Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

Кафедра радиоэлектронных средств защиты информации

Работа допущена к защите

Зав. кафедрой

С.Б. Макаров

" " 2013 г.

**ВЫПУСКНАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

Тема: Влияние систем тактовой синхронизации на вероятностные и статистические характеристики приема пакетных данных

Направление: 210400 – Телекоммуникации

|  |  |
| --- | --- |
| Выполнила студентка гр.4097/12 | Балашова А.A. |
| Руководитель, асс. | Завьялов С.В. |

**РЕФЕРАТ**

с. 47, рис. 32, табл.7.

**Влияние систем тактовой синхронизации на вероятностные и статистические характеристики приема пакетных данных**

Рассмотрен алгоритм когерентного приёма при наличии рассинхронизации генераторов передатчика и приёмника.

Разработаны, исследованы и программно реализованы алгоритмы тактовой синхронизации двух видов:

* Алгоритм замкнутого синхронизатора с дискретным управлением, основанным на циклическом сдвиге импульсов в локально генерируемом сигнале.
* Алгоритм замкнутого синхронизатора с опережающим и опаздывающим стробированием, основанным на выполнении двух независимых интегрирований входного сигнала по двум различным промежуткам символьного интервала.

**The influence of bit synchronization on the probabilistic and statistical characteristics in the transmission of data in packet mode.**

Coherent detection algorithm has been considered if there exists a desynchronization of the transmitter and receiver generators.

Algorithms bit synchronization of two types have been developed, realized programmatically and tested :

* Algorithm closed synchronizer with discrete control, based on the cyclic shift of pulses in the locally generated signal.
* Algorithm closed synchronizer with early and late for gating based on the performance of two independent integrations input signal through two different symbol intervals.

Оглавление

[Введение. 5](#_Toc358557408)

[Глава 1. Обзор основных алгоритмов тактовой синхронизации. 8](#_Toc358557409)

[1.1 Разомкнутые символьные синхронизаторы. 8](#_Toc358557410)

[1.2 Замкнутые символьные синхронизаторы 12](#_Toc358557411)

[1.3 Выводы. 18](#_Toc358557412)

[Глава 2. Моделирование замкнутых синхронизаторов 19](#_Toc358557413)

[2.1 Условия проведения моделирования. 19](#_Toc358557414)

[2.2 Исследование помехоустойчивости при фиксированном сдвиге генераторов. 21](#_Toc358557415)

[2.3 Алгоритм моделирование замкнутого синхронизатора с дискретным управлением. 29](#_Toc358557416)

[2.4 Алгоритм моделирование замкнутого синхронизатора с опережающим и опаздывающим стробированием. 32](#_Toc358557417)

[2.4 Результаты исследования вероятностных характеристик тактовых синхронизаторов. 34](#_Toc358557418)

[2.4.1 Результаты исследования вероятностных характеристик тактового синхронизатора с дискретным управлением. 34](#_Toc358557419)

[2.4.2 Результаты исследования вероятностных характеристик тактового синхронизатора с опережающим и опаздывающим стробированием. 37](#_Toc358557420)

[2.5 Результаты исследования статистических характеристик тактовых синхронизаторов. 40](#_Toc358557421)

[2.5.1 Результаты исследования статистических характеристик тактового синхронизатора с дискретным управлением. 40](#_Toc358557422)

[2.5.2 Результаты исследования статистических характеристик тактового синхронизатора с опережающим и опаздывающим стробированием. 42](#_Toc358557423)

[2.6 Выводы. 43](#_Toc358557424)

[Заключение. 44](#_Toc358557425)

[Список литературы. 46](#_Toc358557426)

# Введение.

Для оптимальной демодуляции все цифровые приемники должны синхронизироваться с переходами поступающих символов.

*Синхронизацией* называется процесс подстройки значащих моментов цифрового сигнала для установления и поддержания требуемых временных соотношений. За счет синхронизации поддерживается непрерывность передаваемой информации и обеспечивается её целостность, то есть определяется положение передаваемых кодовых слов и их последовательность.

*Тактовая синхронизация* – это процесс установления точного временного соответствия между принимаемым сигналом и последовательностью тактовых импульсов. Здесь под тактовыми импульсами понимают периодически повторяющиеся импульсы с частотой, равной частоте повторения символов (битов) в информационном сигнале. С помощью тактовой синхронизации из принимаемой смеси полезного сигнала и шума происходит выделение последовательности тактовых импульсов.

Потребность в синхронизации возникла со времен появления модуляции и уплотнения сигналов в телефонных сетях (30-ые годы прошлого века). После начала перевода сетей связи на цифровые технологии потребность к синхронизации стала более насущной, а требования к точности – более жесткими. Однако после начала строительства транспортных сетей синхронной цифровой иерархии (Synchronous Digital Hierarchy – SDH) и появления в телекоммуникационных сетях смешанного трафика точная синхронизация становится необходимой.

При передаче информации в пакетном режиме структура пакета состоит, как правило, из преамбулы, предназначенной для передачи сигналов тактовой синхронизации, после которой предусмотрена информационная часть. Поэтому при приеме информации сначала на длине преамбулы происходит тактовая синхронизация, после чего производится прием информационных битов. Пример структуры такого пакета показан на рис.1.



Рис. 1 Структура пакета данных.

Вопрос выбора длины преамбулы достаточно сложный. Длина преамбулы должна выбираться согласно следующим критериям:

* Длина преамбулы должна быть достаточной для того, чтобы обеспечить необходимую точность синхронизации.
* Длина преамбулы не должна быть очень большой, так как для синхронизации тратятся временные ресурсы.

