

Министерство Образования Украины
КИЕВСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ТАРАСА ШЕВЧЕНКО

На правах рукописи

Кардусов Вадем Юрьевич

МЕТОД РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИОПТИМАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ
ПРИ ЗАДАНЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВАХ И СПОСОБАХ ОБРАБОТКИ
ВХОДНОГО ПРОЦЕССА

Специальность 05.13.16 - Применение вычислительной
техники, математического моделирования и математи-
ческих методов в научных исследованиях (техника).

АВТОРЕФЕРАТ

ДИССЕРТАЦИЯ НА СОискание УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ
НАУК

КИЕВ - 1993

AB 28859

Работа выполнена в департаменте Информационных Систем
Севастопольского приборостроительного института

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
профессор Доценко Станислав Васильевич.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гопов Юрий Дмитриевич;
кандидат технических наук Ковтанки
Александр Алексеевич.

Ведущая организация - Морской Гидрофизический Институт Академии
Наук Украины.

Защита состоится "30" 12 1993г. в 14.00 на заседании
специализированного совета К 068.18.10 в Киевском университете
имени Тараса Шевченко по адресу: 252163, г.Киев, проспект
ак.Глушкова, 6, факультет кибернетики, аудитория № 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Ученый секретарь Специализированного
Совета, кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник


И.В.Бейко

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00802874 (Т)

АНОТАЦІЯ

Карлусов Вадим Юрійович. Метод розрахунку характеристик кваліфікованих цифрових фільтрів при заданих статистичних властивостях та способах обробки вхідного процесу. : Дис. ... канд. техн. наук / Київ. ун-т. - Київ, 1993. - 199 с. Рукопис.

В дисертації викладається метод розрахунку цифрових фільтрів, який дозволяє синтезувати фільтри, які являються подальшим вдосконаленням фільтру типу Колмогорова-Вінера. Їхні особливості: 1) завдання способу обробки виконується не у вигляді взаємної кореляційної функції процесів на вході та виході бажаного фільтру, а у вигляді характеристик фільтру-прототипу, що має суттєву перевагу для практичних цілей; 2) процедура синтезу проводиться за один етап (не рахувачи етапу вибору фільтру-прототипу, який відображає задачі обробки), після якого отримують оптимальні коефіцієнти; 3) зняті обмеження на фізичну реалізованість фільтру-прототипу, при цьому стає можливим розраховувати прогностичні каузальні фільтри та фільтри реального масштабу часу, що не можливо при будь-якому іншому методі розрахунку цифрових фільтрів.

Знайдено аналітичні вирази, для формалізації розрахунків. Виконані обчислювальні експерименти з метою всебічного дослідження синтезованих фільтрів.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Фильтрация является одной из часто употребляемых процедур обработки результатов наблюдений над случайными процессами. Ее цель состоит в выделении отдельных составляющих процессов, нейтрализации искажений, вносимых при измерении, подавлении помех и др. Появление цифровых интегральных схем и микропроцессоров, их применение для обработки измерительной информации стимулировало развитие теории синтеза цифровых фильтров (ЦФ), которая к настоящему времени детально проработана. Известный прогресс в области развития микропроцессорной техники, связанный с ростом ее вычислительных возможностей при уменьшении весовых и стоимостных характеристик предоставил возможность включать вычислительные блоки непосредственно в состав аппаратуры сбора и обработки измерительной информации. Это, в свою очередь, предъявляет комплексные требования к обеспечению необходимых точности вычислений, быстродействия и способности работать в реальном масштабе времени (РМВ).

Как правило, известными методами задача синтеза ЦФ решается, в немалой степени основываясь на интуиции и опыте разработчика, что вносит элемент субъективности в полученные решения. Анализ известных методов синтеза ЦФ показал, что предлагаемые подходы можно разбить укрупненно на следующие направления: а) приближение характеристик синтезируемого ЦФ и характеристик фильтра-прототипа (ФП), во временной или частотной области отражающего потребности обработки; б) построение процедур оптимальной линейной фильтрации.

