

## ОЦЕНКА КАЧЕСТВА OFDM СИГНАЛА

© 2018 В. А. Брыкало, А. Г. Юрочкин

ОАО Концерн «Созвездие» (г. Воронеж, Россия)  
 Российская академия народного хозяйства и государственной службы  
 при Президенте Российской Федерации (г. Воронеж, Россия)

*В статье рассматриваются основные виды помех в радиосигнале и их влияние на результат демодуляции. Рассматриваются метрики качества радио тракта приемных модемных устройств.*

*Ключевые слова: качество радио тракта, цифровая обработка сигналов, OFDM, сдвоенный прием, эффект Доплера, избыточное кодирование.*

В условиях приема OFDM сигнала зачастую требуется проводить оценку качества канала связи для управления сопряженным оборудованием или изменения скорости приема.

В модемах стандарта MC5 (AT3104 и AT3104D) для этих целей имеется КРУ и в качестве метрики качества канала используется количество исправленных ошибок по кодовой схеме Вагнера за несколько секунд, однако эта метрика несовершенна по целому ряду причин:

- нет возможности оценить канал, если все биты приняты верно, но в сигнале присутствует сосредоточенная помеха или равномерный шум;

- при сдвоенном приеме нет возможности точно оценить степень влияния каждого канала на результат демодуляции;

- алгоритм требует много времени для синхронизации, так как сначала необходимо дождаться синхронизации самого модема, а потом уже начинать накопление результатов для КРУ;

- всегда имеется некоторая вероятность, что исправляющая схема не обнаружит ошибку в кодовой группе, если количество ошибочных бит будет четным.

Рассмотрим основные метрики, доступные при анализе OFDM сигнала и имеющие зависимость от шумовой обстановки в тракте:

- частотное смещение вследствие эффекта Доплера;

- позиция начала OFDM сообщения;

- ошибка детектирования сигнального созвездия;

- количество исправленных бит.

**Смещение по частоте.** Частотное смещение OFDM сигнала – это смещение, возникающее при различных относительных скоростях источника и приемника сигналов (эффект Доплера).

При отсутствии частотной синхронизации каждая несущая будет иметь пропорциональный прирост фазы, что в итоге отразится на результатах демодуляции (как абсолютной, так и фазоразностной).

В отсутствие частотной коррекции сигнальное созвездие сдвигается и размывается ввиду нелинейного прироста фазы.

Для детектирования частотного смещения в исходный OFDM сигнал добавляется пилот тон, отстоящий от информационного блока как минимум на частоту ортогональности несущих.

Обычно это достигается обнулением ОБПФ коэффициентов вокруг коэффициента пилот-тона (эти несущие уже не используются для модуляции) и обеспечением неразрывности его фазы. Любое искажение пилот-тона приведет к росту погрешности при определении его точной частоты, поэтому коррекция PAPR должна проводиться после генерации информационного OFDM блока, но перед добавлением пилот-тона.

Обычно, во избежание влияния замираний на синхронизацию, в сигнал добавляется несколько пилот-тонов.

В качестве метода для детектирования точной частоты пилот-тона можно использовать БПФ с большим основанием или алгоритм Герцеля.

---

Брыкало Виталий Андреевич – ОАО «Концерн «Созвездие», специалист, brykkl23089f@yanfex.ru.  
 Юрочкин Анатолий Геннадьевич – РАНХиГС при Президенте Российской Федерации, д. т. н., профессор, yuroch89udnncalexif@yanfex.ru.

Для уточнения оценки частоты пика предлагается алгоритм аппроксимации, описанный в теоретической части.

Модемному устройству требуется время на анализ и подстройку частотного смещения, поэтому на этапе синхронизации ошибки при декодировании наиболее вероятны.

По результатам моделирования можно сделать вывод: чем стабильнее частота подстройки, тем ниже вероятность ошибок. Соответственно, дисперсия последних оценок частоты смещения может являться одной из метрик качества канала.

