



На правах рукописи

АББАС ХАСАН МОХАМЕД АХМЕД КАТУШ

УДК 621.372.011.71  
621.372.018.78

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ УСКОРЕННОГО  
АНАЛИЗА ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ  
УСТРОЙСТВ

Специальность 05.12.17 - Радиотехнические устройства  
и системы

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Работа выполнена в Одесском ордена Трудового Красного  
Знамени политехническом институте

Научный руководитель - кандидат технических наук,  
доцент Власенко В.А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,  
профессор Куля В.И.

кандидат технических наук,  
ст. науч. сотр. Нудельман П.Я.

ЮНИИ специализированного

A A/1838  
Зас X.M.  
прим  
кор.

1983 г. в 10.30 час.

К П8.05.01 при  
язи им. А.С. Попова.

Кницев, I .

библиотеке института

Манд 1983 г.

совета

5 П.П. Воробейко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы Повышение точности и быстродействия радиотехнических устройств и систем является одной из самых актуальных проблем радиотехники. Динамические искажения (ДИ), возникающие в этих устройствах при быстрых изменениях их параметров, являются одной из причин снижения быстродействия и точности. Поэтому на этапе проектирования нужно учесть влияние этих искажений и выбрать параметры устройств, при которых имеет место допустимые ДИ.

Широкое распространение получили многомерные, многоканальные системы пространственно-временной обработки. Наличие взаимных связей между каналами и их большое число резко усложняют как функционирование систем, так и процессы проектирования, оптимизации параметров систем, процессы коррекции искажений сигналов в таких системах. Сказанное относится также к оценке динамических характеристик многомерных систем (ДХ) и (ДИ) многомерных сигналов.

Существующие в настоящее время и используемые в большинстве случаев приближенные методы анализа ДХ и оценки ДИ в радиотехнических устройствах громоздки, не позволяют полностью автоматизировать процесс анализа, а алгоритмы их реализации обладают недостаточным быстродействием. Увеличение размерности систем и сигналов выдвигает на первый план вопросы вычислительной эффективности этих алгоритмов.

Таким образом, остается актуальной задача разработки алгоритмов ускоренного анализа ДХ радиотехнических устройств и оценки возникающих при этом ДИ сигналов, которые удовлетворяли бы следующим требованиям:

- достаточная для практики точность вычисления ДХ и ДИ;
- высокая вычислительная эффективность;
- простота, удобство применения и наглядность, получаемых результатов;
- возможность оценки ДХ многомерных линейных устройств;
- возможность применения результатов анализа ДХ и ДИ для оптимизации параметров систем или устройств, входящих в систему.

Цель и задача работы. Целью настоящей работы является разработка алгоритмов ускоренного анализа ДХ с соответствующим программным обеспечением, позволяющим эффективно использовать эти алгоритмы на практике. Применение этих алгоритмов на практике позволяет не только обоснованно определять точность функционирования устройств, но и производить оптимизацию их параметров по критерию минимума ДИ, а также синтезировать фильтры, корректирующие ДИ.

Алгоритмы анализа можно разработать на основе дискретного преобразования Гильберта (ДПГ) в спектральной области обобщенного ортогонального базиса, а в случае применения тестового ДЧМ - сигнала, на основе дискретного преобразования Фурье (ДФФ).

Основными задачами исследования являются:

1. Разработка алгоритмов ускоренного анализа ДХ многомерных устройств (систем) на основе многомерного ДПГ и ДФФ, удовлетворяющих вышеперечисленным требованиям.
2. Разработка быстрых алгоритмов вычисления многомерного дискретного преобразования Гильберта.
3. Разработка быстрых алгоритмов вычисления ДФФ.

4. Создание программно-алгоритмического обеспечения (ПАО) алгоритмов анализа ДХ и ДИ.
5. Анализ и коррекция ДХ устройств определения частотных параметров радиосигналов.
6. Анализ ДХ дискретных фильтров на основе приборов с  $n$ -рядовой связью (ПЭС).
7. Анализ ДХ устройств обработки изображений.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались аналитические и экспериментальные методы исследований и моделирование на ЭЦВМ. Аналитические методы и применение ЭЦВМ базировались на современной теории сигналов, на методах численного анализа одномерных и многомерных рядов, методах анализа линейных электрических цепей, методах цифровой обработки сигналов, на алгоритмах дискретных преобразований Фурье, Гильберта и Френеля и на теории и практике программирования научных задач.

Научная новизна. Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Разработаны алгоритмы ускоренного анализа ДХ многомерных линейных устройств (систем) и показаний сигналов в этих устройствах, реализующие теорию многомерных ДПГ в радиотехнической практике.
2. Разработаны программы вычисления ДХ и ДИ линейных одномерных и двумерных радиотехнических устройств.
3. Получены выражения ДПГ многомерного гильбертова сигнала в спектральной области обобщенного ортогонального базиса, выведено выражение многомерного ДПГ в спектральной области Фурье, из которого следуют все известные свойства одномерного и дву-

мерного. случаев.