Методы синтеза ЦФ, выделенные в первое направление, основаны на аппроксимации различными способами характеристик ФП во временной или частотной области. Наряду с несомненными достоинствами, такими как высокая степень формализации процедуры синтеза, наличие набора типовых решений, инвариантности получаемых ЦФ по отно-

шению и обрабатываемому процессу, упомянутые методы обладают существенными недостатками: 1) для аппроксимации характеристики ФП существуют несколько методов и отсутствуют правила однозначного выбора одного из них; 2) увеличение точности приближения характеристик синтезированного ЦФ и характеристик ФП ведет к увеличению числа коэффициентов и, как следствие, к снижению быстродействия и росту вычислительной ошибки; 3) процедура аппроксимации сама по себе вносит искажение, величина которого определяется критерием приближения, назначаемым эмпирически; 4) отсутствует единый критерий оценки качества построения ЦФ с позиции погрешности обработки; 5) использование в качестве ФП физически нереализуемого фильтра приводит к появлению неустранимого запаздывания ЦФ по отношению к исходному процессу примерно на половину длины импульсной характеристики ФП.

В противоположность этому, ряд методов построения оптимальных линейных фильтров основан на критерии минимума среднеквадратического отклонения процессов на выходах ФП и синтезируемого фильтра. Это обусловило учет статистических характеристик обрабатываемых процессов и, как следствие, высокую эффективность полученного решения. Однако: 1) синтез оптимальных фильтров представляет сложную математическую задачу, имеющую точное решение лишь в определенных случаях; 2) условия реализации оптимальных ЦФ приводит к тому, что оптимально спроектированные фильтры становятся субоптимальными; 3) в качестве ФП может быть лишь физически реализуемая линейная система; 4) применение различных окрасивающих фильтров для сведения реальной ситуации к теоретической ведет к ухудшению характеристик оптимальных фильтров с позиции быстродействия и накопленных вычислительных ошибок.

Исходя из вышесказанного, в предлагаемой диссертационной работе был предложен и систематически разработан метод синтеза ЦФ,

который наряду с учетом характеристики ФП (как в аппроксимационных методах) минимизирует среднеквадратическое отклонение процессов на выходах ЦФ и ФП, что характерно для оптимальной линейной фильтрации. Это позволило синтезировать ЦФ, который является развитием фильтра Колмогорова-Винера. Его принципиальные отличительные особенности суть:

- задание требований обработки производится не в виде взаимной корреляционной функции процессов на входе и выходе оптимального фильтра, а в виде характеристик ФП, что представляет неоспоримое преимущество для практических приложений;
- процедура синтеза проводится в один этап (не считая этапа выбора ФП), по окончании которого сразу получаются оптимальные коэффициенты;
- не накладывается ограничений на физическую реализуемость ФП ;
- обеспечивается устранение запаздываний при работе в РМБ и построение прогнозирующих фильтров.

Решение этих задач представляет теоретический и практический интерес в области цифровой обработки сигналов и повышения метрологических показателей информационно-измерительных систем.

Целью диссертационной работы является:

- разработка обобщенного метода синтеза квазиоптимальных ЦФ, учитывающих: 1) требования к обработке сигнала, формулируемые в виде импульсной или амплитудно-частотной характеристик ФП (не обязательно физически реализуемого); 2) спектральную плотность или автокорреляционную функцию обрабатываемого процесса; 3) возможность работы в РМБ без запаздывания; 4) обеспечение оптимальной обработки по критерию минимум среднеквадратической ошибки;
- получение аналитических выражений, формализующих процедуру расчета коэффициентов ЦФ;
- исследование синтезированных ЦФ, изучение их особенностей, раз-

работка рекомендаций проектировщику по проведению процедуры синтеза.

Методы исследований. Для решения поставленной задачи в работе применены: аппарат интегрального исчисления; метод наименьших квадратов (МНК); элементы теорий случайных процессов, автоматического управления, идентификации, функций комплексного переменного; теория организации и функционирования вычислительных устройств; методы и средства проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ, элемент программирования.

Научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

1. Оригинальный формализованный метод синтеза цифровых фильтров, обеспечивающий:

- способность работы ЦФ в РМВ без запаздывания при физической нереализуемости ФП;
- минимальную среднеквадратическую ошибку обработки информации среди нерекурсивных с одинаковым числом коэффициентов ЦФ;
- учет необходимых способов обработки наряду со статистическими свойствами обрабатываемого процесса, задаваемыми в его виде корреляционной функции или спектра.

2. Аналитические выражения, применительно к задачам частотной фильтрации, частотной фильтрации с интерполяцией, инверсной фильтрации, позволяющие:

- рассчитать вектор коэффициентов $(\alpha_{ок})$ ЦФ предложенным методом;
- определять теоретическую среднеквадратическую ошибку обработки процесса синтезированным квазиоптимальным ЦФ;
- определять теоретическую среднеквадратическую ошибку обработки процесса ЦФ с коэффициентами (α_k) , отличными от оптимальных $(\alpha_{ок})$, для сопоставления различных ЦФ.

