О методах синхронизации в одночастотных сетях

Представлен анализ методов кадровой синхронизации при приеме сигнала от нескольких передатчиков, объединенных в одночастотную вещательную сеть. Рассмотрены модели и структурные схемы кадровой синхронизации методами максимального правдоподобия и корреляции для OFDM системы с одной передающей станцией. Предложена расширенная модель синхронизации для двух передающих станций объединенных в одночастотную сеть. Для предложенной модели исследовано влияния относительного сдвига частоты и относительного временного сдвига на величину отношения сигнал-шум принимаемого сигнала. Проведен сравнительный анализ качества синхронизации и отношения сигнал-шум для рассмотренных методов в канале с АБГШ и доплеровским сдвигом частоты. На временных диаграммах представлено численное моделирование и показана средняя величина отклонения временной синхронизации для разных случаев приема.

Ключевые слова: одночастотные сети, кадровая синхронизация, метод максимального правдоподобия, относительного сдвига частоты, относительный временной сдвиг.

Таран А.Н.,
аспирант МТУСИ,
Trooper_bass@mail.ru,

Введение

Вещательные технологии имеют огромное значение в жизни современного человека, позволяют получить необходимую информацию в любом месте и в любое время. Тенденция развития вещания предполагает высококачественное предоставление услуг при эффективном использовании энергетических и частотных ресурсов, что способствовало широкому распространению цифровых стандартов радиовещания DAB/DAB+, DRM/DRM+ и телевещания DVB-T/H. Заметим, что все указанные стандарты телерадиовещания характеризуются применением технологии OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). В рамках данных стандартов существует возможность применения одночастотных сетей, которые используют одну несущую частоту и вещают один набор программ. Такие сети были внедрены на территории Великобритании, Германии и в ряде других странах.

Одночастотные сети получили популярность благодаря эквивалентному увеличению мощности при использовании нескольких передающих станций в одной сети. Этот эффект известен как сетевое усиление сигнала. Теоретически максимальная величина сетевого усиления рассчитывается в равноудаленной точке при равном времени задержки на распространение радиоволн до точки приема. Естественно, подобная ситуация на практике маловероятна, в ряде случаев задержка сигнала от разных передатчиков значительно меняется от места к месту, следовательно сетевое усиление будет отличаться от теоретически рассчитанной величины.

В теории и практике определение временной задержки (относительного временного сдвига) δ принимаемого сигнала играет важную роль, поскольку позволяет уменьшить негативное действие фазовых искажений на выходе OFDM-демодулятора. С помощью δ определяется положение окна БПФ, а ее точная оценка дает возможность демодулировать сигнал с наименьшей вероятностью ошибки. Помимо временного сдвига, сигнал подвержен частотным и фазовым искажениям вследствие нестабильности опорного генератора на приемной и передающей стороне или из-за доплеровского сдвига частоты. Подобное воздействие известно как относительный частотный сдвиг ε, а негативное действие выражается в появлении временной задержки после OFDM-демодулятора. Максимально достоверная оценка δ и ε имеет существенное значение при проектировании современных приемных устройств вещания, что позволяет уменьшить габариты и энергопотребление.

Оценка временной задержки δ осуществляется методами максимального правдоподобия и корреляции, используя периодическое свойство защитного интервала. Так для первого метода момент синхронизации определяется по максимуму на временной диаграмме, а для второго – минимума. Шум радиоканала не позволяет точно оценить этот параметр, поэтому в стандартах вещания используются дополнительные механизмы, корректирующие возникающие искажения [1]. Например: в стандартах с когерентном приемом используются специальные пилот-символы, а в системах с некогерентном приемом – относительные виды демодуляции.

В одночастотных сетях принимаемый сигнал представляет собой сумму сигналов с различной задержкой, следовательно, оценка параметра δ неоднозначна, а в некоторых случаях возможна оценка разных моментов времени. Величина сетевого усиления в этом случае будет меньше чем теоретически заявленная, а деградация ее зависит от качества оценки параметров. Именно проблема оценки параметров синхронизации δ и ε при приеме от разных вещательных станций одночастотной сети имеет актуальный и малоизученный характер.