На рис.2 изображена структурная схема приемника ФМ-2 с блоком тактовой синхронизации. Преамбула поступает в блок тактовой синхронизации, где она синхронизируется с локальным генератором. Блок тактовой синхронизации позволяет определить начало поступления информационной части пакета. После определения этого момента времени, информационные биты поступаю на интегратор, а затем на решающее устройство. Согласно оптимальному различению двоичных сигналов при условии того, что сигналы равномощные и противоположные, стратегия принятия решения выглядит следующим образом:





Рис. 2 Структурная схема приемника с блоком тактовой синхронизации

# Глава 1. Обзор основных алгоритмов тактовой синхронизации.

Тактовые синхронизаторы можно разделить на две основные группы. Первая группа состоит из *разомкнутых синхронизаторов*. Данные схемы выделяют копию выхода генератора тактовых импульсов передатчика непосредственно из поступающего информационного потока. Вторая группа – это *замкнутые синхронизаторы*; они синхронизируют локальный генератор тактовых импульсов с поступающим сигналом посредством сличения локального и поступающих сигналов. Основным недостатком разомкнутых символьных синхронизаторов является наличие неустранимой ошибки с ненулевым средним значением [1]. Эту ошибку можно уменьшить за счет увеличения отношения сигнал-шум, однако полностью её устранить невозможно. Поэтому, как правило, замкнутые синхронизаторы точнее, но при этом сложнее и дороже.

## 1.1 Разомкнутые символьные синхронизаторы.

Синхронизаторы этого класса генерируют частотный компонент со скоростью передачи символов, пропуская поступающий низкочастотный сигнал через последовательность фильтра и нелинейного устройства. Желательный частотный компонент, передаваемый со скоростью передачи символов, изолируется с помощью полосового фильтра, после чего усилитель с высоким коэффициентом насыщения придает ему нужную форму. В результате восстанавливается прямоугольный сигнал генератора тактовых импульсов. На рис. 3 приведены три примера разомкнутых тактовых синхронизаторов.

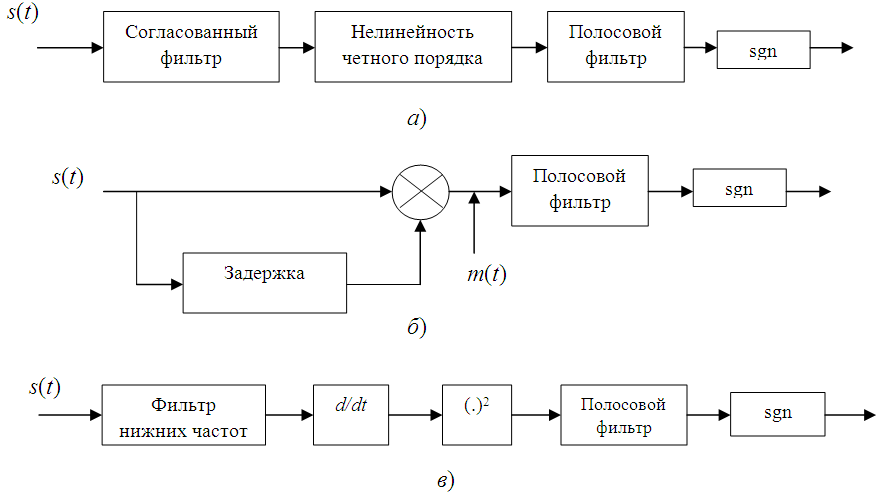


Рис. 3. Три типа разомкнутых битовых синхронизаторов

а) Поступающий сигнал *s*(*t*) фильтруется с использованием согласованного фильтра. Выход этого фильтра – автокорелляционная функция исходного сигнала. Например, для передачи с помощью прямоугольных импульсов, на выходе имеем сигнал, состоящий из равнобедренных треугольников. Затем полученная последовательность спрямляется с помощью некоторой нелинейности четного порядка, например квадратичного устройства. Полученный сигнал будет содержать пики положительной амплитуды, которые, с точностью до временной задержки, соответствуют переходам входных символов. Последовательность описанных процессов изображена на рис. 4. Таким образом, сигнал с выхода четного устройства будет содержать Фурье – компонент на собственной частоте тактового генератора. Данная частотная составляющая изолируется от остальных гармоник с помощью полосового фильтра, и ей придается форма посредством насыщающего усилителя с передаточной функцией вида



Рис. 4 Иллюстрация процессов, происходящая в разомкнутом битовом синхронизаторе

б) Фурье – компонент на частоте тактового генератора создается посредством задержки и умножения. Длительность задержки, показанной на рис. 3 б, равна половине периода передачи бита, и это значение является оптимальным, поскольку оно дает наибольший Фурье – компонент. Сигнал *m*(*t*) всегда будет положительным во второй половине любого периода передачи бита, но будет иметь отрицательную первую половину, если во входном потоке битов *s*(*t*) произошло изменение состояния. Это дает прямоугольный сигнал, спектральные компоненты и все гармоники которого совпадают с теми, что были у сигнала в схеме на рис. 3, а. Как и в предыдущем случае, нужный спектральный компонент может быть выделен с помощью полосового фильтра, и ему будет придана нужная форма.

