 0               | $\pi/2$     | $s = \text{Cos}[t\pi/T + \pi/4]$  |
| 2        | 0               | $3\pi/2$    |                                   |
| 3        | $\pi/2$         | $\pi$       |                                   |
| 4        | $3\pi/2$        | $\pi$       |                                   |
| 5        | $\pi$           | $\pi/2$     | $s = -\text{Cos}[t\pi/T + \pi/4]$ |
| 6        | $\pi$           | $3\pi/2$    |                                   |
| 7        | $\pi/2$         | 0           |                                   |
| 8        | $3\pi/2$        | $\pi$       |                                   |

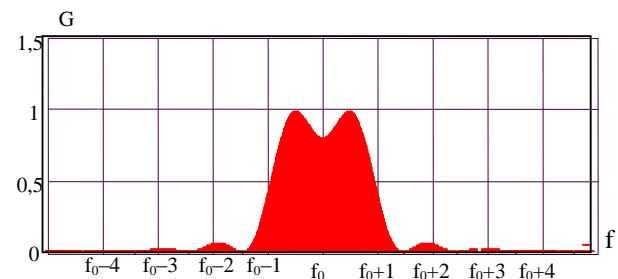


Рис. 2. Энергетический спектр сигналов 2-й группы

Таблица 3

Сигналы 3-й группы

| N<br>п/п | Фазы поднесущих |             | Огибающая                 |
|----------|-----------------|-------------|---------------------------|
|          | $\varphi_0$     | $\varphi_1$ |                           |
| 1        | 0               | $\pi$       | $s = \text{Sin}[t\pi/T]$  |
| 2        | $\pi$           | 0           |                           |
| 3        | $\pi/2$         | $3\pi/2$    | $s = -\text{Sin}[t\pi/T]$ |
| 4        | $3\pi/2$        | $\pi/2$     |                           |

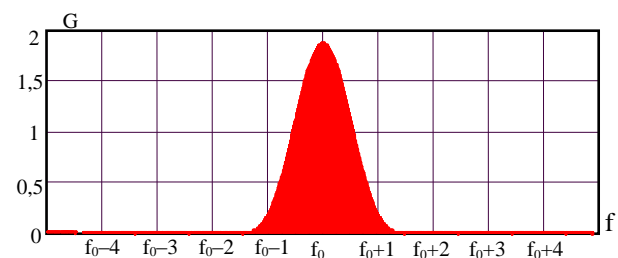


Рис. 3. Энергетический спектр сигналов 3-й группы

Основным отличием разрабатываемой методики от известных является то, что определение эффективной ширины энергетического спектра должно осуществляться не «в среднем», как принято в известных работах [5 – 7], а для каждой конкретной реализации ПФЧМ сигнала с учетом значений модуляционных параметров: частоты и фазы, как на текущем, так и на соседних интервалах модуляции.

### Вывод

При определении необходимой полосы частот канала связи необходимо учитывать различие значений эффективной ширины спектра ПФЧМ сигналов, входящих в состав одного ансамбля. Определение полосы частот по вычисленным значениям эффективной ширины энергетического спектра ПФЧМ сигналов «в среднем» влечет потери помехоустойчивости, так как не обеспечивает передачу 90% энергии отдельных сигналов ансамбля.

### Список литературы

1. Григорьев В.А., Лагутенко О.И., Раснаев Ю.А. Сети и системы радиодоступа. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.
2. Стеглов В.К., Беркман Л.Н. Телекомунікаційні мережі. – К.: Техніка, 2001. – 392 с.

3. Денисенко А.Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 704 с.

4. Рихтер С.Г. Цифровое радиовещание. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 352 с.

5. Ирвин Дж., Харль Д. Передача данных в сетях: инженерный подход. – С.-Пб.: «БХВ-Петербург», 2003. – 405 с.

6. Линник М.Ф., Рассомахин С.Г., Малахов С.В. Метод формування оптимальних частотно-ефективних ансамблів паралельних багаточастотних багаточастотних сигналів для передачі інформації // Системи управління, навігації та зв'язку. – К.: Центральний науково-дослідний інститут навігації і управління. – 2007. – Вип. 2. – С. 65-67.

7. Рассомахин С.Г., Линник Н.Ф., Авилов В.А. Исследование явления интерференции параллельных фазо-частотно-модулированных сигналов с двукратной фазовой манипуляцией // Системи обробки інформації. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 5 (21). – С. 224-226.

Поступила в редколлегию 2.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. научн. сотр. В.И. Антюфеев, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков.