

## Прием сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов с помощью логарифмического детектора

Л.В. Кузьмин, В.А. Лазарев

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН  
Российская Федерация, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7, [chaos@cplire.ru](mailto:chaos@cplire.ru)

*В данной работе рассматриваются особенности работы логарифмического детектора при приеме хаотических радиоимпульсов различной длительности. Анализируется влияние джиттера тактового сигнала и джиттера на выходе детектора на способ обработки символов и предлагается новый способ обработки для устранения данных эффектов.*

*This paper discusses the features of the logarithmic detector when receiving chaotic radio pulses of different durations. Analyzes the effects of clock jitter and jitter at the output of the detector to a method of treating symbols and a new method of treatment to eliminate these effects.*

### Введение

В беспроводной системе связи одним из важных элементов приемопередатчика является прием и обработка сигнала. Именно эти элементы в большей степени определяют динамический диапазон работы приемопередатчика, вероятность ошибки на бит (BER) и дальность работы беспроводных устройств. Существует несколько методов приема сигналов: когерентный прием и энергетический [1].

Для использования когерентного метода приема форма принимаемых радиоимпульсов должна быть заранее известна. Однако если форма принимаемого сигнала изменяется от символа к символу использование такого метода сильно затруднено. Такие сигналы используются, например, в сверхширокополосных прямохаотических системах связи [2-4]. Они позволяют сформировать сигнал уже в нужном диапазоне частот, без использования вспомогательных средств, и имеют различную форму от импульса к импульсу.

В СШП прямохаотических приемопередатчиках для приема хаотических радиоимпульсов используется энергетический метод приема. В качестве основного активного элемента может использоваться квадратичный или логарифмический детектор. На ранних этапах создания макетов СШП прямохаотических приемопередатчиков использовался квадратичный детектор с каскадом маломощных усилителей. Такая комбинация давала чувствительность -55 дБ, однако общее потребление составляло ~1.5 Вт, а динамический диапазон был порядка 15 дБ и мог регулироваться только за счет отключения или включения усилителей. Такое поведение объясняется тем, что сигнал на выходе квадратичного детектора линейно зависит от входной мощности, т.к. квадратичный детектор, в простейшем случае представляет из себя нелинейный элемент - диод.

Логарифмический детектор состоит из каскада квадратичных детекторов, соединенных последовательно, т.к. каждый каскад настроен на свой диапазон чувствительности принимаемого радиосигнала насыщение их происходит по очереди и суммарный динамический диапазон работы активного элемента значительно увеличивается. Так же он обладает широкой полосой частот детектирования радиосигнала и высокой чувствительностью, а низкое энергопотребление способствует для использования их в мобильных беспроводных приемопередатчиках.

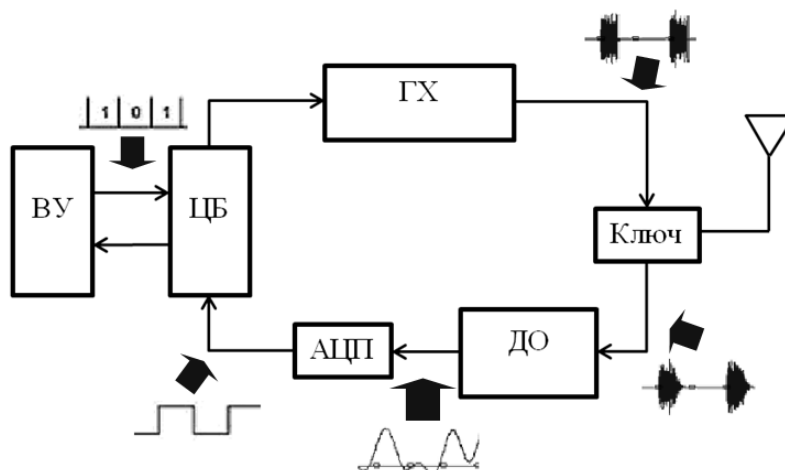
Помимо предельной чувствительности и динамического диапазона у логарифмического детектора есть такие важные с точки зрения приема радиосигналов

характеристики как максимальная крутизна спада и нарастания фронтов выходного видеосигнала и его максимальная частота. Именно эти характеристики во многом являются определяющими для максимальной физической скорости передачи данных в системе.

В работе рассматриваются особенности приема и обработки хаотических радиоимпульсов при использовании логарифмического детектора в зависимости от скорости передачи данных.

### **Работа связки лог.детектор – ПЛИС при приеме и обработки хаотических радиоимпульсов при малых скоростях передачи данных**

Приемный тракт СШП прямохаотического приемопередатчика состоит из аналоговой и цифровой части. В аналоговой части происходит детектирование радиоимпульсов и построение их огибающей на выходе, а в цифровой – обработка, получившейся огибающей. Аналоговый тракт приемопередатчика включает в себя антенну, СВЧ-ключ (который осуществляет коммутацию антенны с приемником и передатчиком устройства), полосового фильтра, малошумящего усилителя, ФВЧ, логарифмического детектора и однобитного АЦП (пороговое устройство) (рис. 1). Цифровая часть состоит из ПЛИС и микроконтроллера. В качестве лог.детектора был выбран AD8317[5], а в качестве ПЛИС – 5M240ZT100.



**Рис. 1. Структура прямохаотического приёмопередатчика и фрагменты сигнала в различных точках системы. ВУ – внешнее устройство. ЦБ – цифровой блок. ГХ – генератора хаоса. ДО – детектор огибающей. АЦП – аналого-цифровой преобразователь.**

При приеме радиосигнал фильтруется от внеполосовых помех, усиливается и на выходе детектора строится его огибающая, амплитуда которого прямо пропорциональна мощности в логарифмическом масштабе. Т.к. этот принятый сигнал имеет аналоговую форму и может варьироваться в широких пределах необходимо, чтобы он проходил через элемент, который был бы способен переводить аналоговый сигнал в двухуровневый. Для этого используется пороговое устройство (компаратор). Далее двухуровневые импульсы поступают на вход цифровой части.

Сама информация передается пакетным способом с использованием “On-Off” модуляции и скважности 2. Наличие импульса на своей временной позиции соответствует логической единице, а отсутствие – нулю. Так как информация передается пакетным способом, то в начале каждого пакета присутствует преамбула синхронизации, с помощью нее ПЛИС производит синхронизацию приемопередатчика с принимаемым сигналом, после чего осуществляет обработку радиоимпульсов. При

этом длительность символа составляет 166 нс (83 нс – длительность импульса и 83 нс – длительность защитного интервала), что соответствует физической скорости передачи информации 6 Мбит/с, используемой в существующих прямохаотических приемопередатчиках[6].

Обработка осуществляется посредством последовательной дискретизации принимаемых импульсов. В используемом алгоритме на один бит производится 8 последовательных отсчетов дискретизации (рис. 2). Информация, содержащаяся в них, поступает в решающее устройство, которое определяет тип принятого символа. Для принятия логической единицы необходимо было, чтобы как минимум первый отсчет был равен единице, а предпоследний нулю. Проведенные эксперименты с использованием данной процедуры показали значение величины вероятности ошибки на бит равной  $10^{-6}$  и ниже.

