

*На правах рукописи*



**ШАКУРСКИЙ МАКСИМ ВИКТОРОВИЧ**

**ЦИФРОВЫЕ ФИЛЬТРЫ СО СМЕЩАЕМОЙ ФАЗОЧАСТОТНОЙ  
ХАРАКТЕРИСТИКОЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ЧАСТОТНОЙ  
ВЫБОРКИ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства  
телекоммуникаций

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Самара 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет сервиса (ФГБОУ ВПО «ПВГУС»)

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент  
**Иванов Виктор Васильевич**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор  
**Акчурин Эдуард Александрович**

кандидат технических наук, доцент  
**Кудрявцев Илья Александрович**

Ведущая организация: филиал федерального государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт радио» – «Самарское отделение научно-исследовательского института радио» (филиал ФГУП «НИИР-СОНИИР»)

Защита состоится «02» марта 2012 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 219.003.02 при Поволжском государственном университете телекоммуникаций и информатики по адресу: 443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, д. 23.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (ФГОБУ ВПО ПГУТИ).

Автореферат разослан «01» февраля 2012 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 219.003.02  
доктор технических наук, профессор



Д. В. Мишин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие систем телекоммуникаций обусловлено совершенствованием алгоритмов цифровой обработки сигналов и разработкой специализированных процессоров, позволяющих реализовать высокоэффективные и компактные средства связи. Благодаря своим преимуществам цифровая обработка сигналов используется почти на всех этапах работы устройств телекоммуникаций, что привело к повсеместному внедрению средств мобильной связи. Из устройств цифровой обработки сигналов наиболее распространенными являются цифровые фильтры (ЦФ), основным недостатком которых является ограниченное быстродействие. Возможность эффективной реализации цифровой обработки сигналов впервые была показана в работе J. W. Cooley, J. W. Tukey. Среди учёных, осуществивших значительный вклад в развитие цифровой обработки сигналов, выделяются R. С. Agarwal, L. I. Bluestein, J. W. Cooley, B. Gold, I. J. Good, J. H. McClellan, H. J. Nussbaumer, A. V. Oppenheim, R. D. Preuss, L. R. Rabiner, C. M. Rader, R. W. Shafer, T. G. Stokham, L. H. Thomas, J. W. Tukey, S. Winograd, E. C. Ifeachor, С. И. Баранов, Е. П. Балашов, В. М. Глушков, Э. В. Евреинов, Б. М. Каган, А. В. Каляев, М. А. Карцев, С. А. Майоров, Б. Н. Малиновский, Г. И. Новиков, И. В. Прангишвили, Л. Н. Преснухин, В. В. Прижиялковский, Д. В. Пузанков, Г. Е. Пухов, К. Г. Самофалов, В. Г. Хорошевский, Л. М. Гольденберг, В. А. Сойфер, В. В. Витязев, В. П. Дворкович, Ю. Б. Зубарев и др.

В течение последних двух-трех десятилетий учёными были проведены фундаментальные исследования и разработаны новые алгоритмы. В результате цифровая обработка сигналов во многих прикладных задачах вытеснила аналоговую.

Проблемой, ограничивающей использование цифровых фильтров в устройствах телекоммуникаций, является необходимость работы в широком диапазоне частот. При увеличении частот использования цифровых фильтров уменьшается интервал дискретизации, что ограничивает максимально допустимый порядок цифровых фильтров.

Недостатком известных алгоритмов цифровой фильтрации является сложность перестройки частотных характеристик фильтров. Одной из актуальных задач является разработка цифровых фильтров с независимым смещением фазочастотной характеристики. Данное свойство позволяет использовать фильтры в фазовых модуляторах, квадратурных манипуляторах, устройствах фазовой синхронизации, автогенераторных преобразователях девиации частоты, преобразователях Гильберта и др.

Следовательно, разработка цифровых фильтров со смещаемой фазочастотной характеристикой и высокой вычислительной эффективностью является актуальной задачей.

**Цель работы.** Исследование и разработка вычислительно-эффективных цифровых КИХ-фильтров со смещаемой фазочастотной характеристикой. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Исследование алгоритмов цифровой фильтрации на основе метода частотной выборки и скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье, а также способов перенастройки частотной характеристики цифровых фильтров.

2. Разработка математической модели элементарных цифровых фильтров на основе скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье со смещаемой фазочастотной характеристикой.

3. Разработка методики подбора амплитудных коэффициентов выходных сигналов элементарных цифровых фильтров с целью получения заданной амплитудно-частотной характеристики цифрового фильтра.

4. Синтез структурных схем цифровых фильтров на основе скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье со смещаемой фазочастотной характеристикой и их численное моделирование.

5. Разработка алгоритмов и программ работы цифровых фильтров на основе скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье со смещаемой фазочастотной характеристикой.

**Методы исследований.** При решении поставленных задач использовались теория цифровой обработки сигналов, методы спектрального анализа, теория функций комплексного переменного, метод численного моделирования.

#### **Научная новизна работы**

1. Разработаны математические модели элементарных цифровых фильтров со смещаемой фазочастотной характеристикой на основе скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье.