Модель радиосигнала

OFDM-модуляция является ядром вещательных технологий, в основе которой лежит параллельная передача данных с защитным интервалом [2,3]. Мо-

дель принимаемого OFDM сигнала с учетом временного δ и частотного сдвига записывается как:

$$y_l[n] = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{\frac{j2\pi(k+\varepsilon)(k+\delta)}{N}} + z_l[n] \quad (1)$$

где N – число поднесущих в OFDM символе; z – белый гауссовский шум; n – временной индекс; k – частотный индекс. Отметим, что в модели частотная характеристика канала считается постоянной и равной 1. При фиксированном параметре ε, оценка параметра δ осуществляется методом максимального правдоподобия:

$$\hat{\delta} = \arg\max_{\delta}\{\sum_{i=\delta}^{N_g-1+\delta} [y[n+i]y^*[n+N+i]]\}, \quad (2)$$

где $\hat{\delta}$ – оценка момента кадровой синхронизации; y – принимаемый сигнал; * – комплексно сопряженный член. Или по минимуму модуля разности между двумя моментами:

$$\hat{\delta} = \arg\min_{\delta}\{\sum_{i=\delta}^{N_g-1+\delta} [y[n+i] - y[n+N+i]]\} \quad (3)$$

Относительный временной сдвиг выражается через задержку на распространение сигнала $\tau_з$ и рассчитывается по простой формуле:

$$\delta = \frac{\tau_з}{T_s} N_s \quad (4)$$

где T_s – период длительности OFDM символа, N_s – общее число отсчетов. Временные диаграммы двух методов представлены на рис. 1, где использовалась OFDM модуляция с N = 128 поднесущих и N_s = 160. Отсюда видно, что оценка относительного сдвига неодинакова: например, по максимуму правдоподобия его значение равно 3, а по наименьшей разнице – лишь -1. Как отмечалось во введении, грубая оценка данного параметра не позволяет эффективно демодулировать принимаемый сигнал.

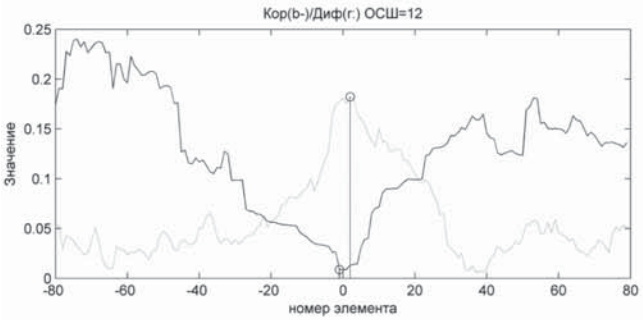


Рис. 1. Временные диаграммы

Деградация помехоустойчивости системы вследствие недостоверной оценки относительного временного сдвига продемонстрирована на рис. 2 на примере DAB/DAB+ стандарта в третьем (**mode III**) режиме работы с модуляцией DQPSK (ОФМ-4).

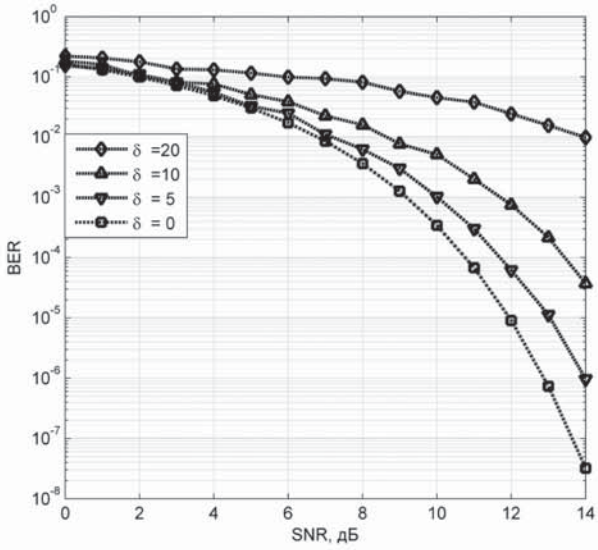


Рис. 2. Влияние относительного временного сдвига на помехоустойчивость системы

На графиках представлены случаи с величиной относительного сдвига 5, 10, 20 и 0 в качестве опорного, что соответствует временной задержке в 3 мкс, 6 мкс, 12 мкс и 0 мкс. Эффективность работы методов оценивалась с помощью среднеквадратической ошибки σ, которая в значительной степени варьировалась от значения отношения сигнала/шум (ОСШ) на входе приемного устройства, используя формулу:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_p}(\hat{\delta} - \delta)^2} \quad (5)$$

