

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.391:004.383.3

Захарчук  
Иван Владимирович

**РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА СИФОРОВА КОМПЕНСАЦИИ  
ФАЗОВОЙ ОШИБКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ DSP-ПРОЦЕССОРА**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра техники и технологии  
по специальности 1-39 81 03 «Информационные радиотехнологии»

---

Научный руководитель  
Козел Виктор Михайлович  
кандидат технических наук, доцент

---

Минск, 2017

## КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших тенденций развития современных приборных комплексов является применение быстроразвивающихся цифровых технологий в системах сигнальной обработки. Это связано, прежде всего, с известными преимуществами применения цифровых сигналов: высокой потенциальной помехоустойчивостью, возможностями оптимизации, решениями задачи быстрой адаптации параметров системы к управляющему воздействию, перспективами применения универсальных аппаратных и программных решений.

Существующий уровень систем обработки сигналов, разработок микроэлектронной элементной базы очень высок, так как достижения таких лидеров в области средств обработки информации, как компании Intel, Texas Instruments, Analog Devices, обеспечивают практически любые потребности в обработке информации.

Успешное воплощение перспектив развития микроэлектроники во многом базируется на достижениях цифровой обработки сигналов (ЦОС), призванной решать задачи приема, формирования, обработки и передачи информации в реальном масштабе времени. Осуществление сложных алгоритмов ЦОС требует, в свою очередь, применения эффективных базовых алгоритмов ЦОС (фильтрации, спектрального анализа и синтеза сигналов), экономично использующих соответствующие технические ресурсы.

Основная проблематика в области ЦОС заключена в разработке путей преодоления ограничений, обусловленных имеющимися ресурсами: возможностями элементной базы, допустимой величиной программно-аппаратных затрат.

В разработку теории обработки цифровых сигналов активных датчиков и построения новых вычислительных систем существенный вклад внесли российские ученые: В. А. Котельников, Я. Д. Ширман, Ю. В. Гуляев, С. А. Лебедев, А.С. Сигов и многие другие.

В теорию и технику создания приборных комплексов информационно-измерительных систем и аппаратуры большой вклад внесли ученые А. Л. Минц, А. И. Берг, И. Сифоров, А. А. Расплетин, В. П. Ефремов и др.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с научными исследованиями университета.** Результаты диссертационного исследования были использованы при проведении следующих научно-исследовательских работ:

- алгоритмы компенсации фазовой ошибки;
- обзор методов модуляции и демодуляции сигналов;
- обзор современных DSP-процессоров.

**Цель и задачи исследования.** Целью магистерской работы является проведение анализа современных методов модуляции и демодуляции сигналов, определить влияние фазовой ошибки на получаемый сигнал и источники возникновения фазовой ошибки, изучить методы компенсации фазовой ошибки, разработать программный код для алгоритма Сифорова на выбранном микропроцессоре и построить имитационную модель системы связи восстановления несущего колебания принимаемого сигнала.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать теоретическую основу современных методов модуляции и демодуляции сигналов;
- определить основные проблемы, возникающие при передаче, приеме и обработке сигналов в современных системах связи;
- изучить источники возникновения и способы коррекции фазовой неоднозначности при обработке сигналов, а также методы компенсации фазовых ошибок;
- на практике разработать программный код для алгоритма Сифорова на выбранном микропроцессоре для цифровой обработки сигналов;
- выполнить имитационное моделирование системы связи восстановления несущего колебания принимаемого сигнала.

**Новизна полученных результатов.** Применение DSP-процессора позволило усовершенствовать помехоустойчивость устройства, достичь простоты фильтрации модулированного сигнала. Кроме этого дано дальнейшее развитие в системах телевизионного вещания, системах спутникового теле- и радиовещания и радиорелейных линиях.

### **Положения, выносимые на защиту.**

Краткий обзор методов модуляции и демодуляции сигналов, влияние фазовой ошибки на получаемый сигнал и источники возникновения фазовой ошибки.

Анализ алгоритма и схемы Сифорова, описывается проблема, которую частично решает схема Сифорова.

Выбор и обоснование выбранного DSP-процессора. Приводится построение имитационной модели системы связи восстановления несущего колебания принимаемого сигнала.

Трудности реализации алгоритма Сифорова на выбранном DSP-процессоре.

#### **Апробация результатов диссертации.**

Результаты исследований, включенные в магистерскую диссертацию, были представлены на 12-ой международной молодежной научно-технической конференции в Севастополе.

#### **Опубликованность результатов исследования.**

Результаты работы опубликованы в тезисах 12-ой международной молодежной научно-технической конференции в Севастополе и в одном научном журнале «Наука и жизнь».

#### **Структура и объем диссертации.**

Работа состоит из нескольких глав и первой из них является введение, в котором обосновывается актуальность темы диссертации, указывается необходимость проведения исследований для развития данной отрасли науки.

Далее приводится описание методов модуляции и демодуляции сигнала и фазовые ошибки, влияние фазовой ошибки на получаемый сигнал, источники возникновения фазовой ошибки, методы компенсации ошибки. Это делается для составления теоретической базы, которая понадобится для анализа алгоритма и схемы Сифорова, а также реализации этого алгоритма с применением DSP-процессора.

В главе алгоритм Сифорова происходит анализ самого алгоритма и схемы, выбор и обоснование выбранного DSP-процессора, общее описание и характеристики выбранного процессора, трудности при реализации алгоритма Сифорова.

Следующая глава посвящается разработке программного кода для реализации алгоритма Сифорова. Описываются модули и функции процессора, которые были задействованы во время разработки.