2. Разработан способ, позволяющий осуществлять смещение фазочастотной характеристики цифрового фильтра при сохранении вычислительной эффективности.

3. Разработан способ, позволяющий осуществлять смещение фазочастотной характеристики цифрового фильтра без переходного процесса.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Методика подбора амплитудных коэффициентов выходных сигналов элементарных цифровых фильтров с целью настройки амплитудно-частотной характеристики цифрового фильтра.

2. Структурные схемы цифровых фильтров со смещаемой фазочастотной характеристикой на основе скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье.

3. Алгоритмы и программы реализации цифровых фильтров со смещаемой фазочастотной характеристикой на основе скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье для среды Matlab.

4. Численные модели цифровых фильтров со смещаемыми фазочастотными характеристиками.

#### **На защиту выносятся:**

1. Математические модели цифровых фильтров со смещаемой фазочастотной характеристикой на основе метода частотной выборки и скользящего преобразования Фурье.

2. Способ, позволяющий осуществлять смещение фазочастотной характеристики цифрового фильтра при сохранении вычислительной эффективности.

3. Способ, позволяющий осуществлять смещение фазочастотной характеристики цифрового фильтра без переходного процесса.

**Обоснованность и достоверность** полученных результатов обеспечивается соответствием полученных математических моделей классическим представлениям цифровой обработки сигналов и подтверждена численным моделированием и программной реализацией фильтров.

**Личный вклад автора.** Полученные в диссертационной работе математические модели цифровых фильтров, технология подбора амплитудных коэффициентов вы-

ходных сигналов элементарных цифровых фильтров, структурные схемы, алгоритмы работы и программы цифровых фильтров получены лично диссертантом.

### **Апробация результатов работы**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международных конференциях: «Цифровая обработка сигналов и её применение» (Москва, 2010 г.), «Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности» (Астрахань, 2009 г.), «Электронная культура. Информационные технологии будущего и современное электронное обучение» (Астрахань, 2009 г.), «Современные информационные и электронные технологии» (Одесса, 2010 г.), «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации» (Тольятти, 2011 г.), «Актуальные проблемы информатики и информационных технологий» (Тамбов, 2010 г.), «Аналитические и численные методы моделирования естественнонаучных и социальных проблем» (Пенза, 2010), «Автоматизация технологических процессов и производственный контроль» (Тольятти, 2006 г.), «Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии» (Тольятти, 2009 г.), «Наука промышленности и сервису» (Тольятти, 2009, 2010, 2011 гг.). На всероссийских конференциях: «Приоритетные направления современной российской науки глазами молодых учёных» (Рязань, 2009 г.), «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов» (Пенза, 2010, 2011 гг.).

### **Реализация результатов работы**

Работа выполнялась в рамках НИР «Исследование метода цифровой фильтрации и синтеза цифровых динамических звеньев на базе преобразования спектра скользящей выборки сигнала». Разработанные структурные схемы цифровых преобразователей девиации частоты периодического сигнала и девиации частоты в девиацию фазы периодического сигнала, на которые получены патенты на полезную модель, переданы для использования в научных проектах ЮРГУЭС. Программа проектирования цифровых фильтров, методика перестройки частотных характеристик цифровых фильтров и структура, реализующая цифровой преобразователь Гильберта, переданы в научно-производственную фирму «Автоматические системы контроля» Тольяттинского государственного университета для реализации системы послеоперационного контроля АСК 2995. Полученные в результате работы алгоритмы программ использованы в разработках научно-производственной фирмы «Спектрон» (г. Тольятти). Отдельные новые результаты используются в учебном процессе Тольяттинского государственного университета и в учебном процессе Поволжского государственного университета сервиса.

### **Публикации**

Результаты диссертационной работы отражены в 26 публикациях, в том числе: 8 статей в научно-технических журналах (из них 3 в журналах, рекомендованных ВАК для публикации основных научных результатов и достижений), 14 материалов докладов, 4 патента на полезную модель.

### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Она содержит 138 страниц текста, включая 101 рисунок. Список литературы состоит из 109 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** показана актуальность темы диссертации, дан анализ состояния проблемы, показана практическая значимость работы, перечислены решаемые задачи, сформулирована научная новизна работы.

**В первой главе** дана оценка алгоритмов цифровой фильтрации на основе свёртки в частотной области. Среди рассмотренных методов – метод фильтрации на основе прямого и обратного преобразования Фурье; метод фильтрации на основе быстрого преобразования Фурье; методы сегментирования входного сигнала с целью реализуемости систем цифровой фильтрации при высокой длительности входного сигнала; метод частотной выборки.

Показан эффект асимметрии АЧХ относительно средней частоты полосы пропускания при синтезе ЦФ методом частотной выборки. Приведена точная математическая модель АЧХ, описываемая функцией

$$s(\tilde{\omega}) = \sum_{q=0}^{+\infty} (U_q \operatorname{sinc}(\tilde{\omega}\pi - q\pi) + U_q \operatorname{sinc}(-\tilde{\omega}\pi - q\pi)), \quad (1)$$

где  $q$  – номер элементарного цифрового фильтра (ЭЦФ);  $\tilde{\omega}$  – нормированная частота.