N_p – число принятых OFDM-символов, δ – действительная величина относительного временного сдвига.

На рис. 3 представлен график изменения σ от ОСШ на входе приемного устройства. На графике видно, что вследствие негативного шумового воздействия нарушается точная оценка параметра δ, которая, в свою очередь, ведет к деградации помехоустойчивости приемного устройства (см. рис. 2).

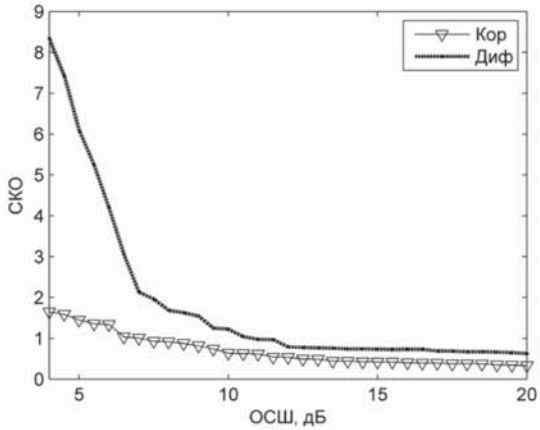


Рис. 3. Оценка СКО от отношения сигнал шум

Относительный частотный сдвиг ε по формуле (1) вызывает смещение во времени после OFDM-

демодулятора, вследствие чего нарушение ортогональности поднесущих. Расчет относительного частотного сдвига осуществляется с помощью простыхформул [1]:

$$f_d = \frac{\vartheta f_c}{c} \quad \text{и} \quad \varepsilon = \frac{f_d}{\Delta f'} \qquad (6)$$

где ϑ – скорость движения подвижного объекта (м/с), f_c – частота несущего колебания, c – скорость света $3*10^8$ м/с, Δf – частотное разнесение поднесущих. Например, для стандарта DAB в первом (**mode I**) [4] режиме работы с параметрами: f_c = 300 МГц, Δf = 1 КГц и при скоростях движения: 80,120,200 км/ч, рассчитанное значение ε равняется 0.02,0.03,0.05. На рис. 4 представлены кривые помехоустойчивости для данных случаев и опорного значения $\varepsilon = 0$. Механизм оценки относительного частотного сдвига в системе DAB делится на два этапа: грубая подстройка (Coarse AFC) и точная подстройка (Fine AFC). С помощью первого этапа определяется целочисленное значение относительного сдвига, например $\varepsilon = 1,2,5$, это позволяет приемному устройству настроиться на выбранную несущую частоту. Во втором этапе осуществляется аппроксимации корреляционной характеристики и более точная подстройка [4,5]. В системах с когерентной модуляцией, оценка параметра ε происходит с помощью пилот-символов. Анализ данных методов выходит за рамки данной статьи, этот вопрос детально описан в [1].

