

УДК 621.396

АЛГОРИТМ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ И ОЦЕНИВАНИЯ МОЩНОСТИ ШУМА, ИНВАРИАНТНЫЙ К МНОГОЛУЧЕВОСТИ И ВИДУ МОДУЛЯЦИИ

© 2012 Р. Р. Халилов

ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ–Прогресс», г. Самара

Представлен алгоритм тактовой синхронизации и оценивания мощности шума, основанный на использовании повторяемости частей многолучевого сигнала.

Сигнал, тактовая синхронизация, дисперсия канального шума, имитационное моделирование, многолучево́сть.

Введение

Повышение скорости передачи информации без перехода в другой частотный диапазон практически приводит к межсимвольной интерференции (МСИ) на приеме [1, 2]. При этом увеличение скорости передачи сообщения желательно сопровождать не только увеличением канальной скорости, но и увеличением скорости информационной. Поэтому сейчас преимущественно развиваются методы приема информации в каналах с МСИ без использования специальных тест-сигналов [3].

На передающей стороне формируется поток сигнальных элементов, имеющих одинаковую длительность T , называемую тактовым интервалом. На приемной стороне демодулятору должны быть известны моменты времени, соответствующие границам принимаемых элементов сигнала с учетом времени распространения сигнала в радиоканале (характеристические моменты). Определение этих моментов осуществляется в системе тактовой синхронизации приемника. Обычно величина T задается высокостабильными генераторами тактовой частоты и считается известной точно. Поэтому задача синхронизации заключается в определении фазового сдвига сетки тактовых импульсов, подаваемых на демодулятор в качестве характеристических моментов, относительно таких же импульсов высокостабильного эталонного генератора.

В статье предлагается алгоритм совместного оценивания дисперсии канального шума и нахождения характеристических моментов сигнала, основанный на структурном анализе принимаемого сигнала.

В отсутствие многолучево́сти основой для синтеза устройства тактовой синхронизации является момент перехода элементов сигнала с единицы на нуль и наоборот [4, 5]. В условиях многолучевого распространения границы перехода элементов сигнала практически «стираются» и четкого перехода нет.

Для нахождения характеристических моментов сигнала в условиях многолучевого распространения предлагается использовать метод, представленный в [6], обеспечивающий нахождение границ тактовых интервалов на основе поиска совпадающих фрагментов сигнала. Этот алгоритм имеет ряд недостатков, отмеченных в [7], основной из которых – возможность получения оценки границы тактового интервала при отсутствии знаний о форме реакции канала на переданный элемент сигнала только при большом соотношении сигнал/шум. Предлагаемый алгоритм лишён этого недостатка, хотя основой этого алгоритма, как и в [6], является повторяемость частей принимаемого сигнала. Также особенностью предлагаемого алгоритма, в отличие от [6], является использование для анализа одного тактового интервала, т.е. не используется

полная энергия элемента сигнала, что позволит значительно ускорить работу алгоритма за счёт уменьшения числа перебираемых комбинаций с m^{2Q+1} до m^{Q+1} , где Q – память канала, а m – позиционность модуляции.

Описание алгоритма

Запишем сигнал на входе приёмного устройства в следующем виде:

$$\mathfrak{R}(t) = \sum_{l=1}^L \mathfrak{R}(t - \tau_l) \cdot \mathfrak{H}_l(t) + \mathfrak{N}(t), \quad (1)$$

где $\mathfrak{R}(t)$ – передаваемый сигнал, $\mathfrak{N}(t)$ – шум, $\mathfrak{H}_l(t)$ – коэффициент передачи канала для l – луча, являющийся медленно меняющейся функцией времени, L – число лучей, l – номер луча, τ_l – задержка во времени l -го луча.