Проведён анализ вычислительной эффективности алгоритмов цифровой фильтрации с точки зрения соотношения длительности импульсной характеристики и интервала дискретизации. Проведён анализ методов цифровой фильтрации с точки зрения возможности реализации смещения фазочастотной характеристики. На основе проведённого анализа поставлена задача синтеза вычислительно-эффективных цифровых фильтров со смещаемой фазочастотной характеристикой в широком диапазоне. Показано, что смещение фазочастотной характеристики может быть реализовано в рамках метода частотной выборки.

**Вторая глава** содержит синтез математических моделей работы цифровых КИХ-фильтров на основе метода частотной выборки и скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье. Полученная математическая модель элементарного цифрового фильтра имеет следующий вид:

$$u_{\text{вых } q, n} = 2 \operatorname{Re} \left( \underline{X}_{q, n-1} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} - \frac{u_{n-N-1}}{N} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} + \frac{u_n}{N} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} \right); \quad (2)$$
$$u_{\text{вых } q, n} = 2 \operatorname{Im} \left( \underline{X}_{q, n-1} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} - \frac{u_{n-N-1}}{N} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} + \frac{u_n}{N} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} \right),$$

где  $u$  – отсчёты входного сигнала;  $N$  – количество отсчётов в скользящей выборке;  $\underline{X}_{q, n-1}$  – массив отсчётов комплексного спектра;  $u_{\text{вых}}$  – отсчёты выходного сигнала.

Выходной сигнал в (2) формируется либо с помощью действительной, либо с помощью мнимой составляющей комплексного выходного сигнала элементарного цифрового фильтра, что обеспечивает возможность дополнительного смещения фазочастотной характеристики на угол  $\pi/2$ . В дальнейшем математические модели будут приводиться без конкретизации выделения действительной или мнимой составляющих.

Согласно преобразованию Фурье, нулевой элементарный цифровой фильтр соответствует постоянной составляющей ряда. Математическая модель нулевого ЭЦФ имеет следующий вид:

$$u_{\text{вых } 0, n} = X_{0, n-1} - \frac{u_{n-N-1}}{N} + \frac{u_n}{N}. \quad (3)$$

Показаны два способа смещения фазочастотной характеристики. Первый способ смещения – внесение фазового сдвига на входе за счёт представления действительного отсчёта входного сигнала как вектора на комплексной плоскости и его поворота на угол смещения с последующей обработкой согласно математической модели (2). Математическая модель элементарного цифрового фильтра со смещением фазочастотной характеристики в этом случае имеет следующий вид:

$$\underline{U}_{q, n} = \underline{X}_{q, n-1} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} + \left( \frac{u_{n-N-1}}{N} - \frac{u_n}{N} \right) \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N} + j\Psi_q}, \quad (4)$$

где  $\underline{U}$  – комплексное значение выходного сигнала цифрового фильтра, из которого формируется отсчёт выходного сигнала посредством использования действительной или мнимой составляющих;  $\Psi_q$  – угол смещения фазочастотной характеристики.

Второй способ смещения – внесение фазового сдвига на выходе за счёт использования комплексного значения отсчёта выходного сигнала и его поворота на угол смещения. При этом элементарный цифровой фильтр работает согласно математической модели (2), но без выделения действительной и мнимой составляющих. Результирующая математическая модель элементарного цифрового фильтра со смещаемой фазочастотной характеристикой принимает следующий вид:

$$\underline{U}_{q, n} = \left( \underline{X}_{q, n-1} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} - \frac{u_{n-N-1}}{N} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} + \frac{u_n}{N} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} \right) \cdot e^{j\Psi_q}, \quad (5)$$

где  $\Psi_q$  – угол смещения фазочастотной характеристики.

Согласно методу частотной выборки, выходной сигнал цифрового фильтра формируется суперпозицией выходных сигналов элементарных цифровых фильтров:

$$\underline{U}_{\text{вых } q} = \sum_q \left( U_{m q} \cdot (-1)^q \cdot \underline{U}_{q, n} \right), \quad (6)$$

где  $\underline{U}_{m, q}$  – амплитудные коэффициенты выходных сигналов элементарных цифровых фильтров; знакопеременный коэффициент  $(-1)^q$  требуется для фазировки выходных сигналов элементарных цифровых фильтров. В дальнейшем этот коэффициент считается входящим в значение амплитудного коэффициента элементарного цифрового фильтра.

На основе разработанных математических моделей элементарных цифровых фильтров получена обобщённая математическая модель цифровых КИХ-фильтров, реализуемых на основе метода частотной выборки и скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье, учитывающая различные способы смещения фазочастотной характеристики:

$$\underline{U}_n = \sum_q \left( U_{m q} \cdot \left( \underline{X}_{q, n-1} \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N}} + \left( \frac{u_{n-N-1}}{N} - \frac{u_n}{N} \right) \cdot e^{\frac{2j\pi q}{N} + j\Psi'_q} \right) \cdot e^{j\Psi''_q} \right), \quad (7)$$

где  $\Psi'_q$  – дополнительный фазовый сдвиг на входе;  $\Psi''_q$  – дополнительный фазовый сдвиг на выходе. В модели учтена возможность варьирования смещения ФЧХ каждого ЭЦФ независимо.