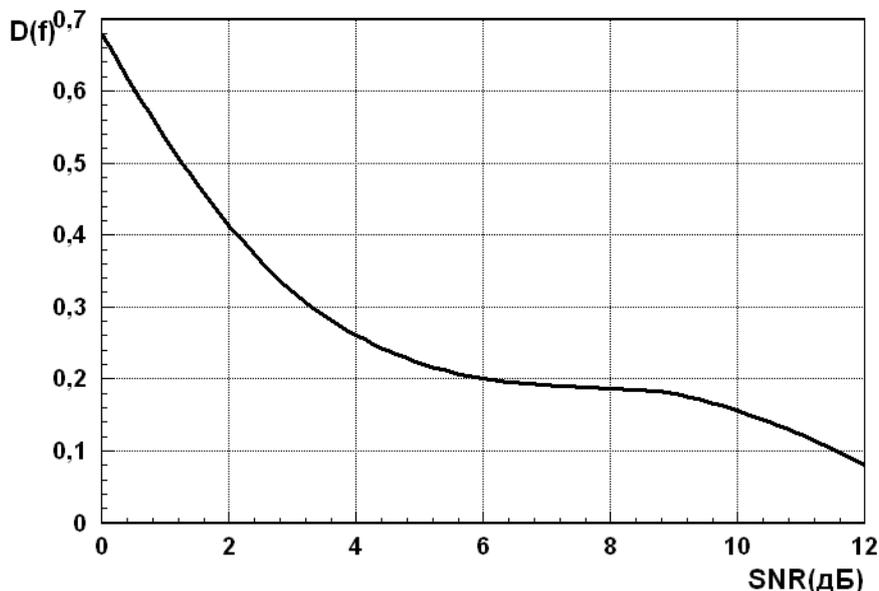


Рисунок 1. График зависимости дисперсии оценок частотного смещения от отношения сигнал/шум

Чем больше дисперсия последних оценок частоты, тем ниже качество сигнала. В итоге, без нормировки этого параметра качество сигнала можно оценивать только относительно.

Чтобы получить абсолютную оценку качества канала по частотной синхронизации, предлагается нормировка, на основе информации о пределах частотной подстройки:

$$q_f = 1 - \frac{2D[X]}{f_{max} - f_{min}}, \quad (1)$$

где  $D[X]$  – дисперсия последних оценок,  $f_{max}$  – максимальная частота пилот-тона,  $f_{min}$  – минимальная частота пилот-тона. В результате, минимальное качество равно 0 и достижимо только при чередовании значений  $f_{max}$  и  $f_{min}$  в выборке (что практически невозможно), а максимальное равно 100 и достижимо при полном отсутствии флуктуаций частоты подстройки.

**Смещение во времени.** Так как сигнал непрерывен и в процессе распространения испытывает влияние задержки среды, необходимо иметь механизм, позволяющий точно определить начало блока на приемной стороне.

Обычно для этих целей используются коррелирующие свойства циклического

префикса. В разных работах предложены методы расчета автокорреляционной функции (АФК) OFDM сигналов для оценки временного смещения.

По сути, вся задача синхронизации сводится к расчету АФК, специфичной для данного вида OFDM, и нахождению ее пикового значения. На результат синхронизации влияет общая зашумленность канала, наличие гармонических помех и условия многолучевого распространения.

В общем случае, при ухудшении качества сигнала, оценка его временного смещения начинает дрожать, как и в случае с частотной синхронизацией, поэтому в качестве метрики качества аналогично можно использовать дисперсию последних оценок. Стоит заметить, что в данном случае под оценкой временного смещения понимается индекс сигнального буфера, в который отсчеты дискретного OFDM сигнала поступают поблочно, благодаря чему и обеспечивается стабильность значения.

Как и при оценке качества частотного смещения, чем больше дисперсия последних значений, тем ниже качество сигнала. Чтобы получить абсолютную оценку качества канала по временной синхронизации, предла-

гается нормировка, на основе информации о длине полезной нагрузки OFDM блока:

$$q_t = 1 - \frac{D[X]}{t_u}, \quad (2)$$

где  $D[X]$  – дисперсия последних оценок,  $t_u$  – длина полезной нагрузки блока. В результате, минимальное качество равно 0 и достижимо только при чередовании значений 0 и  $t_u$  в выборке, а максимальное равно 100 и достижимо при полном отсутствии флуктуаций оценки временного смещения.

Ошибка определения сигнально-кодовой конструкции. Одним из самых наглядных параметров качества OFDM сигнала является среднеквадратичное значение ошибки детектирования сигнально-кодовой конструкции.