Пусть:

$$\mathfrak{d}_\mu(t) = \mathfrak{R}_{jM+i}(t) - \mathfrak{R}_{kM+i}(t) \quad (2)$$

является разностью сравниваемых фрагментов сигнала, где $k = 0, 1, \mathbf{K}, N - 2$,

$$j = k + 1, k + 2, \mathbf{K}, N - 1, \quad i = 0, 1, \dots, M - 1,$$

$$\mathfrak{R}_{jM+i}(t) = \mathfrak{R}(t + (jM + i)\Delta T),$$

$$\mathfrak{R}_{kM+i}(t) = \mathfrak{R}(t + (kM + i)\Delta T), \quad \Delta T - \text{тре-}$$

буемая точность синхронизации $\Delta T = \frac{T}{M}$,

M – количество смещений в пределах тактового интервала, N – количество тактовых интервалов в интервале анализа, μ – порядковый номер ветви обработки.

Вероятность совпадения разнесённых во времени фрагментов сигнала и вероятность того, что найдётся q пар разнесённых фрагментов сигнала для случая m –позиционной модуляции, памяти канала Q и равновероятным появлением элементов сигнала представлена в [8].

Каждому сочетанию параметров j , k и i соответствует определённое значение μ , причём

$$\mu = 0, 1, \mathbf{K}, \left(\frac{N^2 - N}{2} \right) M - 1, \mu \pmod{M} = i.$$

Для дальнейшего анализа вычислим

величины D_μ :

$$D_\mu = \int_0^T |\mathfrak{d}_\mu(t)|^2 dt. \quad (3)$$

При совпадении разнесённых фрагментов сигнала значение D_μ в отсутствие шума равно нулю, а при его наличии стремится к удвоенному значению энергии шума на интервале анализа [9].

Предлагаемый алгоритм требует нахождения оценки μ , то есть такого значения $\mu = \hat{\mu}$, при котором D_μ минимально. Это значение в отсутствие следующей повторной комбинации позволит определить границу тактового интервала:

$$\hat{\mu} = \arg \min_{\mu} D_\mu. \quad (4)$$

Найденному значению $\hat{\mu}$ соответствуют определённые значения \hat{j}, \hat{k} , при которых проявились совпадающие фрагменты сигнала. При этом зафиксируем интервал, в котором было найдено совпадение фрагментов принимаемого сигнала. Определим начало этого интервала следующим образом: $\zeta = \left\lfloor \frac{\hat{\mu}}{M} \right\rfloor M$. Таким об-

разом, для каждого интервала анализа используется набор фрагментов сигнала $\mathfrak{R}_{jM+i}(t)$ и $\mathfrak{R}_{kM+i}(t)$ и соответствующие им значения интегралов квадратов модулей разности анализируемых фрагментов сигнала $D_{\zeta+i}$.

При реальной передаче информации, ввиду случайности сообщения на отсутствие следующей повторной комбинации нельзя полагаться. Найденное значение должно стать отправной точкой для нахождения границы тактового интервала. Поэтому поиск повторяющихся фрагментов сигнала повторяется q раз. На каждом r -м шаге поиска ($r = 0, 1, \dots, q - 1$) вычисляются значения интегралов квадратов модулей разности анализируемых фрагментов сигнала $D_{r, \zeta+i}$.

Исходя из этого, запишем решающее правило для алгоритма нахождения границ тактовых интервалов по нескольким

анализируемым фрагментам в следующем виде:

$$\hat{i} = \arg \min_i \sum_{r=0}^{q-1} D_{r,\zeta+i} \quad (5)$$

Для определения мощности шума в соответствии с [9] запишем решающее правило в следующем виде:

$$\hat{S}^2 = \frac{\sum_{r=0}^{q-1} D_{r,\hat{i}}}{2qT} \quad (6)$$

Из описания алгоритма видно, что решающие правила (5) и (6) используют в качестве исходных данных один и тот же набор параметров, формируемых в соответствии с формулой (3). Таким образом, получен алгоритм совместного оценивания границ тактовых интервалов и мощности шума.

Алгоритм поиска границ тактовых интервалов и оценивания мощности шума не требует знания вида модуляции, а требует знания только позиционности, что делает его инвариантным к виду модуляции. Представленный алгоритм также не требует знания импульсной характеристики канала, что делает его инвариантным к многолучевости.

