

В. И. Бобровский

Доктор технических наук, доцент, главный специалист ПАО «Интелтех»

А. Н. Путилин

Доктор технических наук, профессор главный научный сотрудник ПАО «Интелтех»

А. К. Скворцов

Инженер 1-й категории ПАО «Интелтех»

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ OFDM МОДЕМОВ НА ОСНОВЕ КЛИППИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ. Настоящая работа посвящена исследованию влияния уровня клиппирования, выбранного для снижения пик-фактора, на качество приёма сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием (Orthogonal frequency-division multiplexing — OFDM) в системах передачи информации с усилителем мощности, имеющим ограничение на линейный участок усиления. В статье приводится имитационная модель системы передачи OFDM сигнала с двоичной фазовой манипуляцией на 32-х поднесущих. Модель позволяет задавать произвольные уровни клиппирования. На основе этой модели делается оценка потенциальной помехоустойчивости клиппированного OFDM сигнала. В заключение приводятся рекомендации относительно способа выбора оптимального уровня клиппирования сигнала для достижения максимальной помехоустойчивости.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Декаметровая радиосвязь, клиппирование, OFDM, многочастотные сигналы, усилитель мощности, поднесущие частоты, имитационная модель, моделирование, групповой сигнал, пик-фактор, потенциальная помехоустойчивость.

Введение

Каналы декаметровой радиосвязи характеризуются малыми скоростями передачи данных, что является следствием низкой помехоустойчивости передачи сигналов, ввиду глубоких частотно-селективных замираний, вызванных отражением сигналов от различных слоев ионосферы. В целях повышения помехоустойчивости применяют многочастотные модемы, формирующие OFDM сигналы. Однако недостатком многочастотных модемов является высокий уровень пик-фактора. Поскольку высокочастотные усилители передатчика имеют ограничения на динамический диапазон передаваемых сигналов, сигнал с высоким уровнем пик-фактора на выходе таких усилителей искажается, вследствие чего возникают внутрисполосные и внеполосные искажения. Это приводит к снижению качества приёма. Для устранения этого эффекта необходимо уменьшать мощность OFDM сигнала на передаче, что приводит к сни-

жению отношения сигнал/шум (ОСШ) на приеме, а также неэффективному использованию динамического диапазона аналогово-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей (АЦП и ЦАП), что, в свою очередь, снижает помехоустойчивость системы передачи информации (СПИ) в целом.

Одним из приемов, применяемых для уменьшения пик-фактора и повышения мощности сигналов на передаче при заданной величине линейного участка усиления передатчика, является клиппирование сигнала по определённому уровню [1, 2].

На рисунке 1 приведены диаграммы сигналов, поясняющие процесс клиппирования [2]. На данном рисунке введены обозначения: $s_1(t)$ — входной неклиппированный сигнал; $s_2(t)$ — клиппированный сигнал; $s_3(t)$ — выходной усиленный клиппированный сигнал; U_{cl} — уровень клиппирования сигнала; U_{max} — максимально допустимый уровень сигнала на входе передатчика.