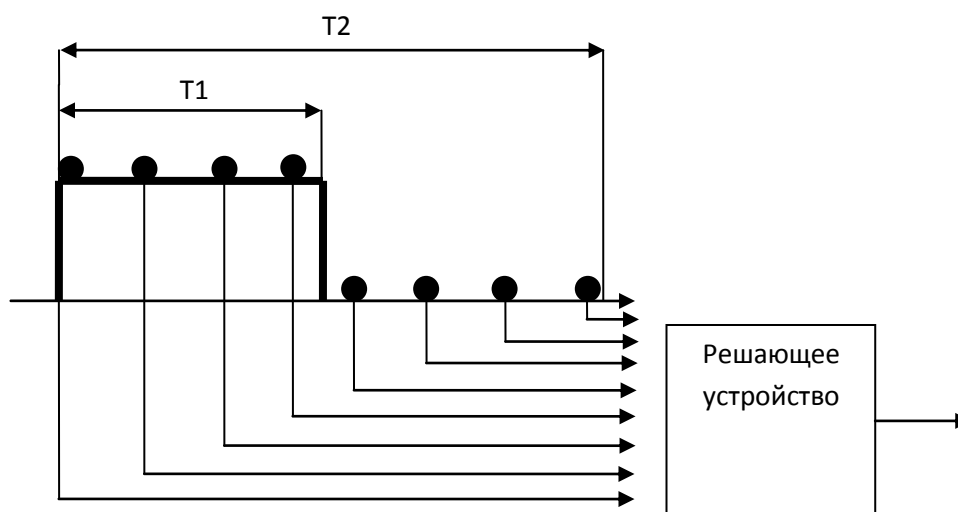


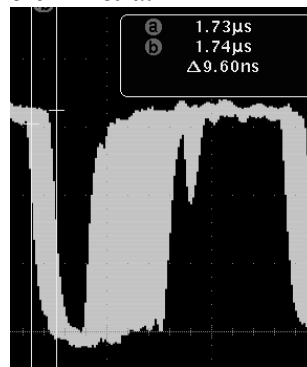
Рис. 2. Пример дискретизации входящего импульса. T2 – длительность символа, T1 – длительность импульса.

### Особенности работы логарифмического детектора с короткими хаотическими радиоимпульсами

Для дальнейшего исследования было принято решение уменьшать длительность символа до 50 нс, что соответствует скорости передачи данных 20 Мбит/с. Причина выбора данной величины заключается в используемом лог. детекторе. Максимальная частота пропускания видеосигнала в нем составляет 50 МГц, а минимальная длительность фронтов спада и нарастания выходного сигнала 6 и 10 нс соответственно. Данные характеристики, при выбранном способе модуляции излучаемого сигнала, позволяют принимать символы длительностью 40 нс, что соответствует физической скорости передачи данных 25 Мбит/с.

Экспериментальные исследования показали, что при уменьшении длительности символа сильно возрастает негативный эффект от джиттера на выходе логарифмического детектора. Вследствие воздействия этого эффекта действительное положение импульсов на входе ПЛИС может отличаться от предполагаемого. Данная флуктуация в положении импульсов не зависит от длительности самого импульса и является постоянной для импульсов длительностью 83 нс и 25 нс и составляет величину, порядка, 10 нс (рис. 3). При этом, учитывая используемый алгоритм распознавания символов, основную проблему может содержать в себе джиттер переднего фронта (на рис. 3 спадающая линия), а джиттер заднего фронта хоть

и больше переднего по величине, но зачастую укладывается в защитный интервал и не мешает распознаванию следующего символа.



**Рис. 3. Оциллограмма продетектированного хаотического радиоимпульса на выходе лог.детектора для радиоимпульсов длительностью 25 нс. Размытием показан джиттер сигнала.**

Следующей особенностью при уменьшении длительности символа является невозможность использования предыдущего метода синхронизации и обработки принимаемых радиоимпульсов в ПЛИС. Первой причиной является необходимость повышения частоты работы ПЛИС с 48 до 160 МГц для сохранения 8 отсчетов дискретизации на символ. Это приведет к увеличению энергопотребления микросхемы, практически, в 4 раза (с 10 до 35 мА), что недопустимо для мобильных устройств. Поэтому максимальная частота тактирования не должна превышать 80 МГц. Таким образом, на один символ будет приходиться максимум 4 отсчета тактового генератора (два на импульс и два на защитный интервал). В итоге джиттер может приводить к ошибке в один отсчет, что влечет за собой существенное увеличение вероятности ошибки на бит при изменении длительности поступающих на вход ПЛИС импульсов (вследствие отдаления передающего устройства от приемного), т.к. на радиоимпульс будет приходиться всего 1 отсчет. К тому же существует джиттер самого тактового сигнала. В итоге при прочих равных условиях вероятность ошибки на бит возрастает с  $10^{-6}$  до  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  по сравнению с физической скоростью передачи данных 6 Мбит/с.

