

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК \_\_\_\_\_

Майер  
Вадим Юрьевич

Алгоритмы компенсации фазовой ошибки  
при демодуляции сигналов с цифровой модуляцией

### **АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-39 81 03 – Информационные радиотехнологии

---

*(подпись магистранта)*

Научный руководитель  
Козел Виктор Михайлович  
д.т.н., доцент

---

*(подпись научного руководителя)*

Минск 2016

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объект исследования – синхронизация сигналов при приеме с цифровой модуляцией.

Предмет исследования – алгоритмы компенсации фазовой ошибки при демодуляции сигналов с цифровой модуляцией.

Целью данной диссертации является исследование алгоритмов компенсации фазовых ошибок при демодуляции сигналов с цифровой модуляцией КАМ, выбор оптимального алгоритма и на его основе построить имитационную модель восстановления несущего колебания принимаемого сигнала.

Задачи исследования поставлены следующие:

1. Провести обзор и анализ методов решения проблемы возникновения фазовой ошибки при приеме сигналов с цифровой модуляцией.
2. Исследовать способы решения проблемы восстановления несущего колебания при синхронизации сигналов с цифровой модуляцией.
3. На основе оптимального алгоритма построить имитационную модель восстановления несущего колебания при приеме сигналов с цифровой модуляцией QAM-16 в графической среде Simulink.

## ВВЕДЕНИЕ

Переход к каждому новому поколению систем связи позволяет передавать все больше полезной информации: так, если в 80-х годах прошлого столетия скорость передачи данных мобильных абонентов не превышала 10 кбит/сек, в 90-х годах скорость возросла на порядок – до сотен кбит/сек, в новом тысячелетии скорость возросла уже до единиц и десятков Мбит/сек, а затем и до 1 Гбит/сек. На сегодняшний день стала возможной организация прямых видеоконференций со многим количеством участников, разбросанных по всему миру; передача больших объемов видео-, аудио- и текстовой информации за считанные секунды любому жителю нашей планеты. Основой такого технического прорыва в сфере коммуникаций стала цифровая связь. Цифровые системы связи являются основой современных систем связи и подвижных систем связи (систем мобильной связи).

При передаче цифровой информации очень важным является построение системы синхронизации. Системы синхронизации в настоящее время широко распространены во всех областях применения радиоэлектронной техники. Значение систем синхронизации в современной радиоаппаратуре трудно переоценить, поскольку именно они определяют качество работы системы в целом. К настоящему времени появилась возможность реализации принципиально новых алгоритмов синхронизации, многие из которых невозможно было реализовать на элементной базе прошлых поколений. Наука никогда не стоит на месте, и в настоящее время существует множество публикаций, посвященных системам синхронизации, поскольку задача синхронизации является, пожалуй, самой неоднозначной с точки зрения методологии и теории оптимальности.

Круг задач, решаемых системами синхронизации, весьма обширен: слежение за несущими и поднесущими частотами принимаемых сигналов, когерентная демодуляция аналоговых и цифровых сигналов с частотной и фазовой модуляцией, синхронизация и демодуляция двоичных символов цифровой информации, измерение частоты и фазы сигналов, тактовая синхронизация, синтез сложных радиотехнических сигналов, синтез сетки высокостабильных частот, стабилизация частот генераторов различных диапазонов.

Известно, что наибольшая энергетическая и спектральная эффективность передачи цифровой (дискретной) информации достигается при использовании методов фазовой модуляции, таких как BPSK, QPSK, M-PSK и M-QAM. Прием сигналов, модулированных в соответствии с данными методами, осуществляется по так называемой когерентной схеме. Данная схема

предполагает точное знание частоты и фазы несущего колебания. В реальных условиях частота и фаза несущего колебания не известна. Это обусловлено особенностями распространения радиоволн, нестабильностью частоты опорных генераторов, изменяющимся местоположением передающего и приемного устройств, эффектом Доплера и прочими.

В связи с тем что параметры несущего колебания заранее определены быть не могут, при осуществлении когерентной демодуляции сигналов необходимо осуществлять оценку частоты и фазы несущего колебания. Результаты данной оценки затем используются для компенсации возможных ошибок установки опорного колебания в демодуляторе.

Целью данной диссертации является исследование и анализ алгоритмов компенсации фазовых ошибок при демодуляции сигналов с цифровой модуляцией КАМ, выбор оптимального алгоритма и на его основе построить имитационную модель восстановления несущего колебания принимаемого сигнала.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность проблемы, отмечена новизна, формулируются цель и задачи работы, кратко излагается содержание диссертации, перечисляются основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору литературы и постановке основных задач исследования. Для этого вначале рассматривается построение систем цифровой связи, виды применяемой модуляции и их спектральная и энергетическая эффективность. Далее приводятся три поколения архитектуры приемной части систем цифровой связи, а также анализируется синхронизация и демодуляция принимаемого сигнала.