3. Методы организации и результаты вычислительных экспериментов:

- по определению достаточного числа коэффициентов ЦФ, оптимально-

го шага дискретизации, минимальной ошибки, оптимального порядка интерполирующего полинома;

- по исследованию устойчивости полученных ЦФ;
- по анализу влияния статистических характеристик обрабатываемого процесса на параметры ЦФ.

Практическая ценность. Разработан метод синтеза квазиоптимальных ЦФ, учитывающий импульсную или амплитудно-частотную характеристику ФН и корреляционную функцию (спектральную плотность) обрабатываемого процесса одновременно.

Получены аналитические выражения, позволяющие рассчитывать коэффициенты ЦФ для решения задач частотной фильтрации, фильтрации с интерполяцией скользящими полиномами, инверсной фильтрации.

Результаты исследований могут быть использованы разработчиками информационно-измерительных систем и систем передачи данных.

Реализация результатов работы. Материалы диссертационной работы использованы в НИО "Судостроение" при выполнении натурных мореходных испытаний судов смешанного плавания в системах экспресс-анализа экспериментальной информации и в учебном процессе Тихоокеанского ВВМУ им С.О.Макарова по специальности РТВ НК, в курс "Цифровая обработка сигналов".

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на:

- республиканской научно-технической конференции "Эргатические системы, передача цифровой информации и микропроцессорная техника". (Кировоград, 1982).
- втором Всесоюзном семинаре "Технические средства для государственной системы наблюдений и контроля природной среды (ГСКИ)". (Обнинск, 1983).
- республиканской научно-технической конференции "Микропроцессорные устройства оценки и коррекции искажений в каналах связи".

(Лев, 1984).

- семинаре Научного Совета АН УССР по комплексной проблеме "Научные основы электроэнергетики", Секция № 5. "Методы и средства обработки и отображения информации". (Киев-Севастополь, 1988).

- научно-технических семинарах "Перспективные методы и средства обработки и отображения информации". (Севастополь, 1987, 1988).

- XVI и XVIII научно-теоретической и технической конференциях профессоров, аспирантов и научных работников Севастопольского приборостроительного института. (Севастополь, 1986-1988).

- зональной конференции "Обработка информации в Автоматизированных Системах Научных Исследований (АСНИ)". (Пенза, 1989).

- республиканском научно-техническом семинаре "Методы и средства повышения эффективности информационно-вычислительных и управляющих систем". (Севастополь, 1989).

- республиканской научно-технической конференции "Опыт разработки цифровых и аналоговых фильтров и корректоров в системах связи". (Севастополь, 1990).

- на технических семинарах в Морском Гидрофизическом Институте АН Украины (Севастополь, 1990-1993).

- научных семинарах кафедры Информационных Систем Севастопольского приборостроительного института. (Севастополь, 1985-1989).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 7 научных работ, из них 2 - тезисы докладов и 2 - депонированные рукописи.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Общий объем работы 199 страниц. Из них 14 таблиц на 12 страницах, 17 рисунков на 17 страницах, список использованных источников из 167 наименований на 16 страницах, приложения занимают 42 страницы, в их составе неходятся 3 страниц графических иллюстраций.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы, сформулированы цели и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлена краткая аннотация проведенных исследований.

В первой главе проводится обзор известных методов расчета коэффициентов ЦФ, на основании которого формулируется задача вычисления вектора коэффициентов (a_{ok}) как многопараметрическая и многоэкстремальная задача оптимизации. Глава состоит из двух параграфов. Первый параграф посвящен анализу работ, в которых рассматриваются процедуры определения коэффициентов ЦФ, отмечаются их достоинства и недостатки с позиции эффективности полученного решения, удобства применения процедуры на практике, в том числе и неким лицензированным разработчикам, возможности реализации в РМБ.

Во втором параграфе рассматривается применение цифровой фильтрации в устройствах первичной обработки данных. Обосновывается выбор алгоритма ЦФ - нерекурсивный (НЦФ), критерия оптимальности - критерий минимума среднеквадратической ошибки, производится математическая формулировка задач, решаемых в дальнейших главах диссертационной работы как экстремальных многопараметрических задач оптимизации:

1. Фильтрация сигналов с целью выделения спектральных составляющих случайного процесса:

$$\underset{N, T_0, (a_{ok})}{\operatorname{argmin}} M\{|y(t) - y^*(x(t), N, (a_{ok}), T_0)|^2\} \rightarrow \min. \quad (1)$$