Анализ алгоритма

Для выявления качественных характеристик работы устройства тактовой синхронизации и устройства оценивания мощности шума было проведено статистическое имитационное моделирование при различных отношениях мощностей сигнал/шум, количествах блоков q принимаемого сигнала $\mathcal{K}(t)$ на интервале анализа qN и различной позиционности модуляции.

Моделирование проводилось следующим образом. Для каждого блока, используемого в анализе, сначала генерировалась последовательность из N элемен-

тов сигнала $\mathcal{K}(t)$ с позиционностью модуляции m . Передаваемая последовательность сигналов умножалась на комплексный коэффициент передачи канала $\mathcal{K}(t)$ в каждом луче. Квадратурные компоненты коэффициента передачи $\mathcal{K}(t)$ формировались как случайные величины, распределённые по гауссовскому закону. Произведения $\mathcal{K}(t)$ и $\mathcal{K}(t)$ складывались со сгенерированной реализацией гауссовского шума $\mathcal{K}(t)$. Так был сформирован сигнал $\mathcal{K}(t)$, поступающий на вход анализируемого устройства тактовой синхронизации. Далее проводились действия в соответствии с формулами (2)–(4), и в соответствии с формулой (5) выносились решения по блокам. Найденное значение временного сдвига сохранялось в памяти ЭВМ. Данные операции проводились 1000 раз. В результате были получены зависимости вероятности ошибочного определения границы тактового интервала в зависимости от количества блоков, используемых для анализа, и отношения сигнал/шум. Полученные зависимости представлены на рис. 1 и 2.

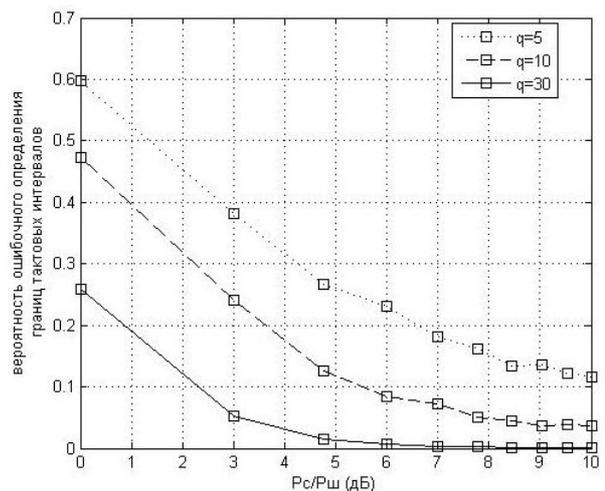


Рис. 1. Зависимость вероятности правильного определения границы тактового интервала в зависимости от количества используемых блоков

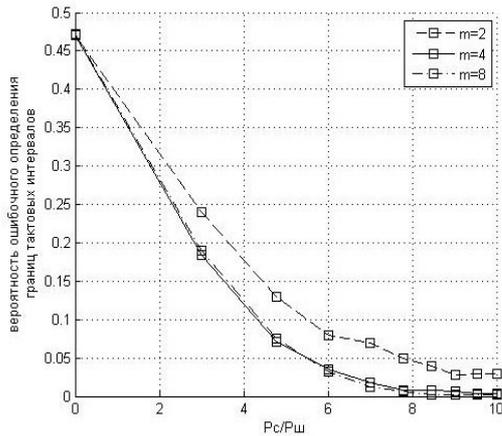


Рис. 2. Зависимость вероятности ошибки определения границ тактовых интервалов от позиционности модуляции при $q=10$

Из рис. 1 и 2 следует:

1. Точность определения границ тактового интервала зависит от соотношения сигнал/шум и количества анализируемых блоков. При необходимости можно найти компромисс между отношением сигнал/шум и количеством используемых блоков.

2. При увеличении позиционности модуляции уменьшается количество следом повторяющихся комбинаций, что приводит к незначительному выигрышу в помехоустойчивости по отношению к двухпозиционной модуляции при одинаковой вероятности выпадения совпадающих фрагментов сигнала. При этом при увеличении позиционности модуляции выигрыш не увеличивается.