4. Разработан быстрый алгоритм вычисления многомерных ДПГ, получено обобщенное выражение ядра многомерного ДПГ в базисе Фурье.

5. Определены условия выполнения двумерных и трехмерных ДПГ. Установлено, что алгоритмы вычисления  $n$ -мерных ДПГ и  $(n + 4)$ -мерных ДПГ обладают одинаковыми свойствами.

6. Разработан быстрый алгоритм вычисления ДПФр финитных сигналов.

Практическая ценность. Практическая ценность заключается в применении разработанного метода для определения ДХ многомерных устройств (систем) на этапе проектирования, что позволит оптимизировать параметры этих устройств и синтезировать корректор, минимизирующий ДИ. Метод может быть использован для контроля качества функционирования устройств (систем) путем контроля величины ДИ, полученных по отклику системы на тестовые сигналы.

Разработанные алгоритмы вычисления ДПГ и ДПФр и пакеты прикладных программ можно использовать при решении различных задач обработки сигналов, в частности, при проектировании аналоговых и цифровых измерителей частотных и фазовых параметров, разработке устойчивых одномерных и двумерных фильтров, в задачах цифровой голографии и обработке изображений.

Реализация результатов исследований. Результаты теоретических и экспериментальных исследований были использованы при разработке устройства ввода изображений в ЭЦМ в научно-исследовательских работах кафедры "Теоретические основы радио техники" и отраслевой научно-исследовательской лаборатории

неразрушающего контроля Одесского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института. Методика анализа ДХ и пакет прикладных программ, разработанные автором, используются при выполнении научно-исследовательских работ кафедры ТОР для определения ДХ двумерных приемников изображений на ПЭС и при разработке адаптивных фильтров для коррекции ДХ устройств обработки изображений.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры "Теоретические основы радиотехники" и на научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава и молодых исследователей Одесского политехнического института 1979 - 1982 г.г., а также на Республиканской научно-технической конференции общества "Знание" УССР "Синтез фильтрующих и коррективирующих устройств для систем передачи информации по каналам связи", г. Одесса, 1982 года.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений; содержит 142 страницы машинописного текста, 59 рисунков, 25 таблиц, список литературы из 102 названий.

К защите представляются следующие тезисы:

1. Динамические характеристики линейных многомерных устройств, а также динамические искажения сигналов на выходе устройств, можно определить с помощью алгоритмов многомерного дискретного преобразования Гильберта.

2. Многомерные преобразователи Гильберта можно синтезировать с высокой точностью, при этом  $(2k + 1)$  - мерные преоб-

разователи более быстродействующие, чем  $(2K + 2)$ -мерные преобразователи Гильберта. ( $K = 0, 1, 2 \dots$ ).

3. Процедура программной реализации алгоритмов дискретного преобразования Гильберта позволяет полностью автоматизировать процесс вычисления динамических характеристик линейных устройств.

4. Анализ определенных с помощью ДПГ динамических характеристик измерителей частотных параметров позволил установить:

- включение ФНЧ на выходе измерителя повышает динамическую стабильность его переходной частоты;
- неэффективность переноса заряда в приборах с зарядовой связью приводит к дополнительным динамическим искажениям в измерителях, построенных на их базе;

измерители, построенные на основе дискретных и гребенчатых фильтров критичны к динамическим искажениям;

- в ряде случаев обратные фильтры являются хорошими компенсаторами динамических искажений.

5. Наличие в опто-электронных системах aberrаций разного порядка приводит к различным динамическим искажениям.

6. Более целесообразно использование опто-электронных систем с гауссовым распределением функций выходного зрачка, так как динамические искажения по всем критериям оказываются меньше, чем у систем с равномерным распределением функций выходного зрачка.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена критическому анализу современного состояния теории динамических характеристик линейных устройств и систем, и постановке задач исследований.

На основании анализа существующих методов определения ДХ выявлены основные недостатки этих методов: точная аналитическая оценка ДХ линейных систем становится затруднительной даже в случае относительно простых систем из-за сложности математических выражений, большое время вычисления на ЭЦВМ, ограниченность каждого из этих методов определенным классом сигналов или систем и практическая неприменимость этих методов к многомерным системам и сигналам. Сделан вывод о необходимости создания эффективных алгоритмов анализа ДХ многомерных линейных и линеаризованных устройств и систем. Показано, что алгоритмы могут быть созданы на основе ДПГ в спектральной области произвольного ортогонального базиса.

