

# КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ МНОГОЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ COFDM С ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

А. Ю. Родионов, Л. Г. Стаценко

*Дальневосточный государственный технический университет*

В статье рассматриваются проблемы многочастотных цифровых систем связи. Основной проблемой многочастотных сигналов является большое значение пикфактора, снижающего энергетическую эффективность системы, а также эффект нарушения ортогональности поднесущих частот в быстрых релейских каналах связи с многолучевостью. Автором рассматриваются решения, позволяющие не только уменьшить пиковую мощность сигнала, повышая, таким образом, энергетическую эффективность системы, но и разрешить проблему быстрых релейских замираний для многочастотного сигнала.

Одной из главных проблем в системах связи является передача сигналов в условиях многолучевого распространения. Актуальным решением проблемы явились многочастотные системы модуляции (COFDM). Благодаря большому числу поднесущих частот в комбинации с помехоустойчивым кодированием, возможно восстановление отдельных поднесущих, ослабленных вследствие частотно-селективных замираний в канале. При всех достоинствах многочастотных систем данный вид модуляции имеет и существенные недостатки — большое отношение пиковой мощности сигнала к его усредненной мощности (пикфактор сигнала), а также эффект нарушения ортогональности поднесущих частот в нестационарных каналах связи с многолучевостью, приводящий к взаимным перекрестным помехам между поднесущими частотами. Многочастотные сигналы также очень чувствительны к системным нестабильностям, что в отдельных случаях может приводить к существенному росту внеполосных излучений.

В работе [1] показано, что применение частотной модуляции для многочастотных сигналов позволяет получить сигнал с минимально возможным пикфактором, что позволяет использовать нелинейные усилительные и преобразовательные каскады с высокими значениями КПД.

Одной из главных задач при анализе многочастотных сигналов с частотной модуляцией COFDM-ЧМ является сведение к минимуму частотных и фазовых искажений при частотной модуляции и демодуляции. Здесь оптимальным

методом будет формирование ЧМ сигнала в передатчике и его демодуляция в приемном тракте с помощью цифровой обработки сигнала (DSP). Частотную модуляцию можно сформировать путем квадратурной модуляции с несущей частотой и предварительным формированием двух квадратурных низкочастотных сигналов

$$y_I = \cos\left(\Delta\omega \int_0^t s(t) dt\right) \text{ и } y_Q = \sin\left(\Delta\omega \int_0^t s(t) dt\right), \text{ где}$$

$\Delta\omega$  — круговая девиация частоты,  $s(t)$  — оптимально нормированная действительная часть COFDM сигнала. Демодуляцию удобно выполнить, также с помощью квадратурной обработки. Алгоритм частотной демодуляции COFDM сигнала, с помощью DSP обработки представлен функцией  $s(t) = \frac{dy_Q}{dt} y_I(t) - \frac{dy_I}{dt} y_Q(t)$ . В

данном методе модуляции-демодуляции COFDM-ЧМ сигнала сведены к минимуму частотные и фазовые искажения, так как все математические операции преобразования амплитуда-частота-амплитуда выполнены в цифровом виде, при этом выражение вероятности ошибки системы COFDM-ЧМ определяется как

$$P_e \approx \frac{2\left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}}\right)}{\log_2 \sqrt{M}} \cdot Q\left[\sqrt{\frac{9 \cdot \rho m^3}{8(M-1)}}\right], \text{ где } \rho \text{ — отношение сигнал/шум на входе ЧМ демодулятора, } m \text{ — индекс частотной модуляции [0,8—1], } M \text{ — количество точек в созвездии M-QAM на каждую поднесущую частоту COFDM сигнала.}$$

Доминирующим фактором искажений сигналов в каналах связи является дисперсионно-

многолучевая природа физических сред. Для радиосистем характерны медленные (квазистационарные частотно-селективные замирания) и быстрые релейевские замирания сигнала. Отмечена высокая помехоустойчивость многочастотных сигналов с частотной модуляцией в условиях быстрых релейевских замираний [2].

