

АЛГОРИТМЫ ПРИЕМА МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С НЕПРЕРЫВНОЙ ФАЗОЙ В КАНАЛАХ С МЕЖСИМВОЛЬНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИЕЙ

Пак А.А.

*Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет)*

Москва, Россия

При передаче дискретных сигналов по каналу связи вследствие амплитудных и фазовых искажений может возникать межсимвольная интерференция (МСИ), которая ведет к разрушению структуры сигнала, что неизбежно приводит к ухудшению качества приема. В такой ситуации повышение мощности сигнала без дополнительной обработки не всегда улучшает достоверность приема. Разработка новых методов борьбы с МСИ, направленных на повышение помехоустойчивости приема, является актуальной задачей.

Одним из эффективных методов борьбы с МСИ является применение адаптивных выравнителей (АВ). АВ представляет собой цифровой фильтр с перестраиваемыми весовыми коэффициентами (ВК), который добавляется перед демодулятором. Перестройка ВК осуществляется в соответствии с алгоритмами выравнивания, которые можно разделить на две группы: выравнивание с применением обучающей последовательности и выравнивание вслепую.

В первом случае в начале сеанса связи передается дополнительная обучающая последовательность, которая также известна на приемной стороне и используется как эталонная. В процессе приема сигнала возможны случайные сбои, вследствие чего необходима повторная передача обучающей последовательности.

Во втором случае настройка ВК происходит в результате анализа сигнала на выходе АВ на соответствие определенному критерию. Одним из наиболее известных и эффективных критериев выравнивания вслепую является критерий (функция стоимости) Годара.

Функция стоимости Годара может быть записана в виде [1]:

$$J_p = \left(|y_k|^p - R_p \right)^2, \quad (1)$$

где y_k – k -ый отсчет сигнала на выходе АВ; $p > 0$ – целое число; R_p – положительная константа.

При этом алгоритм выравнивания выглядит следующим образом [1]:

$$C_{k+1} = C_k - \Delta \left(|y_k|^p - R_p \right) |y_k|^{p-2} y_k X_k^*, \quad (2)$$

где C_k – текущий вектор ВК АВ; C_{k+1} – вычисляемый вектор ВК АВ; Δ – шаг подстройки; X_k^* – вектор входных комплексно-сопряженных отсчетов.

Алгоритм Годара (2) показывает хорошие результаты при обработке сигналов с постоянной огибающей.

Также стоит отметить, что помехоустойчивость приема во многом зависит от выбора сигнальных форматов. Модулированные сигналы с непрерывной фазой (МНФ) представляются перспективными к использованию в системах передачи цифровой (дискретной) информации вследствие хороших спектральных и энергетических характеристик.

Математически сигналы семейства МНФ описываются следующей формулой [2]:

$$s(t, \mathbf{C}_i) = \sqrt{\frac{2E}{T}} \cos(w_0 t + j(t, \mathbf{C}_i) + j_0), \quad (3)$$

где E – энергия сигнала на одном тактовом интервале, T – длина тактового интервала, w_0 – несущая частота сигнала, j_0 – начальная фаза сигнала.

Функция $j(t, \mathbf{C}_i)$ описывает поведение фазы сигнала МНФ:

$$j(t, \mathbf{C}_i) = 2p \sum_{k=1}^i h_k c_k q[t - (k-1)T], \quad (4)$$

где h_k – индекс модуляции на k -ом тактовом интервале, $q(t)$ – функция фазового импульса (ФИ), $\mathbf{C}_i = [c_1, c_2, \dots, c_i]$ – последовательность m -ичных информационных символов.

Сигнал МНФ с индексом модуляции $h_k = 0,5$ и фазовым импульсом $q(t) = \frac{1}{2LT}$ имеет собственное название – манипуляция минимальным сдвигом (ММС) и широко применяется в современных системах связи.

На основе алгоритма Годара (2) разработан новый алгоритм выравнивания, в котором дополнительно учитывается фазовая структура ММС-сигнала. Алгоритм основан на нескольких функциях стоимости, которые могут быть записаны в виде:

$$J_1 = \left(\left(\left(\arg(y_k) - \frac{p}{4} \right) \bmod \left(\frac{p}{2} \right) - \frac{p}{4} \right)^Q + (|y_k|^p - R_p)^2 \right), \quad (5)$$

$$J_2 = \left(\left(\left(\arg(y_k) - \frac{p}{2} \right) \bmod \left(\frac{p}{2} \right) - \frac{p}{4} \right)^Q + (|y_k|^p - R_p)^2 \right), \quad (6)$$

где $Q = 2, 4, \dots$; R_p – константа ($R_p > 0$); $p = 2, 4, \dots$; y_k – очередной отсчет на выходе АВ.

На основании функций стоимости (5) подстройка вектора ВК осуществляется по формуле:

$$C_{k+1} = C_k - \Delta Q i S \left(\left(\left(\arg(y_k) - \frac{p}{4} \right) \bmod \left(\frac{p}{2} \right) - \frac{p}{4} \right)^{Q-1} \frac{1}{|y_k|^2} y_k X_k^* - \frac{2\Delta p (|y_k|^p - R_p) y_k |y_k|^{p-2} y_k X_k^*}{2\Delta p (|y_k|^p - R_p) y_k |y_k|^{p-2} y_k X_k^*} \right), \quad (7)$$

где $S = 1$ при $\arg(y_k) - \frac{p}{4} \geq 0$; $S = -1$ при $\arg(y_k) - \frac{p}{4} < 0$; i – комплексное число: $\text{Re}(i)=0$; $\text{Im}(i)=1$.

На основании функции стоимости (6) подстройка вектора ВК осуществляется по формуле:

$$C_{k+1} = C_k - \Delta Q i S \left(\left(\left(\arg(y_k) - \frac{p}{2} \right) \bmod \left(\frac{p}{2} \right) - \frac{p}{4} \right)^{Q-1} \frac{1}{|y_k|^2} y_k X_k^* - \right. \\ \left. 2\Delta p (|y_k|^p - R_p) |y_k|^{p-2} y_k X_k^* \right). \quad (8)$$

Для предлагаемого алгоритма определен следующий порядок обработки отсчетов входного ММС-сигнала:

1. На границах соседних информационных символов применяется формула (7).
2. В середине информационных символов применяется формула (8).
3. Для остальных отсчетов применяется формула (2).

Применение предложенного алгоритма показало при компьютерном моделировании повышение помехоустойчивости приема ММС-сигнала в условиях двулучевого распространения на 1,7 дБ при вероятности ошибочной демодуляции информационного символа $1 \cdot 10^{-5}$ по сравнению с известным алгоритмом Годара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dominique N. Godard Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems // IEEE Transactions on communications, Vol. COM-28, №11, Nov. 1980. – PP. 1867-1875.
2. Емельянов П.Б., Парамонов А.А. Дискретные сигналы с непрерывной фазой // Зарубежная радиоэлектроника. – 1990. – №12. – с.17-34.