#### **Метод самосинхронизации при детектировании радиоимпульсов**

В качестве одного из методов решения возникших проблем предлагается использовать схему, позволяющую учитывать джиттер принимаемых радиоимпульсов и компенсировать его. В основе этого метода обработки лежит использование переднего фронта принимаемого радиоимпульса как признака, обеспечивающего синхронизацию символов с тактовым генератором. Входящие импульсы ПЛИС будут оцифровывать с частотой 80 МГц с помощью SR-триггера. Использование данного элемента совместно с другим триггером, работающим в противофазе, позволяет детектировать импульсы заданной длительности и отсекал импульсы, длительность которых, меньше этой величины. Таким образом, получается простой цифровой фильтр нижних частот, способный убирать высокочастотные помехи.

Далее сигналы поступают на детектор символов, который занимается распознаванием логических единиц и нулей. Общий принцип работы которого схож с принципом его работы при передаче информации на скорости 6 Мбит/с. Однако теперь информация записывается в сдвиговый регистр только в том случае, если с обоих триггеров на вход детектора поступают высокие уровни. Если на определенной позиции в этом регистре появляется единица, то на выход так же подается высокий

уровень. Если на одном их входов высокий уровень отсутствует, то на выходе будет низкий уровень сигнала.

После детектора импульсы поступают на детектор преамбулы, который последовательно записывает информацию, поступающую с детектора, и сравнивает её с эталоном. После успешного распознавания преамбулы подается сигнал синхронизации на дальнейшие блоки ПЛИС. В том случае, если за определенное время преамбулу синхронизации распознать не удалось, происходит автоматический сброс всех цепей ПЛИС в исходное состояние.

### **Экспериментальное исследование**

Чтобы проверить эффективность работы данного метода приема и обработки символов были проведены эксперименты по передаче информации на физической скорости 20 Мбит/с. Передатчик был настроен на периодическую посылку в эфир пакетов длительностью 125 байт с фиксированным содержанием. Приемник был настроен на прием этих пакетов и проверки их на наличие ошибок. Результаты экспериментов показали, что при использовании данного метода обработки символов вероятность ошибки на бит составляет  $10^{-6}$  и ниже.

### **Выводы**

В данной работе была исследована работа логарифмического детектора в зависимости от длительности принимаемых хаотических радиоимпульсов и метод обработки символов в цифровой части приемопередатчика. В результате проведенного исследования были выявлены особенности работы логарифмического детектора при уменьшении длительности, как радиоимпульсов, так и самих символов. Показано, что основное влияние на качество приема осуществляет джиттер сигнала на выходе детектора. Для компенсации этого негативного эффекта был разработан и предложен новый способ обработки принимаемых радиоимпульсов. Экспериментальная апробация данного способа показала, что при его использовании вероятность ошибки на бит составляет  $10^{-6}$  и ниже.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке программы по выполнению прикладных научных исследований по лоту шифр 2014-14-576-0054 по теме: «Создание программно-аппаратных средств инфокоммуникационной инфраструктуры для малых населенных пунктов на основе подхода сверхширокополосных беспроводных программно-конфигурируемых сетей» (Уникальный идентификатор RFMEFI60414X0036).*

### **Литература**

1. Скляр Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение // Вильямс, 2007 г.
2. Анищенко В. С. Сложные колебания в простых системах. - М.: Наука, 1990.
3. Дмитриев А.С., Клецов А.В., Лактюшкин А.М., Панас А.И., Старков С.О. Сверхширокополосная беспроводная связь на основе динамического хаоса, Радиотехника и электроника, 2006, Т. 51, №10, с. 1193-1209.
4. Дмитриев А. С., Кяргинский Б. Е., Максимов Н. А., Панас А. И., Старков С. О. Прямохаотическая передача информации в СВЧ диапазоне // Препринт ИРЭ РАН № 1(625), Москва, 2000.
5. <http://www.farnell.com/datasheets/708165.pdf>
6. Дмитриев А.С., Лазарев В.А., Герасимов М.Ю., Рыжов А.И. Сверхширокополосные беспроводные нателные сенсорные сети // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т.58, №12. – С. 1160-1170.