**В третьей главе** анализируются частотные характеристики разработанных цифровых фильтров. На основе полученных во второй главе математических моделей выводятся аналитические выражения импульсных характеристик, и через выражения для текущего спектра импульсной характеристики получены зависимости, описывающие АЧХ и ФЧХ. Выражение для импульсной характеристики цифрового фильтра без смещения фазочастотной характеристикой имеет следующий вид:

$$h_{q,n} = \begin{cases} \frac{2}{N\Delta t} \cos\left(\frac{2\pi q}{N} n\right) & n \in 1 \dots N \\ 0 & n \in N+1 \dots \infty \end{cases}.$$

Соответственно значение текущего спектра ЭЦФ:

$$\underline{S}(q, \tilde{\omega}) = \frac{-\tilde{\omega} \cdot \sin(-2\pi\tilde{\omega})}{\pi(\tilde{\omega}^2 - q^2)} - j \frac{\tilde{\omega} - \tilde{\omega} \cdot \cos(-2\pi\tilde{\omega})}{\pi(\tilde{\omega}^2 - q^2)}. \quad (8)$$

По выражению для текущего спектра, с учётом (6) находятся АЧХ и ФЧХ:

$$U(\tilde{\omega}) = \left| \sum_q U_{mq} \cdot \underline{S}_q(\tilde{\omega}) \right|; \quad \Phi(\tilde{\omega}) = \arg \left( \sum_q U_{mq} \cdot \underline{S}_q(\tilde{\omega}) \right). \quad (9)$$

Для нулевого элементарного цифрового фильтра выражение импульсной характеристики определяется как

$$h_{q,n} = \begin{cases} \frac{1}{N\Delta t} & n \in 0 \dots N \\ 0 & n \in N+1 \dots \infty \end{cases}. \quad (10)$$

Выражение для текущего спектра:

$$\underline{S}_0(\tilde{\omega}) = \frac{-\sin(-2\pi\tilde{\omega})}{2\pi\tilde{\omega}} - j \frac{1 - \cos(-2\pi\tilde{\omega})}{2\pi\tilde{\omega}}. \quad (11)$$

Выражения (9) справедливы для всех ЭЦФ.

На основании полученных результатов показано, что АЧХ определяется ограниченным рядом Котельникова. Для практического представления фазочастотной характеристики разработан алгоритм в соответствии со следующими выражениями:

$$\Phi(\tilde{\omega}) = -\tilde{\omega} \cdot \pi + k(\tilde{\omega}); \quad (12)$$

$$k(\tilde{\omega}) = -\text{floor}(\tilde{\omega}) \cdot \pi - a_{\text{floor}(\tilde{\omega})} \cdot \pi, \quad (13)$$

где функция floor подразумевает взятие целого числа от аргумента (округление до целого всегда в меньшую сторону); множитель  $a$  представляет собой столбцовую матрицу нулей и единиц, определяемую последовательностью и количеством элементарных цифровых фильтров в структуре цифрового фильтра.

Для получения частотных характеристик цифровых фильтров с различными способами смещения фазочастотной характеристики применён аналогичный указанному выше подход. Для цифровых фильтров со смещением по входу выражение импульсной характеристики имеет вид:

$$h_{q,n} = \begin{cases} \frac{2}{N\Delta t} \cos\left(\frac{2\pi qn}{N} + \psi\right) & n \in 0 \dots N-1 \\ 0 & n \in N \dots \infty \end{cases}. \quad (14)$$

Выражение для текущего спектра:



$$\underline{S}(q, \bar{\omega}) = \left[ \frac{(\bar{\omega} - q) \sin(2\pi\bar{\omega} + \Psi_q) + (\bar{\omega} + q) \sin(2\pi\bar{\omega} - \Psi_q) + 2q \sin(\Psi_q)}{2\pi(\bar{\omega}^2 - q^2)} + \right. \\ \left. + j \frac{(\bar{\omega} - q) \cos(2\pi\bar{\omega} + \Psi_q) + (\bar{\omega} + q) \cos(2\pi\bar{\omega} - \Psi_q) + 2\bar{\omega} \cos(\Psi_q)}{2\pi(\bar{\omega}^2 - q^2)} \right]. \quad (15)$$

Так как импульсная характеристика цифровых фильтров со смещением фазочастотной характеристики по входу несимметрична, то ФЧХ при смещении теряет свою линейность. Показано, что её искажение следует рассматривать как погрешность линейности, так как максимальное отклонение от прямой находится в пределах  $\pm 2^\circ$ .