в) Этот пример соответствует контурному детектору. Основными операциями здесь являются дифференцирование и спрямление (посредством использования квадратичного устройства). Если на вход поступает сигнал прямоугольной формы, дифференциатор дает положительные или отрицательные пики на всех периодах символов. При спрямлении получаемая последовательность положительных импульсов будет давать Фурье – компонент на скорости передачи информационных символов. Потенциальной проблемой данной схемы является то, что дифференциаторы обычно весьма чувствительны к широкополосному шуму. Это делает необходимым введение перед дифференциатором фильтра нижних частот, как показано на рис. 3 в. В то же время данный фильтр удаляет высокочастотные составляющие информационных символов, что приводит к потере сигналом исходной прямоугольной формы. Это в свою очередь, приводит к тому, что результирующий дифференциальный сигнал будет иметь конечные времена нарастания и спада и уже не будет последовательностью импульсов.

С этапами обработки сигналов, изображенными на рис. 3, будет связана некоторая аппаратная задержка. Известно, что для полосового фильтра, эффективно усредняющего K входных символов (ширина полосы 1/KT), величина среднего сбоя времени (задержки) приблизительно описывается следующим выражением [1]:

 или 

Здесь T – период передачи символа, Eb – энергия на бит, а N0 – односторонняя спектральная плотность мощности принятого шума. Так же показано, что при высоких отношениях сигнал/шум отношение среднеквадратического отклонения временной ошибки может быть выражено следующим выражением:

 для 

Таким образом, если для данного полосового фильтра принятое отношение сигнал-шум достаточно велико, все методы, приведенные на рис. 3, приведут к точной битовой синхронизации.

Однако, основной недостаток разомкнутых символьных синхронизаторов – наличие неустранимой ошибки с ненулевым средним значением. Эта ошибка уменьшается при увеличении отношения сигнал/шум, но поскольку форма сигнала синхронизации зависит непосредственно от поступающего сигнала, полностью данная ошибка не может быть устранена.

## 1.2 Замкнутые символьные синхронизаторы

Замкнутые символьные (тактовые) синхронизаторы сравнивают входной сигнал с локально генерируемыми тактовыми импульсами с последующей синхронизацией локального сигнала с переходами во входном сигнале. Рассмотрим два типа замкнутых синхронизаторов.

Среди наиболее известных замкнутых символьных синхронизаторов можно выделить синхронизатор с опережающим и запаздывающим стробированием [2]. Работа синхронизатора, изображённого на рис. 5, заключается в выполнении двух независимых интегрирований входного сигнала по двум различным промежуткам символьного интервала длительностью (*T – d*) секунд.



Рис. 5. Синхронизатор с опережающим и опаздывающим стробированием

Первое интегрирование (так называемое опережающее) начинается в момент, определённый как начало передачи символа (условно нулевой момент t = 0) и заканчивается через (T – d) секунд. Второе интегрирование (запаздывающее) начинается через d секунд и заканчивается в конце передачи символа (условно t = T). Разность абсолютных значений выходов описанных интеграторов *y1* и *y2* является мерой ошибки синхронизации символов приёмника и может быть использовано для последующей коррекции.

Работа синхронизатора с опережающим и запаздывающим стробированием представлена на рис. 6.

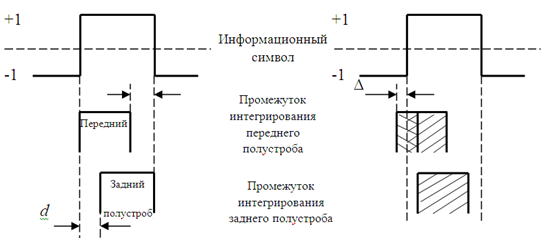


Рис. 6. Символьная синхронизация: а) точная синхронизация приемника б) синхронизация с опережением

При идеальной синхронизации (рис. 6, а) показано, что оба периода стробирования попадают в интервал передачи символа. В этом случае оба интегратора получат одинаковый объем энергии сигнала и разность соответствующих сигналов (сигнал рассогласования *e* на рис. 5) будет равна нулю. Следовательно, если устройство синхронизировано, оно стабильно; нет тенденции к самопроизвольному выходу их синхронизации. На рис. 6, б показан пример для приемника, генератор тактовых импульсов которого функционирует с опережением по отношению к входному сигналу. В данном случае начало интервала опережающего интегрирования попадает на предыдущий интервал передачи бита, тогда как запаздывающее интегрирование по-прежнему выполняется в пределах текущего символа. При запаздывающем интегрировании энергия накапливается за интервал времени (*T – d*), как и в случае, изображенном на рис. 6, а; но опережающее интегрирование накапливает энергию всего за время [(*T – d*) – 2∆], где ∆ – часть интервала опережающего интегрирования, приходящего на предыдущий интервал передачи бита. Следовательно, для этого случая сигнал рассогласования будет равен e = –2∆, что приведет к снижению входного напряжения ГУН на рис. 5. Это, в свою очередь, приведет к снижению выходной частоты ГУН и замедлит отсчет времени приемника для согласования с входными сигналами. Используя рис. 6 как образец, можно видеть, что если таймер приемника опаздывает, объемы энергии, накопленные при опережающем и запаздывающем интегрировании, будут обратные к полученным ранее, и соответственно, поменяется знак сигнала рассогласования. Таким образом, запаздывание таймера приемника приведет к увеличению напряжения ГУН, что вызовет увеличение выходной частоты генератора и приближение скорости таймера приемника к скорости входного сигнала.

В примере, проиллюстрированном на рис. 6, неявно предполагалось, что до и после рассматриваемого символа происходит изменение информационного состояния. Если переходов нет, можно показать, что опережающее и запаздывающее интегрирование приведет к одинаковым результатам. Следовательно, если не происходит изменения информационного состояния, сигнал рассогласования не генерируется.