2. Фильтрация с интерполяцией выхода цифрового фильтра алгебраическим полиномом:

$$\underset{N, T_0, (a_{ok})}{\operatorname{argmin}} M\{|y(t) - P(x(t), N, (a_{ok}), T_0, f_0)|^2\} \rightarrow \min. \quad (2)$$

3. Инверсная фильтрация:

$$\underset{N, T_0, \{a_{ok}\}}{\operatorname{argmin}} M(\{x(t) - x^*(y(t), N, \{a_{ok}\}, T_0)\}^2) \rightarrow \min. \quad (3)$$

В выражениях (1) - (3) используются следующие обозначения:

$y(t)$ - выход фильтра-прототипа, определяющий цель обработки, $y^*(t)$ - его оценка; $x(t), x^*(t)$ - вход фильтра-прототипа и его оценка; T_0 - шаг квантования процессов; N - число коэффициентов фильтра; $\{a_{ok}\}$ - набор оптимальных коэффициентов; f_0 - опорный или интерполирующий полином. Решение поставленных задач приводится в последующих главах.

Во второй главе проводится синтез и исследование квазиоптимальных цифровых фильтров для осуществления частотной фильтрации. Глава состоит из трех параграфов. Первый параграф посвящен решению задачи (1) в аналитическом виде. Предполагается, что процесс линейной фильтрации математически описывается выражением

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)x(t-\tau)d\tau. \quad (4)$$

Пусть квантованный $x(t)$ поступает также на вход цифрового фильтра. Интеграл свертки (4) записан для неограниченного интервала наблюдений. Это означает, что на физическую реализуемость данного фильтра не накладывается ограничений. Применительно к теории построения цифровых фильтров, устройство, выполняющее преобразование (4), называется фильтром-прототипом. Во временной области фильтр-прототип описывается импульсной характеристикой $h(\tau)$, $x(t)$ является центрированным входным процессом (или процессом на входе) фильтра-прототипа, а $y(t)$ - его выходным процессом (процессом на выходе). В качестве цифрового фильтра выбран, по обоснованным в первой главе соображениям, нерекурсивный цифровой фильтр (НЦФ). Модель процесса на его выходе есть

$$z(t) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k x[t - (k-m)T_0]. \quad (5)$$

В выражении (5) приняты следующие обозначения:

$\{z(t)\}$ - отсчеты процесса на выходе НЦФ в моменты времени, кратные T_0 ; $\{a_k\}$ - коэффициенты цифрового фильтра; N - количество коэффициентов; mT_0 - характеризует "прогнозирование" цифрового фильтра.

По поводу "прогноза" НЦФ заметим, что, в действительности, первый отсчет на его выходе появится через время, равное $(N-1)T_0$, и будет соответствовать моменту времени $(t-mT_0)$. Тем не менее, его введение в алгоритм (5) позволит при $m=0$ строить фильтр без запаздывания, т.е. функционирующий в реальном масштабе времени (РМВ), а при $m < 0$ - прогнозирующий цифровой фильтр.

Очевидно, что моделируемый процесс (4) на выходе фильтра-прототипа и его модель (5) не совпадают даже в отдельные моменты времени. Однако, возможно, правильным выбором множества коэффициентов $\{a_k\}$, при заданных m, T_0 и N сделать их отличие минимальным в смысле среднеквадратической ошибки. Средний квадрат разности (4) и (5) есть

$$\epsilon^2 = \langle [y(t) - z(t)]^2 \rangle. \quad (6)$$

Исходя из предположения о стационарности и эргодичности случайного процесса, в результате преобразований было получено

$$\epsilon^2 = \sigma_y^2 - 2 \sum_{k=0}^{N-1} a_k W_{k-m} + \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} a_k a_n A_{k-m, n}, \quad m = const. \quad (7)$$

$$\sum_{k=0}^{N-1} a_k A_{k-n} = W_{n-m}, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1; \quad m = const. \quad (8)$$

$$\epsilon_{\min}^2 = \sigma_y^2 - \sum_{k=0}^{N-1} a_k W_{k-m}, \quad m = const. \quad (9)$$

В формулах (7) - (8) приняты обозначения:

$$\sigma_y^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau_1 - \tau_2) h(\tau_1) h(\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) |\tilde{h}(\omega)|^2 d\omega \quad (10)$$

- дисперсия процесса на выходе фильтра прототипа;

$$W_k = \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau - kT_0) h(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \tilde{h}^*(\omega) \exp(-j\omega kT_0) d\omega, \quad (11)$$

где $\tilde{h}^*(\omega)$ - функция, комплексно-сопряженная $\tilde{h}(\omega)$;

$$A_n = B(nT_0); \quad (12)$$

$B(t)$ - корреляционная функция обрабатываемого процесса, а $S(\omega)$ - его спектральная плотность.