Элементарные цифровые фильтры работают согласно математической модели (1). На выходе осуществляется поворот комплексных значений векторов отсчётов выходных сигналов. Таким образом, текущий спектр описывается следующим выражением:

$$\underline{S}(q, \bar{\omega}) = \left( \frac{-\bar{\omega} \cdot \sin(-2\pi\bar{\omega})}{\pi(\bar{\omega}^2 - q^2)} - j \frac{\bar{\omega} - \bar{\omega} \cdot \cos(-2\pi\bar{\omega})}{\pi(\bar{\omega}^2 - q^2)} \right) e^{j\psi}. \quad (16)$$

При этом, согласно (6), АЧХ элементарного цифрового фильтра со смещением ФЧХ по выходу остаётся неизменной. Рис. 1 иллюстрирует смещение ФЧХ цифрового фильтра, где 1 – АЧХ цифрового фильтра, 2 – ФЧХ без вносимого фазового сдвига, 3 – ФЧХ при внесённом фазовом сдвиге  $-\pi/3$  радиан.

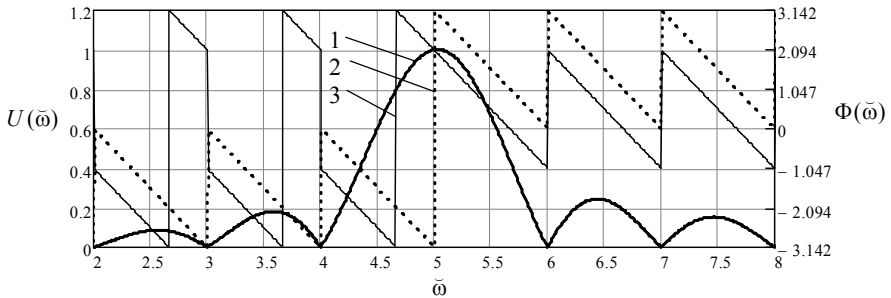


Рис. 1

**В четвёртой главе** рассматривается синтез цифровых фильтров методом частотной выборки. Показан принцип формирования полосы пропускания. Показаны принципы улучшения свойств АЧХ за счёт вариации амплитудных коэффициентов выходных сигналов элементарных цифровых фильтров.

Показана возможность плавного изменения ширины полосы пропускания за счёт вариации амплитудных коэффициентов элементарных цифровых фильтров. Рис. 2 иллюстрирует данную возможность на примере двух элементарных цифровых фильтров. АЧХ 1 соответствует цифровому фильтру с одинаковыми амплитудными коэффициентами:  $U_{m1} = 0,78; U_{m2} = 0,78$  (введена нормировка по амплитуде), АЧХ 2 соответствует цифровому фильтру с коэффициентами:  $U_{m1} = 0,5; U_{m2} = 0,96$ ; АЧХ 3 соответствует цифровому фильтру с коэффициентами:  $U_{m1} = 0,93; U_{m2} = 0,5$ .

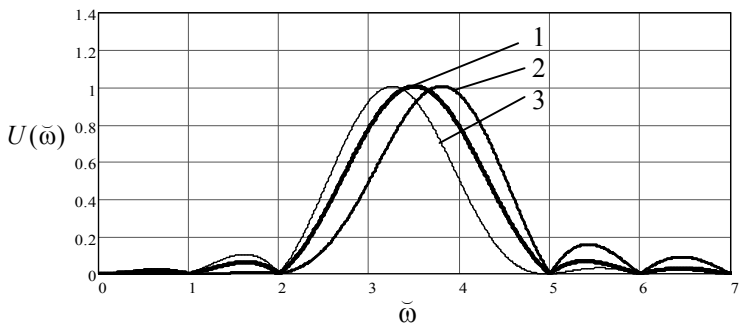


Рис. 2

Из рисунка видно, что, изменяя амплитудные коэффициенты выходных сигналов ЭЦФ, можно смещать максимумы АЧХ и полосу пропускания.

Показано, что при чётном количестве элементарных цифровых фильтров в структуре цифрового фильтра результирующая АЧХ обладает достаточной симметрией относительно середины полосы пропускания для использования одинаковых амплитудных коэффициентов дополнительных элементарных цифровых фильтров. Разработана методика подбора амплитудных коэффициентов. Методика основана на построении поверхности по следующему условию:

$$K(U_{m4}, U_{m5}, U_{m8}, U_{m9}) = \begin{cases} 0 & \text{если } U(\tilde{\omega}_{k1}) < U_{k\min} \wedge U(\tilde{\omega}_{cp}) < U_{cp\max} \wedge U(\tilde{\omega}_{cp}) > U_{cp\min} \\ 1 & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (17)$$

и последующему подбору по ней амплитудных коэффициентов.

Показано, что при нечётном количестве элементарных цифровых фильтров в структуре цифрового фильтра АЧХ обладает значительной асимметрией относительно середины полосы пропускания. Разработана методика подбора амплитудных коэффициентов для выходных сигналов элементарных цифровых фильтров. Методика основана на компенсации асимметрии в максимальных отклонениях пульсаций в полосе пропускания, что позволяет в значительной степени упростить задачу. Используется метод последовательных приближений для подбора одного коэффициента.

Приведён пример синтеза цифрового фильтра по заданным параметрам с помощью разработанных методик.

**В пятой главе** рассматривается вопрос разработки и компьютерного моделирования структурных схем цифровых КИХ-фильтров на основе скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье.