Приведен обзор состояния теории гильбертовых сигналов, изучено состояние теории одномерных ДПГ и показано, что их алгоритмы разрабатывались для многих ортогональных базисов. Даны основные соотношения для определения с помощью ДПГ последовательностей выборокгибающей, фазы и частоты одномерных сигналов.

Динамические характеристики определяются в большинстве случаев как динамические частотные характеристики — отклик системы на воздействие ЧМ сигнала, перенесенные в область частот. Это сводит процедуру определения ДХ к вычислению преобразования Фурье. Приведен анализ состояния дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и показаны недостатки существующих алгоритмов его вычисления. Сделаны выводы о необходимости определения связи между ДПГ и ДПФ и разработки эффективного алгоритма вычисления ДПФ.

На основе проведенного обзора сформулированы задачи исследований, включающие разработку алгоритмов ускоренного анализа

ДХ многомерных устройств систем на основе ДПГ и ДФР в спектральной области обобщенного ортогонального базиса, разработку быстрых алгоритмов вычисления многомерных ДПГ и ДФР и их ПАО, и применение разработанных методов для анализа ДХ устройств измерения частоты, дискретных фильтров на ПЭС и устройств обработки изображений, а также оптимизацию параметров устройств обработки изображений по критерию минимума ДИ.

Вторая глава посвящена разработке метода ДХ многомерных устройств и систем на основе ДПГ в спектральной области, обобщенного ортогонального базиса.

Используя известные выражения многомерной трансформанты Гильберта сигнала  $S_n(t_1, \dots, t_n)$  и многомерного гильбертова сигнала

$$\hat{S}_n(t_1, \dots, t_n) = \frac{1}{\mathcal{I}^n} \int\int\limits_{-\infty}^{\infty} \frac{S_n(\tau_1, \dots, \tau_n)}{\prod_{i=1}^n (t_i - \tau_i)} d\tau_1 \dots d\tau_n \quad (1)$$

$$\dot{Z}_n(t_1, \dots, t_n) = S_n(t_1, \dots, t_n) + j \hat{S}_n(t_1, \dots, t_n) \quad (2)$$

и теорию дискретных ортогональных преобразований и дискретных систем, выходной дискретный гильбертовский сигнал линейной многомерной системы получим в виде:

$$\dot{Z}_{\text{вых}}(m_1, \dots, m_n) = D_n^{-1} \{ D_n [S_n(m_1, \dots, m_n)] \cdot D_n [h_n(m_1, \dots, m_n)] \cdot \{ 1 + j D_n [\Gamma_n(m_1, \dots, m_n)] \} \} \quad (3)$$

где  $D_n, D_n^{-1}$  - операторы  $n$ -мерного дискретного прямого и обратного ортогонального преобразования,

$\Gamma_n(m_1, \dots, m_n)$  - многомерное ядро Гильберта,

$h_n(m_1, \dots, m_n)$  - импульсная характеристика системы.

Чаще всего системы описываются передаточными функциями в частотной области (по Фурье)

$$K_n(j\omega_1, \dots, j\omega_n) = F_n \{ h_n(t_1, \dots, t_n) \}$$

В дискретном случае выражение для элементов  $n$ -мерной трансформанты Гильберта в спектральной области Фурье  $\hat{S}_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$

получено в виде:

$$\dot{S}_n(z_1, \dots, z_n) = (-j)^n \left[ \text{Sgd} \left( \prod_{i=1}^n z_i \right) \right] \cdot S_n(z_1, \dots, z_n) \quad (4)$$

где  $S_n(z_1, \dots, z_n)$  - спектр исходного сигнала,

$\text{Sgd}$  - дискретная функция знака, определяемая как

$$\text{Sgd}(x_i) = \begin{cases} -1, & x_i \in \langle -1, N_i/2 - 1 \rangle \\ 0, & x_i = 0, N_i/2 \\ 1, & x_i \in \langle N_i/2 + 1, N_i - 1 \rangle \end{cases} \quad (5)$$

$N_i$  - число отсчетов исходного сигнала по  $i$ -ой переменной. С учетом (3) и (4) элементы  $n$ -мерного гильбертова сигнала в спектральной области Фурье получены в виде:

$$\dot{Z}_n(z_1, \dots, z_n) = \dot{S}_n(z_1, \dots, z_n) \cdot \dot{A}_n(z_1, \dots, z_n) \quad (6)$$

где

$$\dot{A}_n(z_1, \dots, z_n) = \begin{cases} 1 + \text{Sgd} \left( \prod_{i=1}^n z_i \right), & n = 4k + 1 \\ 1 - j \text{Sgd} \left( \prod_{i=1}^n z_i \right), & n = 2(2k + 1) \\ 1 - \text{Sgd} \left( \prod_{i=1}^n z_i \right), & n = 4k + 3 \\ 1 + j \text{Sgd} \left( \prod_{i=1}^n z_i \right), & n = 4(k + 1), \quad k = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

Как следует из выражения (7) имеется возможность уменьшить количество комплексных умножений при переходе от спектра исходного сигнала к спектрам гильбертовых сигналов (для нечетных  $n$ ) в два раза по сравнению со случаем вычисления ДПФ сигналов с четным  $n$ .