3. Устройство тактовой синхронизации, построенное в соответствии с алгоритмом (5), позволяет определять границы тактовых интервалов при низком отношении сигнал/шум.

4. При увеличении позиционности модуляции рабочие характеристики алгоритма ухудшаются.

Для определения погрешности оценивания дисперсии шума по формуле (6) эксперимент был проведён следующим образом. Выбирались совпадающие фрагменты сигнала, и по формуле (2) определялась мощность шума. Полученное значение мощности вычиталось из известного, заданного экспериментом значения мощности, и результат записывался в ка-

честве погрешности оценивания мощности шума. По результатам 1000 таких опытов определялось среднее значение модуля погрешности оценки мощности шума и строился график (рис. 3).

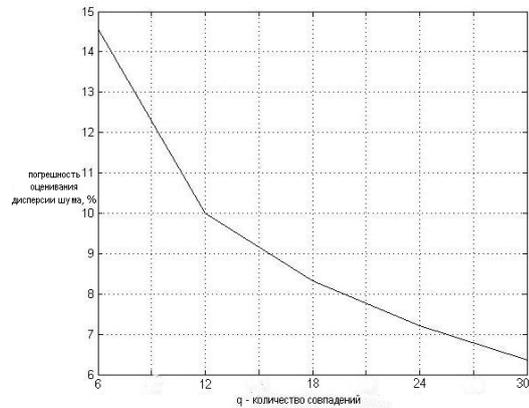


Рис. 3. Зависимость процента ошибки от количества совпадений

Вероятность правильного определения границ тактовых интервалов зависит от вероятности появления совпадающих фрагментов сигнала. Для определения оптимальных значений вероятности появления совпадающих фрагментов сигнала было проведено статистическое моделирование. В моделировании постоянными параметрами были соотношение сигнал/шум, равное 10, и количество блоков, равное 10, а переменным параметром являлось количество тактов в блоке. Количество тактов в блоке определяло вероятность появления совпадающих фрагментов сигнала. Результаты моделирования представлены на рис. 4.

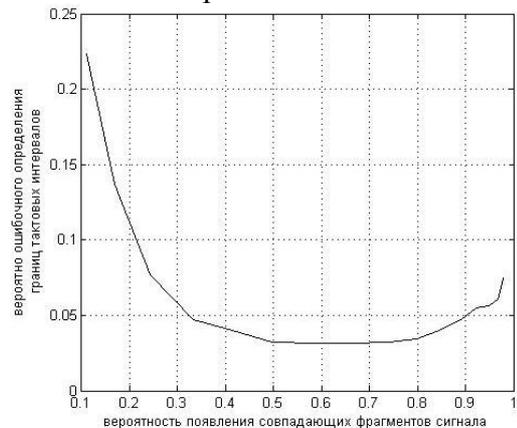


Рис. 4. Зависимость вероятности ошибочного определения границ тактовых интервалов от вероятности появления совпадающих фрагментов сигнала в блоке

Высокая вероятность ошибки определения границ тактовых интервалов при вероятности появления совпадающих фрагментов от 0 до 0,3 объясняется отсутствием признаков наличия границ тактовых интервалов. Увеличивающаяся вероятность ошибки определения границ тактовых интервалов при вероятности появления совпадающих фрагментов сигнала более 0,8 объясняется нарастающим количеством следующих подряд совпадающих комбинаций. Это приводит к эффекту, аналогичному тому, что появляется при приеме длинных последовательностей единиц либо нулей при обеспечении тактовой синхронизации, когда невозможно определить границу тактового интервала из-за отсутствия признака наличия границы перехода с нуля на единицу либо наоборот. Оптимальная вероятность совпадения фрагментов заключена в интервале 0,5...0,8. При этом, если учесть также количество тактов, необходимых для совпадения с заданной вероятностью, оптимальным значением вероятности совпадения фрагментов сигнала становится значение, равное 0,5.

Выводы

1. Устройство тактовой синхронизации, использующее алгоритм (5), может получать оценку границ при низком отношении сигнал/шум.

2. При использовании алгоритма с решающим правилом (5) увеличение набора статистических данных (увеличение количества блоков анализа) приводит к повышению точности определения границ тактовых интервалов.