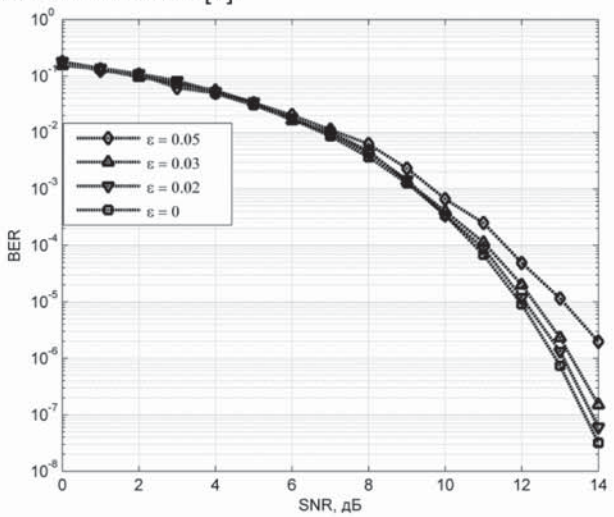


Рис. 4. Влияние относительного частотного сдвига помехоустойчивость системы

Модель вещательного сигнала. Наибольший интерес в цифровом вещании представляет многокомпонентная модель принимаемого сигнала, которая для двух передающих станций записывается:

$$y(t) = a_1 x_1(t, \delta_1, \varepsilon_1) + a_2 x_2(t, \delta_2, \varepsilon_2) + n(t) \qquad (7)$$

x_1, x_2 – передаваемый сигнал с первой и второй станции с величинами относительного временного и частотного сдвига $\delta_1, \varepsilon_1, \delta_2, \varepsilon_2$ и коэффициентами ослабления a_1, a_2. Ясно, что в данной задаче не удается оценить параметр δ однозначно, поскольку существуют два момента синхронизации – соответственно от первого приемника и от второго. Используя методы оценки относительного временного сдвига (2) и (3), на рис. 5 построены временные диаграммы с высоким значением ОСШ = 18 дБ, задержках на первой $\delta_1 = 0$ и второй $\delta_2 = 10$ станциях и равных коэффициентах ослабления $a_1 = a_2$. Рядом (справа) представлена подобная ситуация, но при задержке $\delta_2 = 20$. Как видно из графиков, для первого случая оценка параметра равны значениям $\hat{\delta} = 10$ и $\hat{\delta} = 0$, а для второго $\hat{\delta} = 17$ и $\hat{\delta} = 5$ – методами максимального правдоподобия и наименьшей разницы соответственно.

Моделирование при разных величинах коэффициента ослабления показало, что оценка $\hat{\delta}$ соответствует параметру той станции, у которой наибольшая амплитуда принимаемого сигнала. Следовательно, в зонах с равными амплитудами принимаемых сигнала возможны значительные нарушения кадровой синхронизации, что вызывает уменьшение помехоустойчивости системы в целом. Оценка влияние доплеровского сдвига частоты показала, что при произвольных сдвигах ε_1 и ε_2 и нулевых относительных временных сдвигах, отсутствует значительное уменьшение помехоустойчивости, наоборот, при незначительных временных сдвигах на второй передающей станции, наблюдалось значительное увеличение вероятности ошибки.



Рис. 5. Временные диаграммы для двух вещательных станций

Оценка параметров кадровой синхронизации на сегодняшний день основана на методах максимального правдоподобия и наименьшей разницы. Широкое распространение одночастных сетей способствует созданию более совершенных приемных уст-

ройств, но методы кадровой синхронизации, основанные только на априорной информации, не позволяют с высокой точностью решить данную задачу. Как показало численное моделирование, наибольшее ухудшение наблюдается в областях с равными амплитудами принимаемого сигнала, где, по крайней мере, ожидается наибольшее сетевое усиление. Именно такая проблема требует нового взгляда с позиции внедрения априорных алгоритмов оценивания. Современные системы навигации имеют высокую точность вычисления местоположения подвижного объекта и, следовательно, в первом приближении, может быть измерена задержка сигнала от разных станций, и здесь, по мнению автора, лежит ключ к решению данной проблемы.

Литература

1. *Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang, Chung G. Kang.* MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB, John Wiley & Sons (Asia) Pte Ltd., 2010. – 440 p.

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

3. *Волков Л., Немировский М., Шинаков Ю.* Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 393 с.

4. *Gandy C.* DAB: an introduction to the Eureka DAB System and a guide to how it works. http://downloads.bbc.co.uk/rd/pubs/whp/whp-pdf-files/WHP061.pdf, 2003. – 109 p.

5. *Schulze H., Luders C.* Theory and Applications of OFDM and CDMA John Wiley & Sons Inc., 2005 . – 421 p.