Главным достоинством многочастотных систем обработки сигнала является высокая эффективность работы в стационарных каналах с частотно-селективными замираниями. Для COFDM-ЧМ с DSP демодуляцией по предложенному алгоритму определим влияние частотно-селективных замираний. Для двухлучевой модели канала связи с одной отраженной компонентой с амплитудой  $\mu$  и задержкой  $\tau$ , выражение частотной демодуляции имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{\vec{s}_{COFDM}(t)}{\Delta\omega} &= \overline{s(t)} \times \\ &\times \left[ 1 + \mu \cos \left( \Delta\omega \int_0^t (\overline{s(t)} - \overline{s(t-\tau)}) dt \right) \right] + \\ &\frac{\overline{s(t-\tau)}\mu \times}{\overline{s(t-\tau)}\mu \times} \\ &\times \left[ \mu + \cos \left( \Delta\omega \int_0^t (\overline{s(t)} - \overline{s(t-\tau)}) dt \right) \right]. \end{aligned}$$

Для  $\mu = 1$  хорошо виден эффект глубокой амплитудной модуляции демодулированного COFDM сигнала, суммированного с отраженной компонентой. В этом случае модулирующий сигнал — это функция косинуса от гауссовского процесса с нулевым средним, поэтому данный эффект приводит только к усилению сигнала COFDM на выходе ЧМ детектора. В данном случае усиление составит 1.76 дБ. В общем случае энергетический выигрыш составит

$\Delta\rho \approx 10 \lg \left[ 1 + \frac{\mu^2}{2} \right]$ , дБ. Случай  $\mu < 1$  приводит к появлению гауссовского шума в основной полосе, тогда отношение сигнал шум на выходе ЧМ демодулятора COFDM-ЧМ сигнала будет определяться соотношением  $\rho = \frac{4 + 2\mu^2}{\mu - \mu^2}$ . Отношение сигнал/отраженная помеха для COFDM-

ЧМ равно  $\xi = \frac{4 + 2\mu^2}{4\mu^4 + 3\mu^2 - \mu}$ . Для стандартной

системы COFDM отношение мощностей основной и отраженной компоненты будет равно  $\gamma = \frac{1}{\mu^2}$ . Графики функций  $10 \lg(\rho_{\text{ЧСЗ}})$ ,

$10 \lg(\gamma_{\text{ЧСЗ}})$  и  $10 \lg(\xi_{\text{ЧСЗ}})$  изображены на рис. Анализируя полученные данные можно выделить основные преимущества и недостатки COFDM-ЧМ системы перед COFDM в условиях многолучевого распространения: при малых амплитудах отраженного сигнала COFDM-ЧМ проявляется эффект подавления многолучевости, за счет ухудшения отношения сигнал/шум; глубина частотно-селективных замираний для COFDM-ЧМ ниже по сравнению с COFDM системой; для наихудшего случая отношение сигнал/шум на выходе ЧМ демодулятора не превышает значения в 12.5 дБ,  $\mu = 0.452$  (рис.).

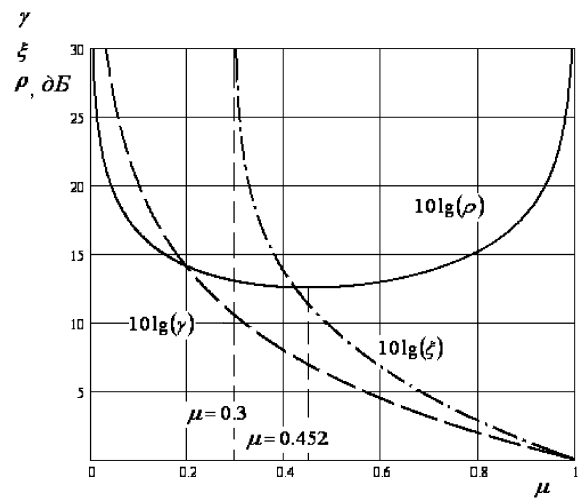


Рис. Характеристики отношения сигнал/помеха COFDM и COFDM-ЧМ системы в условиях частотно-селективных замираний

Делая общие выводы, можно говорить о возможности применения многочастотных сигналов с частотной модуляцией (COFDM-ЧМ) в нестационарных каналах с частотно-селективными замираниями, чего лишены обычные многочастотные сигналы (COFDM). В ряде случаев энергетический выигрыш многочастотных сигналов с частотной модуляцией может составлять 6 дБ. Повышение спектральной эффективности многочастотных сигналов с угловой модуляцией сопряжено с необходимым увеличением мощности, поэтому здесь надо искать компромиссные варианты, удовлетворяющие тем или иным условиям. Отметим, что найденные решения и методики для многочастотных сигналов позволяют при определенных компромиссных решениях добиваться высокой энергетической эффективности и приемлемой помехоустойчивости системы в условиях многолучевого распространения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Родионов А.Ю. Многочастотные цифровые системы связи в условиях многолучевого распространения и их энергетическая эффективность // Вестник ДВО РАН № 1, 2007. — С. 69—72.

2. Родионов А.Ю. Оценка помехоустойчивости ортогонального частотного уплотнения с частотной

модуляцией в релейском канале. Молодежь и научно-технический прогресс. Материалы региональной научно-технической конференции. — Владивосток, 2006. — С. 276—279.

*Поступила в редакцию 21.12.2006*