На основе выражений (3), (6) и (7) многомерный дискретный гильбертов сигнал на выходе линейной системы определяется в виде:

$$\dot{Z}_{n_{\text{вых}}}(m_1, \dots, m_n) = F_n^{-1} \left\{ \dot{Z}_n(z_1, \dots, z_n) \cdot \dot{K}_n(z_1, \dots, z_n) \right\} \quad (8)$$

где  $F_n^{-1} \{ \dots \}$  - оператор многомерного обратного дискретного преобразования Фурье (ДПФ).

Выражение (8) легко реализовать при вычислении ДХ на ЭЦВМ. Амплитуда и фаза на выходе системы определяется как модуль и аргумент сигнала  $\dot{Z}_{n_{\text{вых}}}(m_1, \dots, m_n)$ . При расчете фазы сигнала возможны значительные погрешности из-за возникновения скачков

зи на  $\mathfrak{X}$ , так как функция  $\Psi(x) = \arctg(x)$  многозначна и, главное ее значение ограничено пределами  $(-\pi/2 < \arctg(x) < \pi/2)$ .

Приращение фазы на один шаг вычислений определяется как  $\Delta\varphi_k = \varphi_k - \varphi_{k-1}$ , где  $\varphi_k$  - текущая фаза,  $\varphi_{k-1}$  - предшествующее значение фазы. Зная сопряженный по Гильберту выходной сигнал  $\hat{s}_{\text{вых}}(m)$ , можно определить разность фаз на шаг предполагая, что  $|\Delta\varphi_k| \leq \mathfrak{X}$  в следующем виде:

$$\Delta\varphi_k = \begin{cases} \Psi, & xy > -1 \\ \Psi + \mathfrak{X}, & xy < -1, x > 0 \\ \Psi - \mathfrak{X}, & xy < -1, x < 0 \end{cases} \quad (9)$$

где  $x = \hat{s}_k/s_k$ ,  $y = \hat{s}_{k-1}/s_{k-1}$ ,  $\Psi = \arctg[(x-y)/(1+xy)]$ .

Если  $xy = -1$  при  $x > y$ , то  $\Delta\varphi_k = \pi/2$ , а при  $x < y$   $\Delta\varphi_k = -\pi/2$ .  
 Фазу на  $k$ -ом шаге вычисления можно определить следующим рекуррентным выражением:

$$\varphi_k = \varphi_{k-1} + \Delta\varphi_k = \varphi_0 + \sum_{i=1}^k \Delta\varphi_i$$

где  $\varphi_0 = \arctg \frac{\hat{s}_0}{s_0}$ ,  $|\varphi_0| \leq \pi/2$  - начальная фаза.

В диссертации приведены алгоритмы и программы расчетов ДХ и ДИ однс-двух и трехмерных систем.

Погрешность метода анализа определяется шумом квантования  $i$ -ого элемента на выходе системы. При этом верхняя оценка отношения шум/сигнал определяется выражением:

$$G_0^2/G_{\text{шум}}^2 = \frac{1}{3} [2^{-2b_2} + p(2^{-2b_1} + 2^{-(p+2b_1)})] \quad (10)$$

где  $N = 2^p$  - число отсчетов сигнала,  $b$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  - число разрядов вычисления арифметических операций, коэффициентов Фурье и представления передаточной функции соответственно.

При вычислениях на ЕС ЭВМ имеем  $b = b_2 = 32$ .  $b_1$  определяется погрешностью вычисления функции  $\sin$  или  $\cos$  и при этом  $b_1 = 24,57$ . Оценка (10) дает пренебрежимо малую величину -

ную ошибку, меньше  $1.5 \cdot 2^{-52}$ , следовательно, ее можно пренебречь.

Для реализации данного алгоритма в виде спецпроцессора с ограниченной длиной слова  $\nu_0$  необходима корректная оценка возникающих погрешностей вычисления ДПГ. В таблице I приведены значения среднеквадратической ошибки вычисления, в зависимости от параметров процессора.