В общем случае этот параметр косвенно зависит от флуктуаций оценки частотного и временного смещений, поэтому при отсутствии параметров синхронизации, имеет смысл использовать только эту величину. В пользу описанного подхода свидетельствует возможность определения сигнально-кодовых конструкций для любого OFDM сигнала, при известных длинах сообщения и циклического префикса.

Ошибка детектирования в сигнальной позиции – это ошибка, возникающая при соотношении реальных сигнальных позиций с эталонными и по большей части зависит от общей зашумленности канала.

Если рассматривать сглаженную оценку для каждой поднесущей, то можно увидеть распределение, близкое к равномерному

На основе полученных результатов, можно сделать вывод, что для большей эффективности при оценке качества канала можно использовать как среднее значение всех последних ошибок детектирования, так и вектор распределения ошибок по несущим, чтобы иметь представление о наличии сосредоточенной помехи и степени ее влияния на результат.

Ниже приведена формула для расчета среднеквадратичного значения ошибки детектирования по поднесущим:

$$p_{sum}(n) = \sum_{i=0}^N \frac{(p(i) - p^t(i))^2}{N}, \quad (3)$$

где  $p(i)$  – текущее комплексное значение после БПФ,  $p^t(i)$  – ближайшее комплексное значение на сигнальном созвездии,  $N$  – количество несущих,  $n$  – номер пришедшего OFDM сообщения. В итоге, качество сигнала можно оценить, как:

$$q_p(n) = 1 - \frac{(1 - \alpha) \cdot p_{sum}(n - 1) + \alpha \cdot p_{sum}(n)}{p_{range}^2}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – коэффициент экспоненциального фильтра (от 0 до 1),  $p_{sum}(n)$  – оценка СКЗ ошибки детектирования по несущим на текущей итерации,  $p_{range}$  – половина наименьшего расстояния между сигнальными позициями.

**Количество обнаруженных битовых ошибок.** В любом OFDM сигнале помимо избыточности циклического префикса, который используется для компенсации влияния замираний, имеется избыточность в закодированных данных.

Эта избыточность снижает скорость передачи, однако позволяет локализовать и исправить ошибку в передаваемом блоке с помощью исправляющих кодов.

В модеме AT3104 для этой цели используется схема Вагнера – одна из самых простых схем исправления ошибок и на данный момент устаревшая.

В процессе декодирования схема обнаруживает битовую ошибку в группе и на основе информации о распределении ошибок по поднесущим принимает решение, какой бит в блоке необходимо инвертировать.

В общем случае, чем ниже качество сигнала, тем чаще исправляющая схема будет находить ошибки, поэтому количество обнаруженных ошибочных бит за определенный промежуток времени является вполне адекватной мерой качества сигнала.

Однако, как показывает практика, эта величина не обладает достаточной точностью и используется в качестве пороговой. Так, например, в аппаратном модеме AT3104 существует модуль КРУ, управляющий сопряженным оборудованием с помощью сигналов «канал годен» и «канал не годен», основываясь на количестве исправленных бит в кодовой схеме Вагнера за последние 5 секунд. Если оценка качества канала должна приходиться быстрее, этот метод оказывается неприменим.

В общем случае, качество OFDM сигнала через количество обнаруженных ошибочных бит можно выразить как:

$$q_b = 1 - \frac{1}{N_{Smax}} \sum_{i=0}^N s_{err}(i), \quad (5)$$

где  $s_{err}$  – количество ошибок при декодировании  $i$ -го OFDM сообщения,  $S_{max}$  – максимально возможное количество ошибок при декодировании сообщения,  $N$  – количество накопленных оценок.

**Общая оценка качества тракта.** После определения доступных метрик можно перейти к формуле оценки качества канала:

$$q_{sum} = \frac{1}{4}(q_f + q_t + q_p + q_b), \quad (6)$$

где  $q_f$  – оценка качества по последним оценкам частотного смещения,  $q_t$  – оценка качества по последним оценкам временного смещения,  $q_p$  – оценка качества по СКЗ ошибки сигнально-кодовых конструкций,  $q_b$  – оценка качества по количеству ошибок за последние несколько секунд.