Разработана структурная схема цифрового фильтра без смещения фазочастотной характеристики. На основе структурной схемы составлен алгоритм работы цифрового фильтра. На основе алгоритма создана компьютерная модель цифрового фильтра, приведены результаты работы модели. На основе математической модели и структурной схемы цифрового фильтра без внесения фазового сдвига создана модель, реализующая цифровой преобразователь Гильберта для устройств, работающих в заданной полосе частот. На рис. 3 приведена структурная схема преобразователя Гильберта, построенная на основе разработанной структуры цифрового фильтра. На ри-

сунке блок 1 – блок памяти типа FIFO, с выхода которого передаётся один, самый старый отсчёт в выборке входного сигнала; блок 2 – блок суммирования; блок 3 – блок памяти коэффициентов единичного поворачивающего вектора в соответствии с формулой (2); блоки 4, 5, 6, 7 – умножители для организации комплексного умножения в алгебраической форме; блоки 8 и 9 – сумматоры, формирующие действительную и мнимую составляющие после умножения в алгебраической форме; блоки 10 и 11 – блоки памяти, передающие значения действительной и мнимой составляющих вектора  $X_{-q,n-1}$  на следующий интервал дискретизации; блоки 12 и 13 – блоки суммирования, формирующие выходной сигнал преобразователя Гильберта.

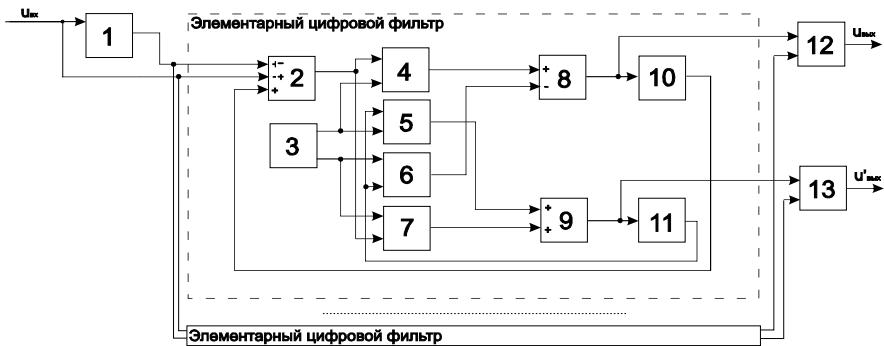


Рис. 3

На основе математической модели цифрового фильтра со смещением фазочастотной характеристики по входу разработана структурная схема цифрового фильтра. На основе структурной схемы составлен алгоритм работы цифрового фильтра. Составлена компьютерная модель цифрового фильтра со смещением фазочастотной характеристики на входе, и выполнено моделирование режимов с predetermined смещением и со смещением ФЧХ скачкообразно. Приведены результаты моделирования. Показано, что скачкообразное смещение ФЧХ вызывает переходный процесс.

На основе математической модели со смещением фазочастотной характеристики на выходе разработана структурная схема цифрового фильтра и алгоритм его работы. Составлена компьютерная модель цифрового фильтра со смещением фазочастотной характеристики по выводу и выполнено моделирование режима со смещением ФЧХ скачкообразно. Приведены результаты моделирования. Показано, что скачкообразное смещение ФЧХ не вызывает переходного процесса.

Цифровой фильтр с внесением фазового сдвига на входе может эффективно использоваться в качестве амплитудно-фазового манипулятора с ограничением спектра выходного сигнала (рис. 4).

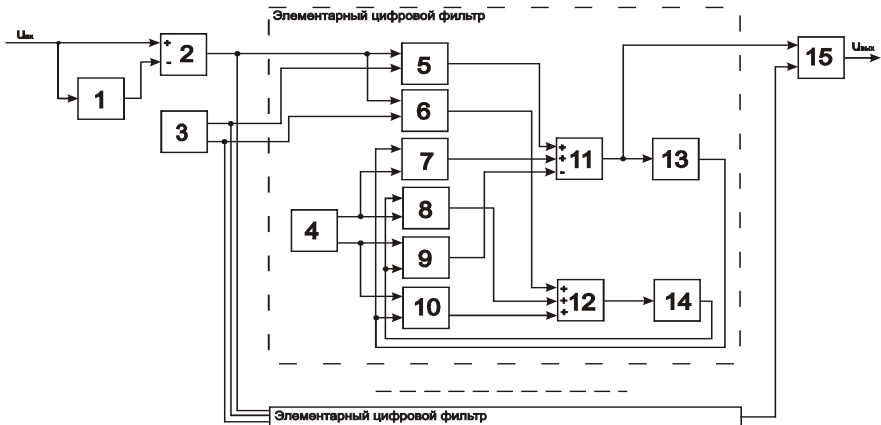


Рис. 4

На рис. 4 модулирующий сигнал вводится блоком управления 3 и поворачивает скалярный отсчёт входного сигнала, представляемый вектором на комплексной плоскости с помощью умножителей 5 и 6. Сложение результата с вектором спектральной составляющей, умноженной на угол  $\frac{2\pi q}{N}$  радиан, полученной с блоков умножения 7, 8, 9 и 10, происходит в суммирующих блоках 11 и 12. Выходной сигнал формируется в суммирующем блоке 15. Блок 1 представляет собой блок памяти типа FIFO. В сумматоре 2 формируется отсчёт входного сигнала ЭЦФ вида  $u_{n-N-1} + u_n$ .