Таблица I

$\nu_0$ P :	4	5	6	7	8	9	10
4	$6.5 \cdot 10^{-3}$	$7.81 \cdot 10^{-3}$	$9.11 \cdot 10^{-3}$	0.0104	0.0117	0.013	0.0143
8	$2.54 \cdot 10^{-3}$	$3.05 \cdot 10^{-3}$	$3.56 \cdot 10^{-3}$	$4.07 \cdot 10^{-3}$	$4.58 \cdot 10^{-3}$	$5.08 \cdot 10^{-3}$	$5.6 \cdot 10^{-3}$
12	$9.93 \cdot 10^{-4}$	$1.19 \cdot 10^{-3}$	$1.39 \cdot 10^{-3}$	$1.59 \cdot 10^{-3}$	$1.79 \cdot 10^{-3}$	$1.98 \cdot 10^{-3}$	$2.19 \cdot 10^{-3}$
16	$3.88 \cdot 10^{-4}$	$4.65 \cdot 10^{-4}$	$5.43 \cdot 10^{-4}$	$6.21 \cdot 10^{-4}$	$6.98 \cdot 10^{-4}$	$7.76 \cdot 10^{-4}$	$8.54 \cdot 10^{-4}$

Для получения достоверных результатов при практическом использовании метода анализа ДХ необходимо соблюдать следующие условия:

1. Величина  $N \geq 2T_3 F_{\text{вых}}$ , где  $F_{\text{вых}}$  - верхняя граничная частота выходного сигнала при условии  $F_{\text{вых}} \geq F_{\text{вх}}$ ,  $F_{\text{вх}}$  - верхняя граничная частота входного сигнала. Если  $F_{\text{вых}} < F_{\text{вх}}$ , то  $N$  определяется с учетом максимального значения верхней граничной частоты,  $T_3$  - длительность входного сигнала.

2. Дискретизация по частоте передаточной функции системы осуществляется через интервал  $\Delta\omega = \frac{2\pi}{T_3}$ .

3. Время анализа ДХ, равное длительности входного сигнала, должно быть больше времени установления переходных процессов в системе, вызванных случайным изменением параметров тестового сигнала.

Проведенный, с целью иллюстрации работоспособности алгоритмов, машинный эксперимент показал совпадение результатов с известными.

Третья глава посвящена применению ускоренных алгоритмов мно -

гомерного ДФФр к анализу ДХ.

Многомерное преобразование Френеля по аналогии с одномерным и двумерным определяется в виде:

$$\dot{\Phi}_n(t_1, \dots, t_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} h_n(t_1, \dots, t_n) \cdot \exp\left\{ \frac{j\pi}{\alpha^2} [(t_1 - \tau_1)^2 + \dots + (t_n - \tau_n)^2] \right\} d\tau_1 \dots d\tau_n \quad (II)$$

где  $\alpha$  - параметр преобразования Френеля.

Если  $h_n(t_1, \dots, t_n)$  - импульсная характеристика многомерной линейной системы, а  $S_n(t_1, \dots, t_n)$  - входной сигнал (многомерной ЛЧМ-сигнал), то трансформанта Френеля  $\dot{\Phi}_n(t_1, \dots, t_n)$  представляет собой многомерную динамическую характеристику.

Вычисление  $n$ -мерного ДФФр на практике сводится к  $n$ -кратному применению одномерного ДФФр по каждой переменной. На основании полученных во второй главе свойств многомерных ДПГ установлена связь между  $n$ -мерной трансформантой Гильберта и  $n$ -мерной трансформантой Френеля

$$h_n(t_1, \dots, t_n) = S_n^{-1}(t_1, \dots, t_n) \otimes I_m[\dot{\Phi}_n(t_1, \dots, t_n)] \quad (I2)$$

$$S_n^{-1}(t_1, \dots, t_n) = 1/\text{Re} \left\{ \exp \left[ \frac{j\pi}{\alpha^2} (t_1^2 + \dots + t_n^2) \right] \right\} \quad (I3)$$

$$\dot{\Phi}_n(t_1, \dots, t_n) = \begin{cases} j \hat{h}_n(t_1, \dots, t_n) \otimes \dot{z}_n(t_1, \dots, t_n), & n=2k+1 \\ j \hat{h}_n(t_1, \dots, t_n) \otimes \dot{z}_n^*(t_1, \dots, t_n), & n=2k \end{cases} \quad (I4)$$

где  $\otimes$  - оператор свертки.

$$\dot{z}_n(t_1, \dots, t_n) = \exp \left[ \frac{j\pi}{\alpha^2} (t_1^2 + \dots + t_n^2) \right], \quad S_n(t_1, \dots, t_n)$$

- многомерная функция Френеля (ФФр) и ее реальная часть соответственно. Выражение для  $n$ - мерного ДФФр в спектральной области обобщенного ортогонального преобразования аналогично выражению (3)

$$\Phi_n(m_1, \dots, m_n) = D_n^{-1} \{ D_n [S_n(m_1, \dots, m_n)] \cdot D_n [h_n(m_1, \dots, m_n)]^x \cdot \{ 1 + j D_n [\Gamma_n(m_1, \dots, m_n)] \} \} \quad (15)$$

Из выражений (II) и (15) вытекает, что, по крайней мере, существует три алгоритма вычисления ДФР.