Анализ выражений (7) - (12) позволяет утверждать, что:

1, коэффициенты синтезированного фильтра зависят не только от вида фильтра-прототипа, но и от статистических свойств обрабатываемого процесса;

2) синтез цифрового фильтра можно проводить как в частотной так и во временной области, в зависимости от пожелания разработчика и удобства проведения математических выкладок и вычислительных процедур;

3) Выражение (9) позволяет рассчитать среднеквадратическую погрешность обработки процесса таким фильтром, по отношению к фильтру-прототипу, а выражение (7) - произвести аналогичный расчет для процесса с оговоренными статистическими свойствами, при использовании коэффициентов, отличных от оптимальных, то есть получаемых решением (8).

Второй параграф главы посвящается вычислительным экспериментам. Программа исследования квазиоптимальных цифровых фильтров включает изучение следующих вопросов: влияние параметров N и M на погрешность цифрового фильтра и его коэффициенты; обоснование выбора оптимального шага квантования T_0 входного процесса $x(t)$; влияние статистической структуры обрабатываемого процесса на погрешность и коэффициенты цифрового фильтра; устойчивость полученных НЦФ по отношению к изменениям статистических свойств фильтруемого процесса. Исследования проводились с использованием методов машинного моделирования для случайных процессов с различными корреляционными функциями и для различных фильтров-прототипов. В качестве моделей обрабатываемых процессов были выбраны процессы, отличающиеся хаотичностью своих реализаций: с экспоненциаль-

ной корреляционной функцией

$$B(\tau) = \sigma^2 \exp(-|\tau|/\tau_x), \quad (13)$$

с большой степенью хаотичности и процесс с колоколообразной корреляционной функцией

$$B(\tau) = \sigma^2 \exp(-\frac{\tau^2}{\tau_x^2}) - \quad (14)$$

- плавно меняющийся, гладкий. В (12) - (13) принято:

σ^2 - мощность обрабатываемого процесса; τ_x - характерный временной масштаб этого процесса.

В качестве фильтров-прототипов были взяты:

Фильтр с прямоугольной АЧХ и линейной ФЧХ. Его описание есть

$$\bar{h}(\omega) = \begin{cases} C \exp(-j\omega\tau_\Phi), & |\omega| \leq \omega_c, \\ 0, & |\omega| > \omega_c. \end{cases} \quad (15)$$

Этот фильтр часто используется на практике; RC-фильтр, употребляемый в литературе для демонстрационных примеров:

$$y(t) = \frac{C}{\tau_\Phi} \int_0^t x(t-\tau) \exp(-\tau/\tau_\Phi) d\tau. \quad (16)$$

В выражениях (15) - (16) - C - коэффициент усиления, τ_Φ - постоянная времени, а ω_c - частота среза.

Материалы проведенных исследований представлены в виде графиков и таблиц. На основании полученных зависимостей сделаны следующие выводы:

1. Синтезированные ИФФ обладают меньшей погрешностью обработки, нежели классические.
2. Симметрия коэффициентов ИФФ определяется видом импульсной характеристики фильтра-прототипа, но не является обязательной, в случае, когда желательно построить прогнозирующий ИФФ или ИФФ для работы в РМБ с целью запаздывания при физически нереализуемом фильтре-прототипе.
3. Статистическая структура обрабатываемого процесса значительно

влияет на шаг дискретизации и коэффициенты НЦФ.

4. Синтезируемые ЦФ устойчивы по отношению к изменению характерного масштаба обрабатываемого процесса.

5. Число коэффициентов ФНЧ определяется точностью обработки и не зависит от степени близости АЧХ или импульсной характеристик НЦФ и фильтра-прототипа.

В третьем параграфе главы проводится сравнение известных и квазиоптимальных фильтров. Проведенные в параграфе исследования показали, что квазиоптимальные фильтры являются фильтрами Колмогорова-Винеровского типа. По отношению к фильтру Калмана-Бьюси обладают рядом преимуществ на этапе расчета фильтра, при реализации в реальном масштабе времени и для обработки измерительной информации (как обладающие линейной ФЧХ). По отношению к классическим НЦФ, предлагаемые являются альтернативой при наличии информации о статистической структуре обрабатываемого процесса, и, в этой ситуации обладают минимальной, в среднеквадратическом смысле, ошибкой, по сравнению с любым фильтром указанного класса, и позволяют отыскать оптимальный шаг квантования входного процесса, минимизирующий погрешность обработки.