**В заключении** подведены итоги диссертационной работы, даётся общая характеристика полученных научных и практических результатов.

**В приложении** приводятся листинги программ разработанных фильтров и вспомогательных блоков, списки сокращений и обозначений, акты внедрения полученных результатов.

#### Основные результаты работы:

1. Разработаны способы смещения фазочастотной характеристики и настройки амплитудно-частотной характеристики цифровых фильтров, реализуемых методом частотной выборки на основе скользящего дискретного комплексного преобразования Фурье.

Смещение ФЧХ достигается либо внесением дополнительного фазового сдвига на входе фильтра, либо на его выходе.

Смещение полосы пропускания АЧХ достигается вариацией амплитудных коэффициентов элементарных цифровых фильтров.

2. Получена обобщённая математическая модель работы цифровых фильтров, учитывающая разработанные способы смещения АЧХ и ФЧХ.

Получены выражения для импульсных и частотных характеристик элементарных цифровых фильтров и их суперпозиции с учётом смещения АЧХ и ФЧХ.

3. Показано, что при синтезе цифровых фильтров в рамках метода частотной выборки необходимо учитывать следующие эффекты: эффект асимметрии АЧХ отно-

сительно средней частоты полосы пропускания при нечётном количестве элементарных цифровых фильтров в структуре фильтра; эффект симметрии АЧХ относительно средней частоты полосы пропускания при чётном количестве элементарных цифровых фильтров в структуре фильтра; эффект плавного изменения полосы пропускания за счёт подбора амплитудных коэффициентов для выходных сигналов элементарных цифровых фильтров.

4. Разработана методика выбора амплитудных коэффициентов для выходных сигналов элементарных цифровых фильтров с целью увеличения подавления вне полосы пропускания и уменьшения пульсаций в полосе пропускания АЧХ цифровых фильтров.

5. Разработаны структуры и реализованы виртуальные модели цифровых фильтров в среде Matlab – Simulink. На основе полученных в работе результатов смоделирован преобразователь Гильберта и показана возможность использования ЦФ для реализации амплитудно-фазовой манипуляции.

### **ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ СЛЕДУЮЩИЕ РАБОТЫ:**

1. Шакурский М. В. Алгоритм синтеза цифровых фильтров на основе прямого и обратного преобразования Фурье с промежуточной обработкой спектра // Инфокоммуникационные технологии. – 2010. – № 4. – С. 29–32.

2. Шакурский М. В. Метод увеличения быстродействия цифровых фильтров на основе скользящего дискретного преобразования Фурье / В. И. Воловач, М. В. Шакурский // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2010. – № 3. – С. 20–22.

3. Шакурский М. В. Математическая модель цифровых фильтров, реализуемых методом частотной выборки / В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – Тольятти : Изд-во ТГУ. – 2011. – № 2 (16). – С. 94–96.

4. Шакурский М. В. Математическая модель фильтра на основе прямого и обратного преобразования Фурье с промежуточной обработкой спектра / В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Труды российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А. С. Попова. Серия Цифровая обработка сигналов и её применение. Вып. XII-1. – Москва, 2010. – С. 107–109.

5. Шакурский М. В. Моделирование виртуальных автоколебательных систем в режиме повышенной чувствительности с использованием цифровых фильтров / В. В. Иванов, В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Школа университетской науки: Парадигма развития. №1 (2) / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2011. – С. 66–71.

6. Шакурский М. В. Структура цифрового фильтра для цифровых генераторных преобразователей / В. В. Иванов, В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Школа университетской науки: Парадигма развития. № 1(1). Т. II. / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2010. – С. 259–264.

7. Шакурский М. В. Синтез полосных фильтров на основе скользящего ДПФ для систем цифровой обработки сигналов / В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ-

2009) : матер. междунаrod. науч.-техн. конф. (11–14 мая 2009 г.) / сост. И. Ю. Петрова. – Астрахань : Изд. дом «Астраханский университет», 2009. – С. 241–243.

8. Шакурский М. В. Синтез цифровых фильтров на основе прямого и обратного преобразования Фурье выборки сигнала с промежуточной обработкой спектра / В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Электронная культура. Информационные технологии будущего и современное электронное обучение «MODERN IT & (E-) LEARNING» : матер. междунаrod. науч. конф. с элементами научной школы для молодежи (6–8 октября 2009 г.). – Астрахань : Нова, 2009. – С. 104–108.

9. Шакурский М. В. Аппроксимация характеристик цифровых фильтров, синтезируемых методом частотной выборки / В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов : сб. ст. IX всероссий. науч.-техн. конф. – Пенза : Приволжский дом знаний, 2011. – С. 46–49.

10. Шакурский М. В. Синтез цифровых фильтров методом наложения амплитудно-частотных характеристик вида  $\text{sinc}(\omega/\omega_0 - q)$  // Приоритетные направления современной российской науки глазами молодых учёных : всероссий. НПК молодых учёных и специалистов (4–6 ноября 2009 г., Рязань) / отв. ред. А. Н. Козлов ; Рязан. гос. ун-т им. С. А. Есенина. – Рязань, 2009. – С. 225–227.