Для более гибкой оценки предлагается добавить весовые коэффициенты:

$$q_{sum} = (\alpha q_f + \beta q_t + \gamma q_p + \delta q_b), \\ \alpha + \beta + \gamma + \delta = 1. \quad (7)$$

### ЛИТЕРАТУРА

1. Авдеев В. Б. Моделирование малогабаритных сверхширокополосных антенн / В. Б. Авдеев, А. В. Ашихмин, А. В. Бердышев, С. В. Корочин, В. М. Некрылов, А. В. Останков, Ю. Г. Пастернак, И. В. Попов, А. П. Преображенский // Под редакцией: В. Б. Авдеева, А. В. Ашихмина. – Воронеж, Издательство ВГУ, 2005. – 223 с.
2. Головинов С. О. Цифровая обработка сигналов / С. О. Головинов, С. Г. Миронченко, Е. В. Щепилов, А. П. Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2009. – № 4. – С. 064-065.
3. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. Учебник для вузов. // Изд. 2-е, переработанное и дополненное. – М., «Советское радио», 1971. – 672 с.
4. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс – 2-е изд., пер. с англ. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2006. – 656 с.
5. Львович И. Я. Моделирование электромагнитных полей, рассеянных объектом в ближней зоне беспроводных сенсорных сетей / И. Я. Львович, А. П. Преображенский, О. Н. Чопоров, Г. А. Тамбовцев // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации. Материалы 10-й Международной научно-технической конференции. Российское НТОРЭС им. А. С. Попова. – 2017. – С. 36-39.
6. Майков Д. Ю. Алгоритмы оценки параметров символьной и частотной синхронизации в мобильных OFDM-системах радиосвязи: дис. ... канд. техн. наук. Томск. гос. Университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, 2014.
7. Оппенгейм А. В. Цифровая обработка сигналов. / А. В. Оппенгейм, Р. В. Шафер – 2-е изд., испр., пер. с англ. / Под ред. С. Я. Шаца. – М.: Связь, 1979 г. – 416 с.
8. Преображенский А. П. Анализ основных электродинамических методов, используемых при разработке технических объектов / А. П. Преображенский // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2017. – № 3 (22). – С. 3-5.
9. Преображенский А. П. Оптимизация характеристик сигналов, рассеянных сложным объектом, на основе комбинированного алгоритма / А. П. Преображенский, О. Н. Чопоров // International Journal of Advanced Studies. – 2017. – Т. 7. – № 1-2. – С. 55-59.
10. Преображенский А. П. Ускорение вычислений электродинамических характеристик составного объекта / А. П. Преображенский, О. Н. Чопоров // International Journal of Advanced Studies. – 2017. – Т. 7. – № 1-2. – С. 65-69.
11. Preobrazhenskiy A. The method of estimating the parameters of the electromagnetic fields scattered by the object with complex form in the near zone of wireless sensor networks / A. Preobrazhenskiy, Ya. Lvovich, Ju Štefanovič // Information Technology Applications. – 2017. – № 1. – С. 60-72.
12. Преображенский А. П. Методы прогнозирования характеристик рассеяния электромагнитных волн / А. П. Преображенский // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2014. – № 1 (4). – С. 3.
13. Преображенский А. П. Особенности технологии OFDMA / А. П. Преображенский, О. Н. Чопоров // Вестник Воронежского института высоких технологий. – 2017. – № 4 (23). – С. 81-84.
14. Rohling H. «OFDM Concepts for Future Communication Systems» Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
15. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. / А. Б. Сергиенко. – СПб.: Питер, 2002. – 608 с.
16. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. / Б. Скляр – 2-е изд., испр., пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
17. Fazel K. Multi-carrier and spread spectrum systems: from OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX / K. Fazel, S. Kaiser. – 2nd ed., 2008.

## **ASSESSMENT OF THE QUALITY OF OFDM SIGNAL**

© 2018 V. A. Brykalo, A. G. Yurochkin

*JSC Concern «Sozvezdie» (Voronezh, Russia)  
Russian Academy of national economy and public administration under the President  
of the Russian Federation (Voronezh, Russia)*

*The main types of interference in the radio signal and their influence on the result of demodulation are considered. Discusses the quality metrics of radio path adoptive modem devices.*

*Key words: quality of radio path, digital signal processing, OFDM, dual reception, the Doppler effect, the excess coding.*