I. Первый алгоритм вытекает из дискретной версии преобразования Фурье (II)

$$\Phi_n(m_1, \dots, m_n) = \sum_{k_1=0}^{N_1-1} \sum_{k_2=0}^{N_2-1} \dots \sum_{k_n=0}^{N_n-1} h_n(k_1, \dots, k_n) \cdot \hat{z}_n(m_1 - k_1, \dots, m_n - k_n) \quad (16)$$

где  $N_i = N_{hi} + N_{zi} - 1$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ .

$N_{hi}$ ,  $N_{zi}$  - количество точек дискретизации исходного сигнала и ДФР по каждой переменной соответственно.

II. Второй алгоритм - определение ДФР через ДФФ

$$\Phi_n(m_1, \dots, m_n) = \exp \left[ j \chi \left( \frac{m_1^2}{u_1^2 N_1} + \dots + \frac{m_n^2}{u_n^2 N_n} \right) \right] \cdot F_n \{ \hat{G}_{n_{ix}}(k_1, \dots, k_n) \} \quad (17)$$

где

$$\hat{G}_{n_{ix}}(k_1, \dots, k_n) = h_n(k_1, \dots, k_n) \cdot \exp \left[ j \chi \left( k_1^2 u_1^2 / N_1 + \dots + k_n^2 u_n^2 / N_n \right) \right]$$

$$N_i = 2 T_i F_{mi}, \quad u_i^2 = x_i^2 / \alpha^2, \quad x_i^2 = T_i / F_{mi},$$

$T_i$ ,  $F_{mi}$  - длительность и ширина спектра сигнала  $\hat{G}_{n_{ix}}(k_1, \dots, k_n)$  по  $i$ -ой переменной соответственно.

III. Третий алгоритм получается из выражения (14) и (15) с учетом (7) и (8)

$$\Phi_n(m_1, \dots, m_n) = F_n^{-1} \{ \hat{S}_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \cdot K_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \cdot \hat{A}_n(\tau_1, \dots, \tau_n) \} \quad (18)$$

где  $\hat{S}_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$ ,  $K_n(\tau_1, \dots, \tau_n)$  - спектры действительной части функции Френеля и исходного сигнала соответственно.

Вычислительная эффективность алгоритмов I...III иллюстрируется соотношениями (19)...(21) соответственно

$$M_1 = N \left[ 9 + \frac{3}{2} \log_2 N \right], \quad (19)$$

$$\left( \overline{\sigma_{\theta_1}^2} / \overline{\sigma_{\varphi_1}^2} \right) = \frac{P}{3} \left[ 2^{-2b} + 2^{-(2b_1 + p)} \right] + \frac{8}{3} \cdot 2^{-2b_4} + \frac{1}{3} \cdot 2^{-2b_3},$$

$$M_2 = N \left[ 18 + \frac{1}{2} \log_2 N \right], \quad (20)$$

$$\left( \overline{\sigma_{\theta_2}^2} / \overline{\sigma_{\varphi_2}^2} \right) = \frac{P}{6} \left[ 2^{-2b} + 2^{-(2b_1 + p)} \right] + \frac{16}{3} \cdot 2^{-2b_4},$$

$$M_3 = N \left[ 4,3 + \frac{3}{2} \log_2 N \right], \quad (21)$$

$$\left( \overline{\sigma_{\theta_3}^2} / \overline{\sigma_{\varphi_3}^2} \right) = \frac{P}{3} \left[ 2^{-2b} + 2^{-(2b_1 + p)} \right] + \frac{3}{2} \cdot 2^{-2b_4} + \frac{2^{-2b_3}}{3},$$

где индексы 1, 2, 3 - номер алгоритма,  $b_3$  - разрядность вычисления импульсной характеристики,  $b_4$  - разрядность вычисления

$$\exp(j\omega^2 z^2 / N), \quad p = \log_2 N$$

Из выражений (19)...(21) следует, что алгоритм III наиболее эффективен с вычислительной точки зрения, причем он самый быстродействующий и точный для всех  $N < 8192$

Для реализации рассмотренных алгоритмов ДПГ и ДФР предложена структурная схема измерителя ДХ и ДИ, состоящая из трех основных блоков: блок вычисления трансформанты импульсной характеристики исследуемой системы, блок вычисления АЧХ и ФЧХ, и блок вычисления ДИ.

В четвертой главе приведен анализ ДХ измерителей частотных характеристик радиосигналов.

Методом ДФР проанализирован ЧД на расстроенных контурах с учетом влияния фильтра нижних частот (ФНЧ) на выходе, определены динамические детекторные характеристики (ДДХ) и зависимость смещения нуля ДДХ от нормированной скорости нарастания частоты. Полученные результаты показали, что включение ФНЧ на выходе ЧД позволит повысить динамическую стабильность переходной частоты в 1,5-2 раза. Таким образом, ФНЧ является простейшим корректором динамической неустойчивости переходной частоты ЧД.