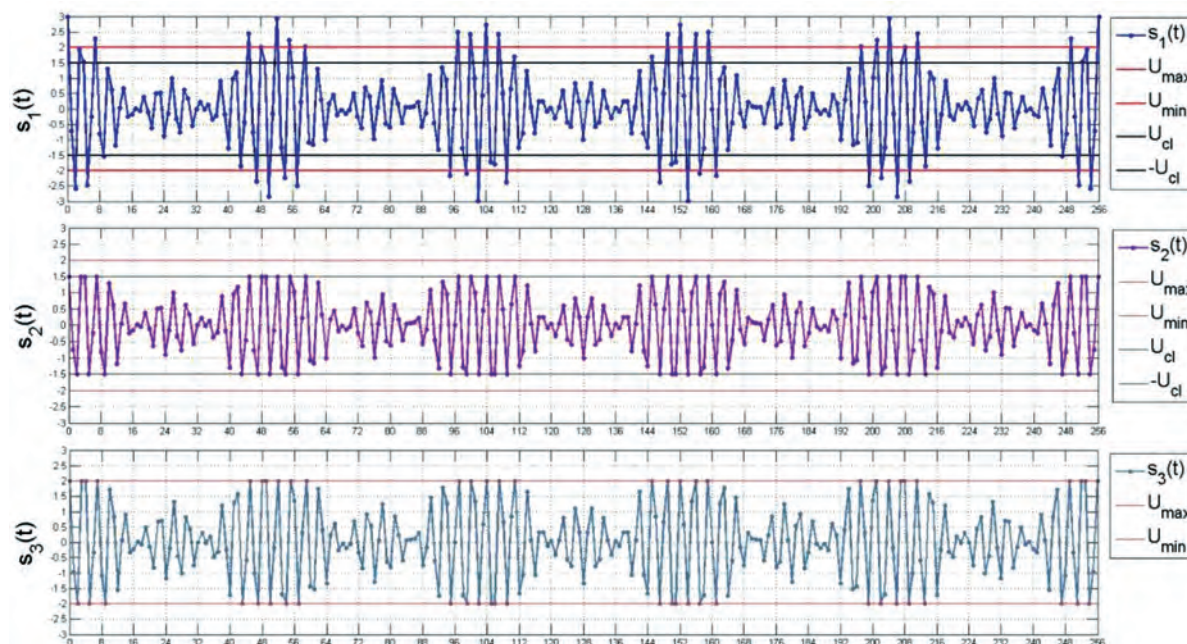


Рис. 1

Постановка задачи

В работе исследуется способ повышения помехоустойчивости СПИ OFDM сигналов на основе снижения пик-фактора группового сигнала и повышения ОСШ на входе детектора приемника, путем клиппирования OFDM сигнала и последующей полосовой фильтрацией на выходе возбуждителя передатчика.

Способ позволяет повысить помехоустойчивость СПИ OFDM сигналов в заданной полосе частот в широких пределах изменения ОСШ, при оптимальном выборе уровня клиппирования по критерию минимума вероятности ошибки на групповой символ OFDM сигнала [2].

В работах [1, 2] показано, что при уменьшении уровня клиппирования OFDM сигнала имеют место два противоположных процесса: с одной стороны повышается средняя мощность клиппированного сигнала, что повышает помехоустойчивость, а с другой — появляются паразитные гармоники, что влечет снижение помехоустойчивости СПИ. Таким образом, возникает задача поиска такого уровня клиппирования U_{cl} , который является оптимальным по критерию минимума вероятности ошибки на символ OFDM при заданном уровне шума в канале. Учитывая, что уровень клиппирования U_{cl} результирующего OFDM сигнала прямо пропорционален коэффициенту усиления G , задача

сводится к нахождению такого коэффициента усиления G , при котором частота ошибок $F_{ош}$ принимает наименьшее значение при заданном (требуемом) уровне шума в канале $h_{тр}^2$:

$$G_{опт} = \arg \min_G \left\{ F_{ош} (G, h_{тр}^2) \right\}, \quad (1)$$

где G — коэффициент усиления сигнала; $h_{тр}^2$ — требуемое ОСШ; $F_{ош}$ — частота ошибок, $G_{опт}$ — оптимальный коэффициент усиления сигнала, при котором частота ошибок $F_{ош}$ принимает наименьшее значение.

В работе задача поиска оптимального коэффициента усиления $G_{опт}$ решалась при помощи имитационной модели СПИ OFDM. По результатам имитационного моделирования получены графики зависимости частоты $F_{ош}$ ошибок от ОСШ $h_{тр}^2$ при заданной величине коэффициента усиления G , а также графики зависимости оптимального значения коэффициента усиления $G_{опт}$, в соответствии с выражением (1), и максимального выигрыша в мощности передаваемых сигналов от ОСШ $h_{тр}^2$.

Описание имитационной модели

Имитационная модель СПИ OFDM, построена в пакете MatLab Simulink. Структурная схема модели представлена на рис. 2.