При рассмотрении синхронизатора с опережающим и запаздывающим стробированием необходимо учитывать тот факт, что создать два абсолютно одинаковых интегратора невозможно. Следовательно, сигналы из двух ветвей контура будут сдвинуты относительно друг друга. Данный сдвиг будет небольшим для качественно спроектированных интеграторов, но он приведет к постепенному уходу от синхронизации при наличии продолжительных последовательностей одинаковых информационных символов. Во избежание этого можно либо, что вероятно, наиболее очевидно, форматировать данные так, чтобы гарантированно не было достаточно длинных интервалов без перехода, либо модифицировать структуру схемы таким образом, чтобы она содержала один интегратор.

Еще один момент, связанный с проектированием контура, – это интервалы интегрирования. В примере, приведенном на рис. 6, интегрирование охватывает примерно три четверти периода передачи символа. В действительности величина этого интервала может быть от половины до практически всего периода передачи символа. Данный выбор интервала интегрирования обеспечивает компромисс между объемом проинтегрированного шума и интерференцией в стробе, с одной стороны, и действительностью сигнала, с другой. Схемы данного типа трудно анализировать. Определение производительности обычно выполняется с помощью компьютерного моделирования.

Теперь рассмотрим замкнутый синхронизатор без непосредственного воздействия на частоту локального генератора, где в качестве промежуточного преобразования используется делитель частоты, воздействуя на который можно изменять фазу выходных импульсов. Один из самых распространенных способов корректировки расхождения фазы основан на добавлении и вычитании импульсов, подаваемых на вход промежуточного делителя частоты. Структурная схема такого устройства приведена на рис. 7, где устройство управления отвечает за добавление и вычитание импульсов.



Рис. 7 Структурная схема устройства синхронизации с дискретным управлением

Входное устройство формирует импульсы, совпадающие по времени с моментами перехода одного значения входного сигнала к другому, и определяется в основном структурой (видом модуляции) принимаемых сигналов. Так, при передаче сообщений с помощью двоичных фазоманипулированных сигналов в качестве входных сигналов входного устройства используют сигналы на выходе детектора, и входное устройство регистрирует моменты перехода огибающей последовательности сигналов через нулевой уровень.

На вход «8» фазового детектора поступает последовательность входных импульсов с выхода входного устройства. На входы «6» и «7» фазового детектора поступает последовательность импульсов с выхода делителя, сдвинутых относительно друг друга на угол π. На выхода фазового детектора в случае «опережения» или «отставания» импульсов выхода входного устройства относительно импульсов с выхода делителя формируются импульсы «3а» и «4а». Эти последовательности поступают на входы реверсивных счетчиков усредняющего устройства. В случае «опережения» входных импульсов после усреднения формируется сигнал управления на выходе «3б», далее в устройстве управления происходит добавления импульса в последовательность «1». В случае «отставания» входных импульсов после усреднения формируется сигнал управления на выходе «4б», далее в устройстве управления происходит вычитание импульса в последовательность «1». Эти процедуры будут выполняться до тех пор, пока импульсы входных и опорных последовательностей не совпадут.

На рис. 8 приведена принципиальная схема устройства синхронизации. Временные диаграммы работы устройства синхронизации представлены на рис. 9 .

Рис.8. Принципиальная схема устройства синхронизации



Рис. 9. Временные диаграммы работы устройства синхронизации

Устройство управления осуществляет добавление или вычитание импульсов в последовательностях «1» и «2». На выходах «1» и «2» (рис. 9) формируются импульсные последовательности, сдвинутые относительно друг друга на π (рис. 9). На этом же рисунке изображена вспомогательная инвертированная импульсная последовательность «1». Обе последовательности с выходов «1» и «2» поступают на входы устройства управления, которое выполняет следующие логические операции:

– пропускает импульсную последовательность «1» без изменения на выход «5», если на входах «3» и «4» присутствует напряжение логической 1;

– вычитает один импульс из импульсной последовательности «1» и пропускает ее на выход «5», если на входе «3» присутствует напряжение логического 0, а на выходе «4» – логической 1;

– добавляет один импульс к импульсной последовательности «1» и пропускает ее на выход «5», если на входе «3» присутствует напряжение логической 1, а на входе «г» – логического 0.

Формирование импульсов вычитания и добавления производятся при помощи логических элементов «И» и триггеров, которые входят в устройство управления, если на выходах «3б» и «4б» появляются сигналы управления на добавление или вычитание импульсов.

Усреднение импульсов осуществляется с помощью двух реверсивных счетчиков с коэффициентом пересчета, равным 16. Каждый из счетчиков расположен в устройстве управления перед схемами добавления или вычитания. Выбор коэффициента пересчета зависит от требований к времени вхождения в синхронный режим работы демодулятора сигналов, что, в свою очередь, определяется характеристиками системы передачи сообщений.

## 1.3 Выводы.

Основным недостаток разомкнутых символьных синхронизаторов – наличие неустранимой ошибки с ненулевым средним значением. Эта ошибка уменьшается при увеличении отношения сигнал/шум, но поскольку форма сигнала синхронизации зависит непосредственно от поступающего сигнала, полностью данная ошибка не может быть устранена. Поэтому замкнутые синхронизаторы более точные и сложные в исполнении. Согласно вышесказанному, в работе производится моделирование замкнутых синхронизаторов двух видов:

* алгоритм замкнутого синхронизатора с дискретным управлением;
* алгоритм замкнутого синхронизатора с опережающим и опаздывающим стробированием.