Проведенный анализ ДИ в измерителях частотных параметров сиг-налов с преобразованием ЧМ - ФМ показал, что основные ДИ возникают в линии задержки (ЛЗ). Динамические искажения в ЛЗ оказываются на-много больше, чем предполагалось в известных работах. Найденны ДИ ультразвуковых ЛЗ и условия уменьшения ДИ.

При реализации ЛЗ на ПЭС неэффективность переноса заряда  $\epsilon$  оказывается существенным фактором, влияющим на форму частотных ха-рактеристик ЛЗ. Другим важным параметром ЛЗ на ПЭС является такто-вая частота  $f_T$ . Проведен анализ ДИ реальных ЛЗ на ПЭС в завк-симости от  $\epsilon$ ,  $f_T$ . Установлено, что для предотвращения ДИ в ЛЗ на ПЭС, число каскадов в многокаскадной ЛЗ не должно превышать 1000. Дальнейшее увеличение числа каскадов приводит к значительному росту ДИ.

Проведен анализ ДИ измерителей формы закона внутримпульсной ЧМ на основе дискретных фильтров. Получены и проанализированы ДИ гребенчатых фильтров на идеальных ЛЗ. Предложен метод коррекции ДИ этих фильтров, по которому синтезировано несколько схем коррек-торов ДИ. Проанализированы восемь вариантов схем рекурсивных филь-тров на ПЭС и определены их ДИ и ДИ для большого интервала вари-аций их параметров и параметров тестового ЛЧМ-сигнала.

Результаты машинного эксперимента показали, что существуют противоречия между требованиями к точности таких измерителей и требованиями к уменьшению ДИ дискретных фильтров. Приведенные ре-зультаты эксперимента позволяют:

- выбрать оптимальные с точки зрения допустимого уровня ДИ режи-мы работы измерителей частотных параметров сигналов и дискретных фильтров;

- сформулировать критерии синтеза корректирующих устройств, снижающих ДИ в трактах измерителей и приемников ЧМ-сигналов.

Пятая глава посвящена анализу ДИ аналоговых и цифровых уст-ройств обработки изображений, анализу источников ДИ и типичных

процессорах обработки изображений и влиянию ДИ на контрастно-частотные характеристики формирователей изображений.

Приводится методика и программы расчета ДХ и ДИ реальных аберрационных оптических процессоров формирования и обработки изображений. Получены статические и динамические контрастно-частотные характеристики оптических процессоров с равномерной и гауссовой функциями распределения интенсивности в выходном зрачке при наличии в них аберраций до 5-го порядка включительно. Получены численные зависимости ДИ, отражающие реальную пространственную разрешающую способность процессоров. Даны практические рекомендации по выбору типа процессора, его параметров и параметров входного сигнала.

Получены статические и динамические ЛЧХ и зависимости ДИ двумерных ЛЧХ и полосового фильтра, входящие в процессоры обработки изображений.

Определяются ДИ в элементах процессоров гомоморфной обработки сигналов. Показано влияние параметров сигнала и фильтра на ДИ, приведены зависимости СКО динамической ЛЧХ от значения параметров линейной части фильтра и входного двумерного ЛЧХ-сигнала, определены допустимые пределы изменения этих параметров для обеспечения приемлемых значений ДИ.

В приложении приводится:

- программы вычисления ДХ линейных устройств систем;
- подпрограммы вычисления одномерных и двумерных быстрых преобразований Фурье и Гильберта;
- подпрограммы вычисления ДИ линейных устройств систем;
- подпрограммы вывода рисунков одномерных массивов данных, вывода аксонометрических видов и сечений двумерных массивов данных.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Получены быстрые алгоритмы анализа ДХ многомерных линейных устройств, систем, работающих в динамическом режиме, а также определения ДИ сигналов на выходе этих устройств (систем). Разработаны методики расчета динамических частотных характеристик многомерных систем.

2. Получено общее выражение многомерных дискретных преобразований Гильберта в спектральной области дискретных экспоненциальных функций. Найдены условия синтеза двумерного и трехмерного преобразователей Гильберта, позволившие синтезировать эффективные алгоритмы вычисления ДИ. Разработан алгоритм, позволяющий сократить в два раза количество арифметических операций при вычислении  $(2K + 1)$ -мерных дискретных преобразований Гильберта ( $K = 0, 1, \dots$ ).

3. Найдены выражения для определения точности и быстродействия алгоритмов, реализующих вычисления многомерных дискретных преобразований Гильберта, получена верхняя оценка точности вычислений.