В третьей главе приводится решение задачи (2). Глава состоит из трех параграфов. Первый параграф посвящен выбору опорного полинома, в связи с чем выполнен их обзор. Исходя из соображений точности и возможности реализации в РМВ, в качестве опорного (базисного) полинома выбраны скользящие полиномы Лагранжа, частными случаями которых является ступенчатая и кусочно-линейная аппроксимация, в предельном - ряд Котельникова.

Во втором параграфе выводятся выражения для синтеза квазиоптимальных ЦФ, по отсчетам которого строятся интерполирующие полиномы. При этом считается, что ФНЧ описывается выражением (4), процесс на его входе и входе ЦФ - случайный стационарный эргодичес-

кий, алгоритм фильтрации определяется (5). Отсчеты НЧФ подвергаются интерполяции с использованием процедуры

$$z(t) = \sum_{v=-n}^n \hat{z}(vT_0 - \xi) f(t - vT_0 + \xi). \quad (17)$$

В формуле (17) приняты следующие обозначения:

$\hat{z}(\theta)$ - отсчеты на выходе НЧФ; $z(t)$ - сплайнная (просинтерполированная) координата НЧФ; $f(t)$ - жорная или базовая функция, принимаемая для интерполяции; ξ - случайная величина, характеризующая привязку отсчета процесса к сигнальному процессу. Предполагается, что величина ξ определяется на интервале

$$-\frac{T_0}{2} \leq \xi \leq \frac{T_0}{2}$$

и распределена равномерно в пределах этого интервала.

Применение критерия минимума среднеквадратической ошибки дает выражения для определения коэффициентов НЧФ и погрешностей обработки им случайного процесса аналогичные (7) - (9), а выражение для вычисления дисперсии выхода ФП тождественное (10). Остальные компоненты (7) - (9) суть

$$A_n = \frac{1}{T_0^2} \int_{-n}^n \sum_{v=-n}^n S(\omega) |f(\omega - v\frac{2\pi}{T_0})|^2 \exp(-j\omega T_0) d\omega, \quad (18)$$

$$W_k = \frac{1}{T_0} \int_{-n}^n S(\omega) \tilde{h}^*(\omega) \tilde{f}(\omega) \exp(-j\omega k T_0) d\omega. \quad (19)$$

Анализ полученных выражений показывает:

1. Коэффициенты НЧФ, определяемые решением (8) совместно с (18) и (19), учитывают статистические характеристики обрабатываемого процесса, АЧХ фильтра-прототипа и вид интерполирующего полинома.
2. Синтез фильтра целесообразно проводить в частотной области.
3. Выражение (7) позволяет рассчитывать минимальную среднеквадратическую ошибку, для заданных случайного процесса, фильтра-прототипа и интерполирующего полинома, а выражение (9) - при выборе

коэффициентов фильтра, отличных от оптимальных. Считается, что оптимальные (по критерию минимума среднеквадратической ошибки) коэффициенты цифрового фильтра получаются решением (8).

В третьем параграфе выполняются исследования для моделей случайных процессов, описываемых корреляционными функциями вида (13) и (14) и опорного полинома Лагранжа

$$f_N(x) = \frac{(-1)^N}{T_0^N N! x} \sum_{m=0}^N (-1)^m C_N^m (x+mT_0) [x+(m-1)T_0] \dots \dots [x+(m-N)T_0] E(x-mT_0+\tau'). \quad (20)$$

В этой формуле приняты обозначения:

C_N^m - число сочетаний из N элементов по m ; $E(x)$ - функция окна вида

$$E(x) = \begin{cases} 1, & 0 \leq x < T_0 \\ 0, & x < 0, x \geq T_0. \end{cases}$$

Параметр τ' в (20) выбран так, чтобы обеспечить симметрию относительно узла интерполяции (в нашем случае текущего отсчета) и определяется как

$$\tau' = -\frac{N-1}{2} T_0.$$

При этом известно, что имеет место равенство

$$\lim_{N \rightarrow \infty} f_N(x) = \text{Sa}\left(\frac{\pi x}{T_0}\right) = \frac{\text{stn}\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{\pi x}{T_0}},$$

и, таким образом, при стремлении степени полинома N к бесконечности, в качестве базовой функции используется функция отсчетов Котельникова. Последнее свойство позволило, в дальнейшем, принять решение о целесообразности увеличения степени полинома.