# Глава 2. Моделирование замкнутых синхронизаторов

В данной главе приведено описание моделирования и представлены основные вероятностные и статистические характеристики выбранных замкнутых синхронизаторов.

## 2.1 Условия проведения моделирования.

В качестве среды моделирования выбран Matlab. Следует учесть, что наряду с универсальными языками и средами программирования в настоящее время существует большое число специализированных пакетов, предназначенных для статистических исследований, в том числе, для целей имитационного моделирования. Однако реалии сегодняшнего дня таковы, что де-факто универсальной средой, причём, как для учебных, так и для профессиональных целей является система Matlab (MATrix LABoratory – высокоуровневый интерпретируемый язык программирования, разработанный Кливом Моулером, а также одноимённый пакет прикладных программ, предназначенный для решения инженерных задач в различных научно-технических областях). Данный факт и явился основанием для выбора в качестве среды моделирования системы Matlab.

Для проведения исследований была разработана модель, состоящая из следующих блоков (рис. 10):

1. передатчик
   * источник информации;
   * модулятор;
   * блок формирования информационного пакета;
   * блок добавления преамбулы;
2. канал передачи
   * блок добавления АБГШ;
   * блок рассинхронизации;
3. приемник
   * блок тактовой синхронизации;
   * интегратор;
   * решающее устройство;
4. блок расчета вероятности ошибки;
5. блок расчета статистических характеристик.

Рис. 10 Структурная схема исследуемой модели

В качестве источника информации выбран генератор случайных чисел с равномерным распределением на выходе которого, получаем массив данных, состоящий из 0 и 1.

Далее происходит модуляция информационных данных. В модели производится исследование приема сигналов с фазовой модуляцией на угол 180◦. Поэтому на выходе модулятора массив данных, состоящий из –1 и +1. Далее формируется информационный пакет, передающийся на блок добавления преамбулы. Структура преамбулы и структура пакета данных на выходе этого блока, представлены на рис.1.

В качестве канала передачи выбран канал с АБГШ (Аддитивный белый гауссовский шум). К примеру, моделью АБГШ описывается канал космической связи. Также на сигнал в канале передачи воздействует блок рассинхронизации, который вносит сдвиг в передаваемый пакет. Генератор случайных чисел с равномерным распределением возвращает сдвиг, длиной до целого символа.

Сигнал на приемнике передается первоначально на блок тактовой синхронизации, где на длительности преамбулы, которая известна заранее, производится подстройка локального генератора.

Далее производится прием данных. Запускается интегратор, который тактируется локальным генератором. От точности синхронизации зависит результирующая вероятность ошибки, так как при неточной синхронизации часть энергии будет теряться.

Решающее устройство представляет собой устройство сравнения с нулем, согласно оптимальному различению двоичных противоположных сигналов с одинаковой мощностью.

## **2.2 Исследование помехоустойчивости при фиксированном сдвиге генераторов.**

Покажем, что при ухудшении синхронизации вероятность ошибки возрастает. Для этого рассмотрим алгоритм когерентного приема сигналов ФМ-2 при наличии рассинхронизации передатчика и приемника.

В системе используются следующие сигналы:





Прием сигналов происходит в смеси с АБГШ (*N*0/2). Причем опорное колебание имеет задержку относительно принятого сигнала на Δ.



Сигналы *s1(t), s2(t) и s0(t)* показаны на рис.11.

Общий алгоритм принятия решения для различения двоичных сигналов:



Где  - коэффициент ослабления канала.



Рис. 11 Сигналы ,  и 



Тогда алгоритм принятия решения (с учётом того, что сигналы *s*1(t) и *s*2(t) являются противоположенными):



1. Пусть передан сигнал *s*1(t). Тогда *z*(t) = μ*s*1(t) + *n*(t), где  (аддитивный гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием и дисперсией ).

Алгоритм принятия решения: 



Рассмотрим первый интеграл:



Тогда алгоритм принятия решения примет вид:



Вероятность принять сигнал *s*2(t) при условии, что верен *s*1(t):









Тогда распределение имеет следующий вид:







Можно показать, что



где  – функция Лапласа.

2. Пусть был передан сигнал *s*2(t). Тогда аналогично вышерассмотренному случаю можно показать, что вероятность принять сигнал  при условии, что верен  будет равна



Используя свойства функции Лапласа, можно вычислить вероятность ошибки:



Перейдем к функции Крампа:



где .

Пусть количество отсчетов на символе 16. А сдвиг Δ =[0 2 4 8].

Тогда Δ/T = [0, 1/8, 1/4, 1/2]. На рис. 12 сплошными линиями представлены теоретические кривые при различных отношениях Δ/T, маркерами показаны зависимости, полученные в ходе моделирования.



Рис. 12. Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал-шум при различных сдвигах генераторов

Значение средней вероятности ошибки и ширина доверительных интервалов, для отношения сигнал - шум 6 дБ, приведены в табл. 1:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Рср** |  |  |  |
|  | 2,34E-03 | 9,48E-05 | 1,24E-04 | 1,59E-04 |
|  | 4,10E-03 | 1,25E-04 | 1,64E-04 | 2,10E-04 |
|  | 6,79E-03 | 1,61E-04 | 2,11E-04 | 2,70E-04 |
|  | 1,72E-02 | 2,55E-04 | 3,34E-04 | 4,28E-04 |
|  | 7,95E-02 | 5,30E-04 | 6,95E-04 | 8,90E-04 |

Табл. 1 Значение средней вероятности ошибки и ширина доверительных интервалов для отношения сигнал- шум 6 дБ

В табл.2 показано полученное отношение сигнал-шум, при различных сдвигах локального и внешнего генераторов, а так же при различных фиксированных вероятностях ошибки.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
|  | 4,3 дБ | 4,8 дБ | 5,5 дБ | 7 дБ | 10,5 дБ |
|  | 6,8 дБ | 7,4 дБ | 8 дБ | 8,4 дБ | 12,9 дБ |

Табл. 2 Зависимость тношение сигнал-шум, при различных сдвигах локального и внешнего генераторов и при различных вероятностях ошибки.