4. Показана возможность применения дискретного преобразования Фурье для вычисления динамических частотных характеристик многомерных устройств. Предложен новый алгоритм вычисления, обеспечивающий большую точность и быстродействие по сравнению с известными.

5. Разработано программно-алгоритмическое обеспечение предложенных алгоритмов для вычисления и отображения ДХ одномерных и двумерных систем.

6. Предложена структурная схема специализированного цифрового измерителя динамических характеристик линейных радиоустройств, реализующего разработанные алгоритмы.

7. Проанализированы динамические характеристики аналоговых

измерителей частотных параметров. При этом получены следующие результаты:

- включение ФНЧ на выходе измерителя позволяет повысить динамическую стабильность его переходной частоты, что положительно сказывается на качестве работы, особенно при измерении малых и быстрых уходов частоты;

- динамические искажения в широкополосных элементах, используемых в качестве фазосдвигающих цепей измерителей, в частности, линии задержки, намного больше, чем предполагалось ранее, что отрицательно сказывается на качестве работы измерителя;

- неэффективность переноса заряда в ПЭС приводит к дополнительным динамическим искажениям в измерителях, построенных на базе ПЭС;

- измерители, построенные на основе дискретных и гребенчатых фильтров критичны к динамическим искажениям;

- показана возможность коррекции динамических искажений в измерителях, синтезировано несколько структурных схем линейных корректоров.

8. Проведенный анализ динамических характеристик рекурсивных фильтров на ПЭС позволил установить связь между динамическими искажениями и скоростью изменения параметров входного сигнала и параметрами систем.

9. Получены численные зависимости ДИ двумерных фильтров. В частности, проанализированы ФНЧ, полосовой фильтр и двумерные фильтры систем гомоморфной обработки изображений. Показана связь между ДИ данных устройств и их параметрами.

10. Проведен анализ динамических частотных характеристик оптоэлектронных систем обработки изображений. Анализ показал:

- с ростом длины волны происходит возрастание ДИ независимо от типа аберраций;

- форма оптической передаточной функции в динамическом режиме

сильно оказывается, что в свою очередь отражается на разрешающей способности оптоэлектронных систем;

- наличие в оптических системах аберрационных функций разного порядка приводит к различным ДИ;

- более целесообразно использование оптических систем с гауссовым распределением функций входного зрачка, так как ДИ по всем критериям оказываются меньше, чем у оптических систем с равномерным распределением входного зрачка.

Полученные результаты позволяют более обоснованно определять точностные характеристики и проводить проектирование многомерных радиотехнических устройств и систем, работающих в динамических режимах, а также обоснованно синтезировать устройства - компенсаторы динамических искажений.

Основные результаты диссертационной работы отражены в следующих работах автора .

1. Власенко В.А., Йегер Д., Катуш А.Х.М. Исследование динамических характеристик частотных детекторов на линиях задержки. "Изв.вузов СССР - радиоэлектроника", 1982, т. 25, № 5, с. 70-71.
2. Катуш А.Х.М., Власенко В.А., Йегер Д. Обобщенный метод анализа динамических характеристик линейных цепей. Рукопись деп. в НИИ ЭИР, Реф.опубл. в МРС, ТТЭ, сер.№ 12, 1982, ВИНИ.
3. Катуш А.Х.М., Власенко В.А., Йегер Д. Исследование динамических искажений в радицепях методом преобразования Гильберта. Рукопись деп.в НИИ ЭИР, Реф.опубл. в МРС, ТТЭ, сер. ЭР, № 12, ВИНИ.
4. Катуш А.Х.М., Власенко В.А., Йегер Д. Анализ динамических характеристик измерителей скорости ТМ на основе гребенчатых фильтров. Рукопись деп. в НИИ ЭИР, Реф. опубл. в МРС, ТТЭ, сер. ЭР, № 8, 1982, ВИНИ.
5. Власенко В.А., Катуш А.Х.М., Йегер Д. Анализ динамических искажений сигналов в многомерных линейных системах. Рукопись деп. в НИИ ЭИР, № 3 -6950 г. Москва, 1982, - 29 с.
6. Катуш А.Х.М., Власенко В.А. Анализ динамических искажений в устройствах гомоморфной обработки сигналов. Рукопись деп. в НИИ ЭИР, № 3 - 6951, Москва, 1982, - 12 с.
7. Отчет о научно - исследовательской работе " Разработка и исследование методов ввода изображений в ЭВМ с целью автоматизации обработки информации", номер государственной регистрации Э1006814, 1983.

Подписано к печати 26.04.83 г.  
Объем: 1,00 печ.л.  
Формат 60x90 1/16.  
Заказ № 319. Тираж 100.

---

Типография Одесского электротехнического института связи  
им. А.С. Попова. Одесса, Комсомольская, 61.