Для исследований порядок базисного полинома ограничивался третьим, так как на практике признано нецелесообразным использовать полиномы степени выше двух. В качестве ФП был выбран фильтр, описываемый (15), как наиболее часто используемый при решении за-

дач интерполяции в аппаратуре сопряжения в каналах связи. И. В. Стефанюк
АН УССР

данные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Процессы квадратичные, недифференцируемые лучше аппроксимируются полиномами 0, 1 и 3 степеней.
2. Процессы гладкие, дифференцируемые, лучше аппроксимируются, после цифровой фильтрации, полиномами 2-й и 3-й степеней.
3. Нарастания степени базового полинома выше 3-й нецелесообразно, как с точки зрения среднеквадратической ошибки, для обоих типов процессов, так и с позиции увеличения периода дискретизации, поэтому полином Лагранжа 3-й степени является компромиссным.
4. Шаг дискретизации более зависит от свойств фильтра-прототипа и обрабатываемого процесса, чем от степени аппроксимирующего полинома.
5. Квазиоптимальный фильтр без интерполяции представляет собой предельный случай квазиоптимального фильтра с интерполяцией, если бы в последнем, в качестве опорного полинома, была взята функция отсчетов Котельникова.

В результате исследований, проведенных в третьей главе получены следующие научные результаты:

1. Выведены формулы, позволяющие рассчитывать коэффициенты НКФ, выходные отсчеты которого аппроксимируются алгебраическими скользящими полиномами. В них учитываются характеристика фильтра-прототипа, статистические характеристики обрабатываемого процесса, вид базового полинома.
2. Проведен синтез и исследование квазиоптимальных интерполирующих цифровых фильтров для фильтра-прототипа с прямоугольной амплитудо- и логарифмической фазочастотной характеристиками, процессов с экспоненциальной и колоколообразной корреляционными функциями и различных степеней базового скользящего полинома Лагранжа.
3. Выработаны рекомендации по применению скользящих полиномов различных порядков при обработке случайных процессов разной степе-

ни хаотичности.

Четвертая глава посвящена решению задачи (3). Композиционно она состоит из трех параграфов. В первом параграфе рассматриваются вопросы методологии построения инверсных фильтров, проводится обзор различных способов решения поставленной задачи, в зависимости от наличия априорной информации об обрабатываемом процессе и математической модели прямого фильтра.

Во втором параграфе производится построение Нерекурсивного Цифрового Инверсного ЦФ (НЦИФ) в приложении к сейсмике, когда один и тот же процесс распространяется по нескольким лучам и в точке приема представляет собой взвешенную сумму

$$y(t) = \sum_{i=1}^M C_i x(t - \tau_i), \quad (21)$$

где C_i - коэффициент усиления i -ого луча, а τ_i - запаздывание (задержка) процесса на выходе этого луча по отношению к исходному. При таком подходе, известными методами частотной фильтрации, восстановление исходного процесса $x(t)$ не является возможным. Однако, использование критерия минимума среднеквадратической ошибки вида

$$\varepsilon^2 = \langle [x(t) - z(t+\theta)]^2 \rangle,$$

где θ - некоторое усредненное время, учитывающее распространение процесса между входом и выходом многолучевого канала, и алгоритма восстановления

$$\langle z(t) \rangle = \sum_{k=0}^{N-1} \alpha_k \langle y[t - (k-m)T_0] \rangle, \quad (22)$$

позволяет получить компактные формулы для расчета НЦИФ, аналогичные (7) - (9), с заменой σ_x^2 на σ_y^2 . В нашем случае

$$W_k = \sum_{i=1}^M C_i B(\theta - \tau_i - kT_0), \quad (23)$$

$$A_n = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M C_i C_j B(\tau_i - \tau_j + nT_0). \quad (24)$$

Проведенные далее вычислительные эксперименты были направлены на исследование влияния статистических свойств процесса на шаг дис-

кратизации, длину импульсной характеристики. По данным исследований разработаны рекомендации проектировщикам ЦФ для данной задачи.

Третий параграф содержит решение задачи (3), когда известна математическая модель прямого фильтра и описание обрабатываемого процесса в виде его корреляционной функции. В качестве модели прямого фильтра выбрано выражение (16), а в качестве обрабатываемых процессов — процессы с корреляционными функциями (13) и (14). В результате построения НЦИФ и проведения имитационного моделирования показано, что погрешность восстановления информации не будет превосходить определенную теоретически.

В приложении I приводится вывод формул для расчета квазиоптимальных цифровых фильтров.