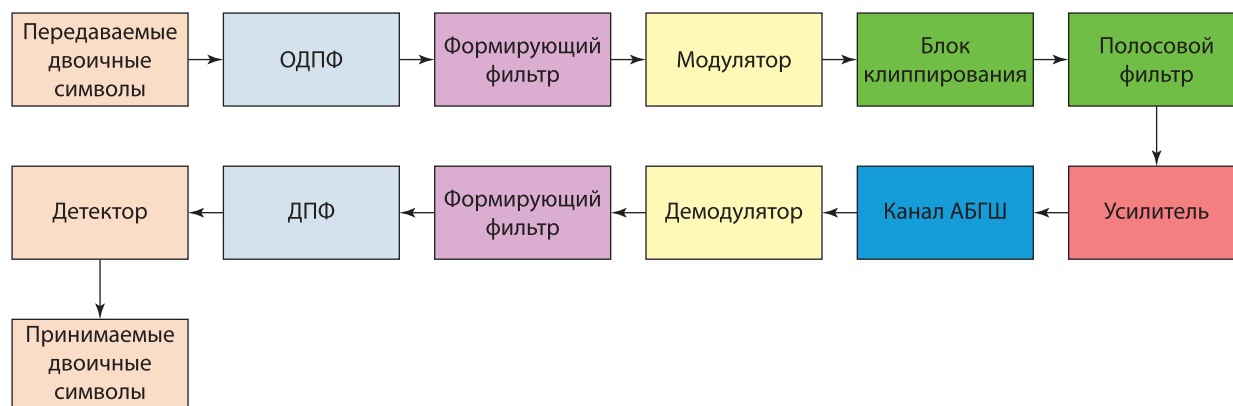


Рис. 2

Групповой OFDM сигнал согласно схеме, приведенной на рисунке 2, формируется следующим образом. Вектор двоичных символов с размерностью 32 подается на блок обратного дискретного 32-точечного преобразования Фурье (ОДПФ), после чего сигнал поступает на формирующий фильтр, предназначенный для формирования заданной полосы частот группового сигнала и подавления межсимвольных искажений. Формирующий фильтр имеет импульсную характеристику корень из приподнятого косинуса (Raised Cosine Transmitter) с коэффициентом сглаживания фильтра равным единице. Таким образом, на выходе формирующего фильтра образуется групповой OFDM сигнал на нулевой частоте. Модулятор выполняет функцию переноса группового сигнала в заданный диапазон частот в соответствии со значением несущего колебания с частотой f_0 . Моделирование выполнялось при $f_0 = 10$ МГц. Сигнал с выхода модулятора, соответствующего выходу возбуждителя передатчика, поступает в блок клиппирования, состоящий из усилителя и ограничителя амплитуды. Уровень ограничения амплитуды OFDM сигнала U_c при коэффициенте усиления $G = 1$ выбран величине, равной U_{\max} (см. рис. 1).

Моделирование выполнялось в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). На приемной стороне модели, представленной на рис. 2, выполняются действия обратные преобразования передающей стороны: демодуляция, фильтрация с характеристикой корня из приподнятого косинуса, дискретное преобразование Фурье (ДПФ) и детектирование принимаемого сигнала. В модели производится расчет частоты ошибок детектирования OFDM

сигнала, которая определяется как отношение ошибочно принятых символов к общему числу переданных символов за время моделирования.

При моделировании принималось, что мощность шума в канале не зависит от уровня клиппирования. Мощность шума рассчитывалась с учетом заданного отношения сигнал/шум.

Результаты моделирования

Результаты моделирования показали, что клиппирование позволяет повысить помехоустойчивость при определенных отношениях сигнал/шум. По результатам имитационного моделирования получены графики зависимости частоты ошибок $F_{\text{ош}}$ от ОСШ h^2 при заданной величине коэффициента усиления G . Моделирование проводилось при наличии и отсутствии полосового фильтра на выходе модели передатчика. На рис. 3 и 4 показаны графики зависимости частоты ошибок $F_{\text{ош}}$ от ОСШ h^2 при отсутствии полосового фильтра на выходе блока клиппирования (рис. 3) и при его наличии (рис. 4). Из данных графиков видно, что для каждого значения G существует оптимальное значение отношения сигнал/шум, при котором выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с теоретической кривой будет максимальным. Анализ результатов моделирования показал, что полосовая фильтрация на выходе блока клиппирования существенно влияет на частоту ошибок $F_{\text{ош}}$, при коэффициентах усиления больше полутора: $G > 1,5$.

Анализ графиков зависимостей на рис. 3 и 4 также показал, что максимальному выигрышу в помехоустойчивости соответствует оптимальный уровень усиления $G_{\text{опт}}$, соответствующий (1).

В результате решения оптимизационной задачи в работе получена зависимость значений оптимального уровня усиления $G_{\text{опт}}$ от ОСШ h^2 . График данной зависимости показан на рис. 5. Таким образом, регулируя с помощью усилителя уровень клиппирования при заданных требованиях к ОСШ на входе детектора можно снижать требования к величине линейного участка усилителя мощности, снижая, тем самым, мощности передатчика.

Рис. 5 показывает, что в случае снижения требований к ОСШ (при применении помехоустойчивых кодов) оптимальное значение усиления $G_{\text{опт}}$ возрастает в экспоненциальной зависимости до 3,7 раз.

На рис. 6 показана зависимость запаса мощности передатчика Δh^2 от ОСШ h^2 при клиппировании с применением полосовой фильтрации на выходе передатчика при оптимальном уровне усиления $G_{\text{опт}}$.

Запас мощности передатчика Δh^2 определялся следующим образом

$$\Delta h^2 = h_{\text{тр}}^2 - h_c^2, \quad (2)$$

где h_c^2 — ОСШ на выходе канала модели, при котором частота появления ошибок при клиппировании равна вероятности $P_{\text{ош тр}}$, соответствующей ОСШ $h_{\text{тр}}^2$ в СПИ, без клиппирования.

График зависимости потенциального выигрыша в мощности Δh^2 при клиппировании показывает, что применение клиппирования имеет большую эффективность при низких требованиях к ОСШ. При ОСШ свыше 10 дБ (рис. 6) применение клиппирования приводит к ухудшению потенциальной помехоустойчивости.