Вторая глава посвящена обзору и анализу методов решения проблемы возникновения фазовой ошибки при приеме сигналов с цифровой модуляцией.

Все цифровые системы связи требуют наличия нескольких уровней синхронизации на стороне приемника. Когерентные схемы демодуляции сигнала подразумевают наличие на стороне приемника опорного колебания, с которым производится сравнение принимаемого сигнала. Основой многих систем синхронизации является контур фазовой автоподстройки частоты (рисунок 1.11). В результате работы петли ФАПЧ сигнал местного гетеродина подстраивается по фазе и частоте с принимаемым сигналом, что и позволяет осуществить когерентное детектирование. Таким образом, для работы петли ФАПЧ необходимо наличие в сигнале устойчивого синусоидального колебания.

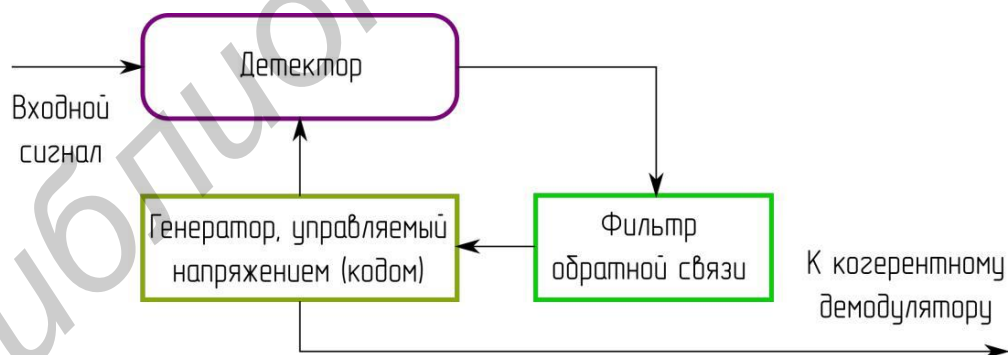


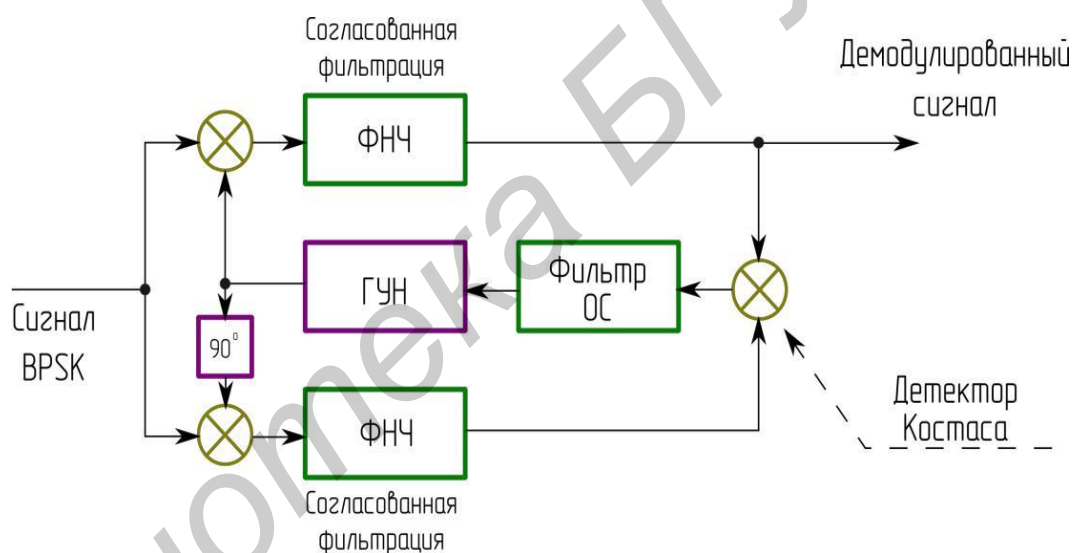
Рисунок 1.1 – Структурная схема петли фазовой автоподстройки частоты

Большинство современных систем связи работают с подавлением несущего колебания, которое практически не несет полезной информации. Таким образом, классический контур ФАПЧ не может восстановить несущее колебание на приемном конце линии связи.

Например, рассматривая модуляцию BPSK и полагая, что априорно сигналы логического нуля и единицы равновероятны, усредненная энергия несущего колебания будет равна нулю. Для синхронизации несущего колебания необходимо устранить модуляцию. Сделать это можно путем возведения входного сигнала в квадрат по схеме, предложенной отечественным ученым А. А. Пистолькорсом.

Возведение в квадрат сигнала BPSK снимает с него модуляцию, что позволяет выполнить синхронизацию на удвоенной частоте несущего колебания при помощи классической петли ФАПЧ. Для синхронизации сигналов QPSK необходимо возведение сигнала в четвертую степень.

Другой разновидностью схем восстановления несущего колебания является синфазно-квадратурная петля, предложенная Джоном Костасом (рисунок 1.2).