Пусть передаются сигналы следующего вида:



Рис. 13 Сигналы ,  и 

Все выкладки, приведенные выше справедливы и для этого случая. Различие будет лишь в следующем:

Алгоритм принятия решения: 

Рассмотрим первый интеграл:



Тогда с учетом вышесказанного:



где  – функция Лапласа.



Используя свойства функции Лапласа, можно вычислить вероятность ошибки:



Перейдем к функции Крампа:



где .

Пусть количество отсчетов на символе 16. А сдвиг Δ =[0 2 4 8].

Тогда Δ/T = [0, 1/8, 1/4, 1/2]. На рис. 14 сплошными линиями представлены теоретические кривые при различных отношениях Δ/T, маркерами показаны зависимости, полученные в ходе моделирования. Исходя из полученного графика, можно сказать, что модель хорошо описывает рассинхронизацию локального и внешнего генераторов.



Рис. 14 Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал-шум при различных сдвигах генераторов.

Значение средней вероятности ошибки и ширина доверительных интервалов, для отношения сигнал - шум 6 дБ, приведены в табл. 3:

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  | **Рср** |  |  |  |
|  | 6,00E-03 | 1,51E-04 | 1,99E-04 | 2,54E-04 |
|  | 1,38E-02 | 2,28E-04 | 2,99E-04 | 3,83E-04 |
|  | 2,99E-02 | 3,34E-04 | 4,38E-04 | 5,60E-04 |
|  | 1,04E-01 | 5,99E-04 | 7,86E-04 | 1,01E-03 |
|  | 4,99E-01 | 9,80E-04 | 1,28E-03 | 1,64E-03 |

Табл. 3 Значение средней вероятности ошибки и ширина доверительных интервалов для отношения сигнал- шум 6 дБ

В табл.4 показано полученное отношение сигнал-шум, при различных сдвигах локального и внешнего генераторов, а так же при различных вероятностях ошибки. Из таблицы следует, что при передаче сигналов, показанных на рис.13 Рош возрастает по сравнению с сигналами на рис. 11, так как при передаче сигналов на рис. 13 теряется в два раза больше энергии.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |
|  | 4,3 дБ | 5,5 дБ | 6,8 дБ | 10,5 дБ | - |
|  | 6,8 дБ | 8 дБ | 9,1 дБ | 12,9 дБ | - |

Табл. 4 Зависимость отношение сигнал-шум, при различных сдвигах локального и внешнего генераторов и при различных вероятностях ошибки.

## **2.3 Алгоритм моделирование замкнутого синхронизатора с дискретным управлением.**

Структурную схему устройства синхронизации с дискретным управлением, представленную на рис. 7, можно привести к следующей обобщенной схеме. Такая обобщённая схема приведена на рис. 15.



Рис. 15. Обобщенная структурная схема устройства тактовой синхронизации

Выход внешнего генератора на рис. 15 соответствует входу входного устройства на рис.6. Рассмотрим более подробную схему устройства тактовой синхронизации с использованием программной реализации. Алгоритм работы устройства, исследуемого в работе, представлен на рис. 16.

В данном алгоритме вместо добавления и вычитания импульсов происходит циклический сдвиг таблицы фаз локального генератора на определенный шаг. Импульсы поступают на управляющие входы устройств выборки и хранения (УВХ). Каждые две соседние выборки из сигналов от внешнего генератора и от локального генератора сравниваются между собой. Правила принятия решения о циклическом сдвиге указаны в алгоритме работы синхронизатора на рис. 16. В случае возникновения ситуации, когда сдвиг возможен как влево, так и вправо, производится сдвиг по умолчанию вправо.



Рис. 16 Блок-схема работы устройства тактовой синхронизации с дискретным управлением.

Пример алгоритма работы продемонстрирован на рис. 17 и 18. В приведенном примере локальный и внешний генераторы сдвинуты на 3 отсчета. Как показано на рис. 18 после применения схемы тактовой синхронизации генераторы точно синхронизированы, что позволит определить начало информационных битов.



Рис. 17. Взаимное расположение внешнего и локального генератора до синхронизации



Рис. 18. Взаимное расположение внешнего и локального генератора после синхронизации

## 2.4 Алгоритм моделирование замкнутого синхронизатора с опережающим и опаздывающим стробированием.

Подробное описание исследуемого алгоритма представлено в пункте 1.2. Алгоритм работы устройства замкнутого синхронизатора с опережающим и опаздывающим стробированием показан на рис. 19. Здесь локальный генератор сдвинут относительно внешнего генератора. Поэтому для определения начала момента интегрирования (t = 0) ищем первый переход из 1 в –1. После нахождения этого перехода происходит интегрирование, находится разность абсолютных значений выходов интегратора и происходит сдвиг локального генератора. При идеальной синхронизации оба периода стробирования попадают в интервал передачи символа и разность абсолютных значений равна нулю. Следовательно, устройство синхронизировано и стабильно. Пример работы алгоритма показан на рис. 20 и 21.



Рис. 19 Блок-схема работы устройства тактовой синхронизации с опережающим и запаздывающим стробированием.