11. Шакурский М. В. Цифровые фильтры на основе скользящего преобразования Фурье с независимым смещением фазочастотной характеристики / В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Информационные технологии. Радиотехника. Телекоммуникации. ITRT-2011 : сб. ст. I междунаrod. заоч. науч.-техн. конф. / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2011. – С. 317–323.

12. Шакурский М. В. Алгоритм оптимизации частотной характеристики цифровых фильтров на основе скользящего преобразования Фурье / В. В. Иванов, М. В. Шакурский // Информационные технологии. Радиотехника. Телекоммуникации. ITRT-2011 : сб. ст. I междунаrod. заоч. науч.-техн. конф. / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2011. – С. 323–330.

13. Шакурский М. В. Алгоритм моделирования цифровых фильтров на основе метода частотной выборки // Гаудеамус. Актуальные проблемы информатики и информационных технологий : матер. XIV-й междунаrod. науч.-техн. конф. (9–10 сентября 2010 г.) / Тамбовский гос. ун-т. – Тамбов, 2010. – №2 (16). – С. 376–378.

14. Шакурский М. В. Алгоритм цифровой фильтрации для цифровых автоколебательных систем / В. В. Иванов, А. В. Савенко, М. В. Шакурский // Современные информационные и электронные технологии : труды XI междунаrod. науч.-практич. конф. (24–28 мая 2010 г.). – Одесса, 2010. – С. 196.

15. Шакурский М. В. Использование усечённого окна Бартлетта для оптимизации амплитудно-частотной характеристики цифрового фильтра / В. В. Иванов, М. В. Шакурский // Вестник ПВГУС. Серия Проблемы и решения современной технологии. Вып. 5. / Поволжский государственный университет сервиса. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2010. – С. 28–32.

16. Шакурский М. В. Особенности использования цифровых фильтров в автогенераторных преобразователях с применением эффекта сверхчувствительности / В. В. Иванов, В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Наука промышленности и сервису : сб. ст. пятой междунаrod. науч.-практич. конф. Ч. II / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2010. – С. 59–63.

17. Шакурский М. В. Аппроксимация рядами Уолша импульсных характеристик в свёрточных алгоритмах / В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов : сб. ст. VIII всероссий. науч.-техн. конф. – Пенза : Приволжский дом знаний, 2010. – С. 16–19.

18. Шакурский М. В. Оптимизация амплитудно-частотной характеристики цифрового SINC фильтра / В. В. Иванов, М. В. Шакурский // Наука промышленности и сервису : сб. ст. IV международ. науч.-практич. конф. Ч. II / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2010. – С. 358–365.

19. Шакурский М. В. Численное моделирование автоколебательных систем в режиме сверхчувствительности // Аналитические и численные методы моделирования естественнонаучных и социальных проблем : сб. ст. V международ. науч.-техн. конф. – Пенза : Приволжский дом знаний, 2010. – С. 224–227.

20. Шакурский М. В. Амплитудно-фазовое управление автоколебательными системами в режиме повышенной чувствительности // Автоматизация технологических процессов и производственный контроль : сб. докл. международ. науч.-техн. конф. (23–25 мая). Ч. 2. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2006. – С. 177–178.

21. Шакурский М. В. Особенности скользящего ДПФ в системах ЦОС / В. В. Иванов, В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии : сб. тр. международ. науч.-техн. конф. (12–15 мая 2009 г.). Ч. 3. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2009. – С. 132–136.

22. Шакурский М. В. Синтез ФНЧ на основе скользящего ДПФ в системах цифровой обработки сигналов / В. В. Иванов, В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Состояние развития инновационной деятельности в области сервиса : сб. ст. третьей международ. науч.-практич. конф. В 3 ч. Ч. III / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2009. – С. 52–56.

23. Шакурский М. В. Устройство для преобразования девиации частоты периодического сигнала. – Патент на полезную модель № 109941 / В. И. Воловач, В. В. Иванов, В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Оpubл. 27.10.2011, Бюл. № 30.

24. Шакурский М. В. Устройство для преобразования девиации частоты в девиацию фазы периодического сигнала. – Патент на полезную модель № 109939 / В. И. Воловач, В. В. Иванов, В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Оpubл. 27.10.2011, Бюл. № 30.

25. Шакурский М. В. Цифровой фильтр. – Патент РФ на полезную модель № 108669 // Оpubл. 20.09.2011, Бюл. № 26.

26. Шакурский М. В. Цифровой фильтр с нулевой фазочастотной характеристикой. – Патент на полезную модель № 109619 / В. К. Шакурский, М. В. Шакурский // Оpubл. 20.10.2011, Бюл. № 29.

Подписано в печать с электронного оригинал-макета 23.01.2012.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная.  
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 120 экз. Заказ 53/02.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре  
Поволжского государственного университета сервиса.  
445677, г. Тольятти, ул. Гагарина, 4.  
rio@tolgas.ru, тел. (8482) 222-650.