Четвертая глава повествует об имитационной модели связи восстановления несущего колебания принимаемого сигнала для лучшего представления ситуации, когда входящий сигнал проходит обработку, фильтрацию от помех и стабилизацию.

В результатах и заключении приводится описание того, что поставленные цели и задачи были выполнены с учетом трудностей, возникших в ходе работы.

Общий объем магистерской диссертации составляет 83 страницы, включая 51 иллюстрацию, 2 таблицы, библиографический список из 15 наименований, 1 приложение.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной работе были рассмотрены основные принципы процесса модуляции сигналов. Дается пояснение типов и понятий модуляции, рассмотрены влияния фазовой ошибки на получаемый сигнал, рассмотрены методы компенсации фазовой ошибки. Более подробно был проанализирован метод Сифорова. Рассмотрены алгоритм и схема для оценки и компенсации при приеме. Выполнено обоснование выбора DSP-процессора для реализации алгоритма Сифорова. Так же была произведена симуляция работы схемы Сифорова в MATLAB и доказана ее эффективность.

# СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Публикация на 12-ой Международной молодёжной научно-технической конференции.

## АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ФАЗОВОЙ ОШИБКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ DSP-ПРОЦЕССОРА

Захарчук И. В.

Научный руководитель: канд. техн. наук, доц. Козел В. М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Беларусь  
E-mail: ivannn787@gmail.com

**Аннотация** — Приведена реализация следящего алгоритма Сифорова компенсации фазовой ошибки с использованием DSP-процессора.

### 1. Введение

До недавнего времени физики и инженеры в области электронной техники в своих расчетах использовали только законы классической физики. И это было вполне оправдано. Однако время идет и ситуация меняется. Интегральные микросхемы становятся все более сложными и объединяют в себе все большее количество элементов, следовательно, должны уменьшаться размеры этих элементов. Эти размеры достигли долей микрона. В этот момент описание на языке классической физики теряет всякий смысл и создатели вынуждены искать способы решения возникающих проблем.

Нанoeлектроника является новой областью науки и техники, формирующейся сегодня на основе последних достижений физики твердого тела, квантовой электроники. Ее содержание определяется необходимостью установления фундаментальных закономерностей, определяющих физико-химические особенности формирования наноразмерных структур (структур размером от единиц до десятков нанометров,  $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ), их электронные и оптические свойства. Исследования в области нанoeлектроники важны для разработки новых принципов, а вместе с ними и нового поколения сверминиматюрных супербыстродействующих систем информации.

### 2. Основная часть

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.

Структурная схема контура фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) показана на рисунке 1.20.

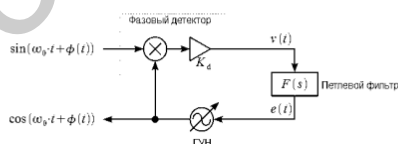


Рисунок 2.1 – Структурная схема контура ФАПЧ

В состав контура входит фазовый детектор, представляющий собой умножитель с коэффициентом усиления  $K_d$ , петлевой фильтр  $F(s)$ , который формирует управляющее напряжение  $e(t)$  и генератор управляемый напряжением (ГУН).

Рассмотрим структурную схему показанную на рисунке 2.1. Для упрощения введем следующее обозначение:

$$\psi(t) = K_d \int_0^t e(t) dt,$$

тогда сигнал на выходе ГУН равен  $\cos(\omega_0 \cdot t + \psi(t))$ , а сигнал на выходе фазового детектора:

$$v(t) = K_d \sin(\omega_0 t + \phi(t)) \cos(\omega_0 t + \psi(t)) = \dots \\ \dots = \frac{K_d}{2} \sin(2\omega_0 t + \phi(t) + \psi(t)) + \frac{K_d}{2} \sin(\phi(t) - \psi(t)).$$

Сигнал на выходе фазового детектора представляет собой сумму сигнала на удвоенной частоте  $2\omega_0$  и сигнала зависящего от разности фаз входного сигнала и ГУН. Петлевой фильтр представляет собой ФНЧ, который подавляет сигнал на удвоенной частоте, тогда на выходе петлевого фильтра получим управляющий сигнал  $e(t)$ :

$$e(t) = \frac{K_d}{2} \sin(\phi(t) - \psi(t)) = \frac{K_d}{2} \sin(\Delta\phi(t))$$

Управляющий сигнал на выходе петлевого фильтра пропорционален синусу разности фаз принятого и опорного сигналов.

### 3. Заключение

В данной работе была рассмотрена суть процесса модуляции. Дается пояснение типов и понятий модуляции, рассмотрены влияния фазовой ошибки на получаемый сигнал, рассмотрены методы компенсации фазовой ошибки. Более подробно был рассмотрен метод Сифорова. Подробно рассмотрели алгоритм и схему для оценки и компенсации при приеме. Рассмотрели вопрос выбора DSP-процессора. Так же была произведена симуляция работы схемы Сифорова в MATLAB.

### 4. Список литературы

- [1] Н. И. Листопад [и др.] Теоретические основы цифровой радиосвязи : учеб. пособие / . – Мн. : БГУИР, 2012. – 330 с.
- [2] Глинченко, А. С. Цифровая обработка сигналов. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 432с.

## ALGORITHM FOR THE PHASE ERROR COMPENSATION USING DSP-PROCESSOR

Zakhartchouk I. V.

Scientific adviser: Kozel V. M.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Belarus

**Abstract** — The implementation of the tracking algorithm Siforov of phase error compensation using the DSP-processor is presented.