Рис. 20 Взаимное расположение внешнего и локального генератора до синхронизации



Рис. 21 Взаимное расположение внешнего и локального генератора после синхронизации

## 2.4 Результаты исследования вероятностных характеристик тактовых синхронизаторов.

В данной главе представлены вероятностные характеристики для исследуемых тактовых синхронизаторов, полученные в результате эксперимента.

### 2.4.1 Результаты исследования вероятностных характеристик тактового синхронизатора с дискретным управлением.

На рис. 22-25 представлены полученные кривые помехоустойчивости для синхронизатора с дискретным управлением при фиксированной длине преамбулы. Из представленных зависимостей следует, что при увеличении количества отсчетов вероятность ошибки при фиксированном отношении сигнал шум падает. На рис. 25 показано, что при длине преамбулы 8 символов и количестве отсчетов 16 кривая помехоустойчивости имеет совсем небольшой энергетический проигрыш в сравнении с потенциальной помехоустойчивостью. (При Рош=10-2 - 0,04 дБ; Рош=10-3 - 0,06 дБ)



Рис. 22 Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал-шум при фиксированной длине преамбулы равной 2 символа



Рис. 23 Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал-шум при фиксированной длине преамбулы равной 4 символа



Рис. 24 Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал-шум при фиксированной длине преамбулы равной 6 символов



Рис. 25 Зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал-шум при длине преамбулы равной 8 символов

В табл. 5 представлено полученное отношение сигнал шум при фиксированной Рош= 10-2 в зависимости от длины преамбулы и количества отсчетов. Для потенциальной помехоустойчивости при Рош= 10-2 отношение сигнал-шум 4,3 дБ.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Количество  отсчетов  Длина  преамбулы | 2 | | 4 | | 8 | | 16 | |
| ,  дБ | Энерг. проигр, дБ | ,  дБ | Энерг. проигр, дБ | ,  дБ | Энерг. проигр, дБ | ,  дБ | Энерг. проигр, дБ |
| 2 | 16 | 11,7 | 9,4 | 5,1 | 8,8 | 4,5 | 8,6 | 4,3 |
| 4 | 16 | 11,7 | 6,4 | 2,1 | 5,3 | 1,0 | 5,0 | 0,7 |
| 6 | 16 | 11,7 | 6,0 | 1,7 | 4,8 | 0,5 | 4,5 | 0,2 |
| 8 | 16 | 11,7 | 5,9 | 1,6 | 4,7 | 0,4 | 4,34 | 0,04 |

Табл. 5 Зависимость отношения сигнал-шум и энергетического проигрыша для различных длин преамбулы и количества отсчетов.

На рис.26 представлена зависимость вероятности ошибки от длины преамбулы при фиксированном отношении сигнал-шум (6 дБ). При количестве отсчетов равным двум, зависимости, от длины преамбулы нет, так как при сдвиге генератора, получаем либо абсолютную рассинхронизацию, либо абсолютную синхронизацию.



Рис. 26 Зависимость вероятности ошибки от длины преамбулы при фиксированном отношении сигнал/шум, равном 6дБ.

### 2.4.2 Результаты исследования вероятностных характеристик тактового синхронизатора с опережающим и опаздывающим стробированием.

На рис. 27 представлена зависимость вероятности ошибки от величины сдвигов интеграторов. Из представленных зависимостей следует, что при d=2 вероятность ошибки при фиксированном отношении сигнал шум наименьшая. Поэтому все характеристики, представленные далее, получены при d=2.



Рис. 27 Зависимость вероятности ошибки от сдвига интеграторов.

На рис.28 представлена зависимость вероятности ошибки от отношения сигнал/шум при различных длинах преамбулы. Стоит отметить, что даже при длине преамбулы равной 8 имеется энергетический проигрыш. В работе не исследуется зависимость от кол-ва отсчетов, так как если не учитывать максимальное количество отсчетов, а их в работе 16, то могут возникать случаи, когда необходимые отсчеты могут не попадать в интервал интегрирования, тем самым сильно возрастет вероятность ошибочного приема.



Рис. 28 Зависимость вероятности ошибки от различных сдвигах интеграторов.

В табл. 6 представлено полученное отношение сигнал шум при фиксированной Рош= 10-2 в зависимости от длины преамбулы. Для потенциальной помехоустойчивости при Рош= 10-2 отношение сигнал-шум 4,3 дБ.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Длина  преамбулы | ,  дБ | Энерг. проигр, дБ |
| 2 | 11 | 6,7 |
| 4 | 7,3 | 3 |
| 6 | 6,2 | 1,9 |
| 8 | 6 | 1,7 |

Табл. 6 Зависимость отношения сигнал-шум и энергетического проигрыша для различных длин преамбулы и количества отсчетов.

## 2.5 Результаты исследования статистических характеристик тактовых синхронизаторов.

В данной главе представлены статистические характеристики для исследуемых тактовых синхронизаторов, полученные в результате эксперимента. К таким характеристикам относятся: математическое ожидание и дисперсия в зависимости от длины преамбулы и от количества отсчетов.

### 2.5.1 Результаты исследования статистических характеристик тактового синхронизатора с дискретным управлением.

На рис. 29-30 представлены полученные статистические характеристики для синхронизатора с дискретным управлением при фиксированной длине преамбулы и количества отсчетов. На рис. 29 математическое ожидание отрицательно, что можно объяснить особенностями построения алгоритма, а именно, тем, что количество сдвигов таблицы фаз локального генератора вправо больше, чем влево. При количестве отсчетов равному 16, математическое ожидание стремится к нулю, что означает полную синхронизацию генераторов. Следовательно, кривая помехоустойчивости практически не имеет энергетического проигрыша в сравнении с потенциальной помехоустойчивостью.