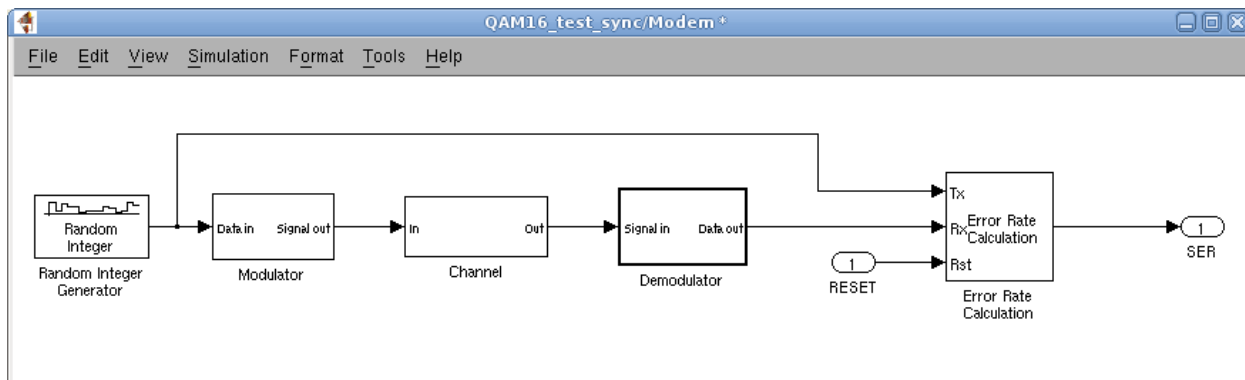


**Рисунок 1.2 – Синфазно-квадратурная схема восстановления несущего колебания (петля Костаса)**

Главным отличием петли Костаса от предыдущей схемы является отсутствие операции возведения сигнала в квадрат, реализация которой в цифровом виде требует повышения разрядности шины данных.

Необходимо отметить, что с точки зрения теоретических характеристик эти схемы равнозначны.

В третьей главе решается главная цель диссертации – построение имитационной модели системы связи восстановления несущего колебания принимаемого сигнала. Общая схема моделированной системы представлена на рисунке 1.3.

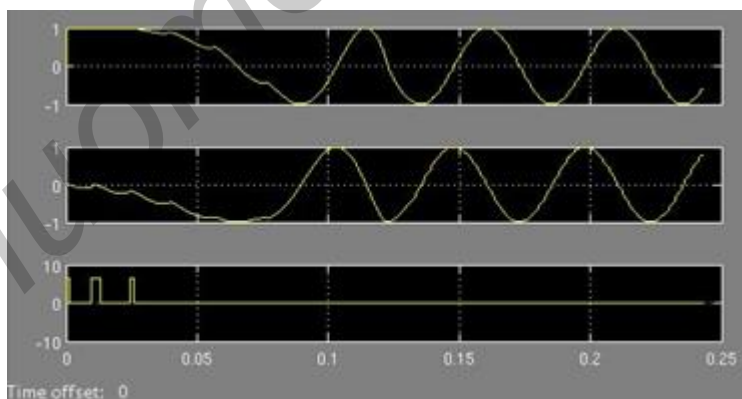


**Рисунок 1.3 – Модель системы цифровой связи**

Построенная модель состоит из формирователя сигнала (модулятора), канала связи с АБГШ, блока приемной части с петлей восстановления несущего колебания.

В ходе моделирования были получены графики результатов воздействия АБГШ на принимаемый сигнал, частотного рассогласования при приеме, фазового рассогласования при приеме.

Из полученных данных диаграммы коррекции частотного рассогласования (рисунок 1.4) получили, что через некоторое время сигнал ошибки приходит к постоянному значению, что означает о вхождении системы в синхронизм.



**Рисунок 1.4 – Составляющие сигнала коррекции и сигнал ошибки с выхода фильтра обратной связи**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации проведен теоретический анализ построения систем цифровой связи с цифровой модуляцией, обзор методов решения проблемы возникновения фазовой ошибки при приеме сигналов с цифровой модуляцией и, на основе исследованных данных, построена имитационная модель восстановления несущего колебания принимаемого сигнала. Проанализирована специально-техническая литература с целью выделения необходимой информации для построения систем связи. В соответствии со сформулированными целями и задачами на диссертационное исследование спроектирована схема системы связи. Построенная схема состоит из:

- формирователя сигнала (модулятора);
- канала связи с АБГШ;
- блока приемной части с петлей восстановления несущего колебания;

В ходе моделирования были получены графики результатов воздействия АБГШ на принимаемый сигнал, частотного рассогласования при приеме, фазового рассогласования при приеме.

Из полученных данных диаграммы коррекции частотного рассогласования получили, что через некоторое время сигнал ошибки приходит к постоянному значению, что означает о вхождении системы в синхронизм. Следовательно поставленная цель магистерской диссертации достигнута.