Имитационное моделирование проводилось для доверительной вероятности, равной 0.99 с доверительным интервалом, границы которого равны $\pm 5\%$ от среднего значения частоты ошибки. Число испытаний (выборка имитационного

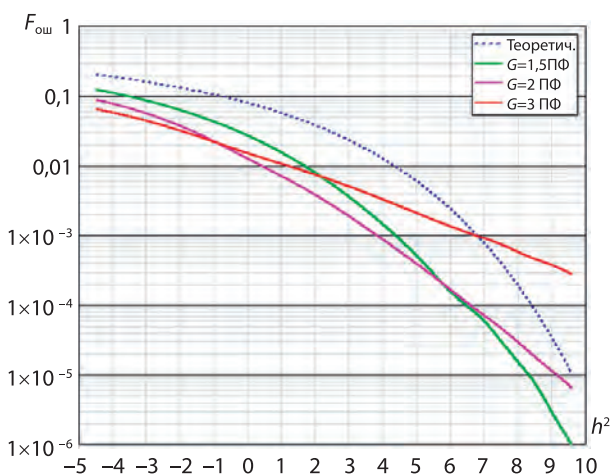


Рис. 3

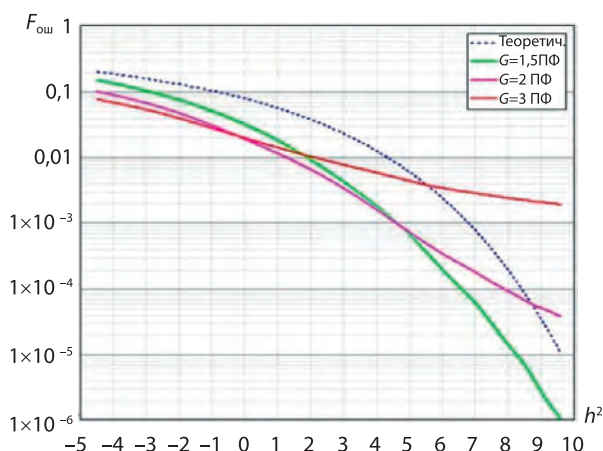


Рис. 4

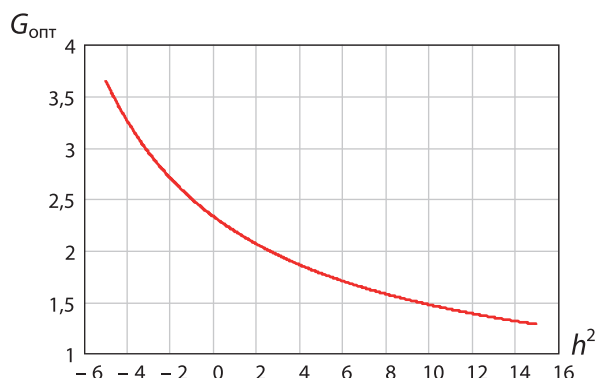


Рис. 5



Рис. 6

моделирования) при данных значениях доверительного интервала и доверительной вероятности выбиралось равным $100/F_{\text{ош ср}}$, где $F_{\text{ош ср}}$ — среднее значение частоты появления ошибок [3].

Выводы

По результатам имитационного моделирования анализируемой системы передачи OFDM сигналов можно сделать следующие выводы.

1. Клиппирование позволяет повысить помехоустойчивость передачи OFDM символов в ограниченном диапазоне отношений сигнал/шум.

2. Потенциальный выигрыш от клиппирования составляет до 5 дБ.

3. Каждому заданному значению отношения сигнал/шум соответствует оптимальный уровень клиппирования, при котором выигрыш в помехоустойчивости по сравнению со случаем без клиппирования будет максимальным.

4. Максимальному выигрышу соответствует оптимальный уровень усиления OFDM сигнала в передающем устройстве.

5. Применение клиппирования имеет большую эффективность при низких требованиях к отношению сигнал/шум. При требованиях к отношению сигнал/шум на входе приемного устройства свыше 10 дБ применение клиппирования приводит к ухудшению потенциальной помехоустойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wang L., Tellambura C. “An Overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM systems,” *Signal Processing and Information Technology*, 2006 IEEE International Symposium on, Aug. 2006, Page(s): 840–845.

2. Алейник С. В. Метод оценки уровня клиппирования речевого сигнала / С. В. Алейник, Ю. Н. Матве-

ев, А. Н. Раев // *Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики*. 2012. № 3 (79). С. 79–83.

3. Шелухин О. И. Моделирование информационных систем. Уч. пособие для вузов. — М.: Горячая линия — Телеком, 2014. — 516 с.