Рис.29. Зависимость математического ожидания от количества отсчетов



Рис. 30 Зависимость дисперсии от количества отсчетов.

### 2.5.2 Результаты исследования статистических характеристик тактового синхронизатора с опережающим и опаздывающим стробированием.

На рис. 31-32 представлены полученные статистические характеристики для синхронизатора с опережающим и опаздывающим стробированием в зависимости от длины преамбулы. Математическое ожидание даже при длине преамбулы равной 12 не ноль, что означает наличие энергетического проигрыша. Математическое ожидание не уменьшается значения меньше 1.5, а дисперсия менее 2, что объясняется особенностью работы алгоритма, а именно всегда будет существовать остаточный сдвиг после осуществления синхронизации, причем вероятность сдвига на 1 и 2 отсчета будет одинаковой.



Рис. 31 Зависимость математического ожидания от длины преамбулы.



Рис. 32 Зависимость дисперсии от длины преамбулы

## 2.6 Выводы.

1. Синхронизатор с дискретным управлением

В ходе моделирования получены кривые помехоустойчивости в зависимости от длины преамбулы и количества отсчетов на символе. Согласно этим результатам небольшим энергетическим проигрышем (меньше 3 дБ) обладают преамбулы со следующими параметрами: длина преамбулы больше или равна 4 и количество отсчетов больше или равно 4. В граничном случае при длине преамбулы равной 4 и количестве отсчетов равном 4 энергетический проигрыш составляет 2,1 дБ (1,62 раза). При длине преамбулы равной 8 и количестве отсчетов равном 16 энергетический проигрыш составляет лишь 0,04 дБ (1,01 раз).

Полученные статистические характеристики не противоречат полученным результатам, так при количестве отсчетов равном 16, математическое ожидание и дисперсия стремятся к нулю, что означает незначительный энергетический проигрыш.

2. Синхронизатор с опережающим и опаздывающим стробированием.

В ходе моделирование определен оптимальный с точки зрения помехоустойчивости сдвиг интеграторов. При количестве отсчетов равным 16, этот сдвиг d равен 2. Наилучшая помехоустойчивость достигается при длине преамбулы равной 8, в этом случае энергетический проигрыш составляет 1,7 дБ (1,47 раз).

В полученных статистических характеристиках мат. ожидание не стремится к нулю, а стремиться к постоянному значению. Это можно объяснить тем, что в силу особенности построения алгоритма, остаточный сдвиг после синхронизации равен либо одному, либо двум символ. В среднем же получается, что математическое ожидание равно 1,5. Следовательно, что при любой длине преамбулы будет энергетический проигрыш.

# Заключение.

Существует два типа тактовых синхронизаторов: разомкнутые и замкнутые. Основным недостаток разомкнутых синхронизаторов – наличие неустранимой ошибки с ненулевым средним значением. Поэтому в работе исследовались замкнутые синхронизаторы двух типов:

1. с дискретным управлением
2. с опережающим и опаздывающим стробированием

В табл. 7 представлено сравнение отношения сигнал-шум исследованных алгоритмов тактовой синхронизации при различных длинах преамбулы.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Длина  преамбулы | Синхронизатор 1  , дБ | Синхронизатор 2  , дБ | Энергет.проигрыш относительно друг друга |
| 2 | 8,6 | 11 | 2,4 |
| 4 | 5,0 | 7,3 | 2,3 |
| 6 | 4,5 | 6,2 | 2,2 |
| 8 | 4,34 | 6 | 1,66 |

Табл. 7 Отношение сигнал-шум при различных длинах преамбулы для исследуемых синхронизаторов.

При одинаковых параметрах преамбулы, первый алгоритм имеет меньший энергетический проигрыш, чем второй. Следовательно, алгоритм с дискретным управлением более помехоустойчив. В ходе моделирования были получены следующие особенности алгоритмов:

* Для алгоритма с дискретным управлением:
  + математическое ожидание остаточного сдвига генераторов после тактовой синхронизации отрицательно;
  + при количестве отсчетов на символе, равном 16, и длине преамбулы равной 8, энергетический проигрыш составляет 0.04 дБ.
* Для алгоритма с опережающим и опаздывающим стробированием:
  + при количестве отсчетов на символе равному 16, оптимальный с точки зрения помехоустойчивости сдвиг интеграторов – 2 отсчета;
  + математическое ожидание и дисперсия остаточного сдвига генераторов после тактовой синхронизации стремятся к постоянному значению.

# Список литературы.

1. Скляр Бернард, Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ.-М.: Издательский дом «Вильямс», 2003.- 1104с. : ил. – Парал. тит. англ.
2. Шахтарин Б.И. и др. Синхронизация в радиосвязи и радионавигации: Учебн. Пособие, 2007. – 256 с.: ил.
3. Стефано Брени, Синхронизация цифровых сетей связи под редакцией д-ра.тех.н, проф. А.В. Рыжкова. Москва «Мир», 2003.-415с.:ил.
4. Спилкер Дж., Цифровая спутниковая связь. Пер. с англ./Под.ред. В.В. Маркова.-М.:Связь, 1972.-592., ил.
5. Давыдкин П.Н., Колтунов М.Н., Рыжков А.В., Тактовая синхронизация/ Под ред. М.Н. Колтунова. – М.: Эко-Трендз, 2004.-205 с.:ил.