В приложении 2 приводятся материалы внедрения результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертации состоят в следующем:

1. Разработана общая методология синтеза квазиоптимальных физически реализуемых ЦФ, учитывающая требования к обработке и статистические характеристики обрабатываемого процесса.
2. Получены в общем виде аналитические выражения, позволяющие рассчитывать коэффициенты ЦФ применительно к задачам частотной фильтрации, фильтрации с аппроксимацией отсчетов на выходе ЦФ скользящими полиномами, инверсной фильтрации с целью восстановления исходного случайного процесса, подвергнувшегося искажению.
3. Предлагаемый метод расчета позволяет получить коэффициенты ЦФ, способного работать в ГМВ и решать задачу прогноза при физической нереализуемости ФП.

4. Квазиоптимальные фильтры являются ЦФ Винеровского типа и обеспечивают минимальную среднеквадратическую погрешность среди НЦФ, коэффициенты которых рассчитаны по любому другому методу.
5. Разработаны методики организации вычислительных экспериментов на ЭВМ по определению необходимого числа коэффициентов ЦФ, оптимального шага дискретизации входного процесса, минимизирующих погрешность обработки.
6. Проведены исследования влияния статистической структуры обрабатываемого процесса на оптимальные параметры квазиоптимальных фильтров и их коэффициенты.
7. Проведены исследования квазиоптимальных ЦФ с интерполируемым выходом с целью определения оптимального порядка интерполирующего полинома, в зависимости от свойств случайного процесса. На их основании разработаны рекомендации по применению скользящих полиномов различных порядков при решении задачи цифро-аналогового преобразования.
8. Выполнены исследования квазиоптимальных инверсных НЦФ для различных моделей прямого фильтра и случайных процессов, описываемых экспоненциальной и колоколообразной корреляционными функциями.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Доценко С.В., Карлусов В.Ю. Влияние статистических свойств обрабатываемого процесса на коэффициенты и погрешность обработки цифрового фильтра. - В сб. статей: Методы и модели интенсификации производства. Сб. Научных трудов. - Киев: УМК ВО, 1988. - с. 49-54.

2. Доценко С.В., Карлусов В.Ю. Нерекурсивный цифровой фильтр с интерполируемым выходом. В сб.: Обработка информации в АСНИ. Тезисы докладов к зональной конференции. - Пенза: ПИИ, 1989.

- с.66-67.

3. Доценко С.В., Карлусов В.Ю. Синтез специализированных цифровых фильтров /Севаст.приборостр.ин.-т.-Севастополь, 1989. -Деп. в Укр.НИИТИ 25.10.89, № 22'1 -Ук.89. - 9 с.

4. Карлусов В.Ю. Влияние оптической структуры процесса на входе цифрового фильтра на его характеристики. Межвузовский сборник научных трудов: Элементы, устройства и программные средства информационно-преобразовательных систем. - Рязань: РРТИ, 1989. - с.72-79.

5. Доценко С.В., Карлусов В.Ю. Синтез алгоритмов цифровой фильтрации с учетом статистических свойств обрабатываемого процесса//Автометрия.-1990.- № 2. - с.81-85.

6. Карлусов В.Ю. Построение инверсных цифровых фильтров для обработки гидрофизических полей. В сборнике тезисов докладов конференции:Опыт разработки и внедрения цифровых и аналоговых фильтров и корректоров в системах связи.- Севастополь:ЧВВМУ им П.О. Нахимова, 1990. - с.73.

7. Карлусов В.Ю. Синтез цифровых фильтров, ориентированных на обработку результатов измерения ветрового волнения /Севастоп. приборостр. ин. -т.- Севастополь. 1990. - Деп. в Укр. НИИТИ 25.02.91 № 283 - Ук.91. - 8 с.



Подписано в печать 24.11.93 г. Зак. № 114. тор. 100, бумага тип. № 4. Формат 1/16. Объем 1,4 усл.-печ.л.

46888A

AB 23

The following information was obtained from the records of the
 Department of the Interior, Bureau of Land Management, on
 the date of the above mentioned survey. The same is being
 furnished to you for your information and use. It is
 to be understood that this information is not to be
 construed as a warranty of accuracy or as a guarantee
 of title. It is also to be understood that this
 information is not to be used for any purpose other
 than that for which it was furnished.

[Handwritten signature]

This document is the property of the Bureau of Land Management and is loaned to you for your use only. It is to be returned to the Bureau when no longer needed.

464511

AB 28859

AB 28.859