3. Оптимальное значение вероятности совпадения разнесённых во времени фрагментов сигнала в анализируемом блоке равно 0,5.

4. Свойство 3 совместно с анализом полученной формулы для вероятности совпадения разнесённых во времени фрагментов сигнала, представленной в [8], позволяет утверждать, что синтезированный алгоритм может использоваться

для каналов с большой памятью ($Q > 10$).

5. Результаты моделирования подтверждают работоспособность представленного алгоритма оценивания мощности шума. Точность оценки мощности шума увеличивается с ростом количества совпадающих фрагментов сигнала. При медленно меняющейся мощности в канале можно получить предварительную оценку величины шума, а далее в процессе приёма её уточнять, увеличивая число q .

Библиографический список

1. Николаев, Б. И. Последовательная передача дискретных сообщений по непрерывным каналам с памятью [Текст] / Б. И. Николаев. - М.: Радио и связь, 1988. - 262 с.

2. Финк, Л. М. Теория передачи дискретных сообщений [Текст] / Л. М. Финк. - М.: Советское радио, 1970. - 728 с.

3. Горячкин, О. В. Методы слепой обработки сигналов и их приложения в системах радиотехники и связи [Текст] / О. В. Горячкин. - М.: Радио и связь, 2003. - 230 с.

4. Тамм, Ю. А. Адаптивная коррекция сигнала ПД [Текст] / Ю. А. Тамм. - М.: Связь, 1978. - 144 с.

5. Гинзбург, В. В. Теория синхронизации демодуляторов [Текст] / В. В. Гинзбург, А. А. Каяцкас. - М.: Связь, 1974. - 215 с.

6. Кузнецов, А. И. Тактовая синхронизация в каналах с межсимвольной интерференцией на основе структурного анализа многолучевого сигнала [Текст] / А. И. Кузнецов, Р. Р. Халилов // ИКТ. - 2007. - Т. 4, № 1. - С. 41 - 43.

7. Котлова, Т. В. Оценка порогового уровня различения «ненулевых» фрагментов сигнала для алгоритма тактовой синхронизации, основанного на повторяемости частей принимаемого многолучевого сигнала [Текст] / Т. В. Котлова, Р. Р. Халилов // Сб. докладов ВНТК «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и её роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества». - Самара, 2009. - С. 209 - 210.

8. Котлова, Т. В. Оценка временной задержки сигнала для алгоритма совместного обнаружения сигнала, тактовой синхронизации и оценивания дисперсии шума для каналов с межсимвольной интерференцией [Текст] / Т. В. Котлова, Р. Р. Халилов // Материалы XV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, Навигация, Связь». - Во-

ронеж, 2009. – Т. 2. – С. 315-320.

9. Халилов, Р. Р. Оценивание дисперсии шума в каналах с МСИ с использованием метода дифференциального анализа [Текст] / Р. Р. Халилов // Сб. докладов IX МНТК «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». - Казань, 2008. – С. 219–220.

ALGORITHM OF CLOCK SYNCHRONIZATION AND EVALUATION OF NOISE POWER INVARIANT TO MULTIPATHING AND THE KIND OF MODULATION

© 2012 R. R. Khalilov

State Research and Production Space-Rocket Center “TsSKB-Progress”

An algorithm of clock synchronization and evaluation of noise power based on the use of repetition of parts of a multipath signal is presented in the paper.

Signal, clock synchronization, channel noise dispersion, simulation, multipathing.

Информация об авторе

Халилов Ринат Рашидович, кандидат технических наук, заместитель начальника Центра получения и обработки информации «Самара», ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс». E-mail: halilovr82@mail.ru. Область научных интересов: методы адаптивной обработки сигналов в каналах с искажениями и помехами.

Khalilov Rinat Rashidovich, candidate of technical science, Deputy Head of the Center of obtaining and processing information “Samara”, State Research and Production Center “TsSKB-Progress”. E-mail: halilovr82@mail.ru. Area of research: methods of adaptive processing of signals in channels with distortion and interference.