

На правах рукописи

Мьо Ти Ха

**Аппаратные и программные средства реального времени
для одно- и двумерных микрофонных решеток**

Специальность: 05.13.05 - Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Автор:

Москва – 2007г.

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Алюшин М.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Домрачев В.Г.

кандидат технических наук
Лекомцев В.М.

Ведущая организация: ГУП НПЦ ЭЛВИС

Защита состоится 21 мая 2007г. в 18-00 часов на заседании диссертационного совета Д212.130.02 в Московском инженерно-физическом институте (государственном университете) по адресу: 115409, г. Москва, Каширское шоссе, д.31. (тел 323-91-67).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ.

Автореферат разослан «___» апреля 2007 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 115409, г.Москва, Каширское шоссе, д.31, Ученый совет МИФИ

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор технических наук, профессор

Г. В. Петров

Общая характеристика диссертации

Актуальность работы

Преимущества использования микрофонных решеток (МР) обусловлены возможностью формирования заданной диаграммы направленности, имеющей максимум в направлении источника полезного сигнала и минимумы в направлении источников шумовой помехи. Большинство известных применений МР требует реализации возможности синтеза диаграммы направленности с заданными характеристиками в реальном масштабе времени.

В настоящее время наиболее быстрыми темпами развиваются МР для встраиваемых, малогабаритных и переносных автономных приложений [6, 7]. Основным критерием эффективности применяемых технических решений для систем такого класса становится показатель «энергопотребление-производительность», что обуславливает ограниченную применимость многих существующих в настоящее время высокопроизводительных аппаратных средств цифровой обработки по причине их высокого энергопотребления.

Исследование и создание комплекса методических и технических средств, дающих возможность улучшить показатель «энергопотребление-производительность» для применяемых в МР электронных узлов реального времени, является актуальной в настоящее время задачей [7, 8]. Актуальность решения данной задачи обусловлена также необходимостью создания отечественных образцов современных МР для встраиваемых и автономных приложений в области медицинской техники, ультразвуковой диагностики, геологоразведки, систем безопасности, систем контроля трубопроводов, робототехники и систем специального назначения, что предполагает разработку и производство соответствующих электронных узлов и устройств на основе современной элементной базы.

В этой связи исследование, разработка и реализации электронных модулей реального времени для встраиваемых и малогабаритных автономных системы сбора и обработки данных МР, а также методических, технических и программных средств создания таких модулей, является актуальной научной и практической задачей [11, 13].

В данной работе для сокращения требуемых вычислительных ресурсов при формировании диаграммы направленности МР с заданными параметрами предлагается композиционный подход, основанный на использовании аналоговых и цифровых методов компенсации фазы обрабатываемых акустических сигналов [12, 13]. Реализация данного подхода на практике связана с решением ряда научных, практических и экспериментальных задач.

Проведенный анализ современных МР [7], а также структурных, схемотехнических и алгоритмических решений, используемых для обработки данных в реальном масштабе времени, позволил сформулировать актуальные в настоящее время научные и практические задачи, возникающие при создании МР.

Общие задачи проектирования

1. Возможность обработки данных для одномерных 1D, двумерных 2D и трехмерных 3D микрофонных решеток в реальном масштабе времени.
2. Возможность обработки до 10^2 - 10^4 независимых каналов.
3. Идентичность АЧХ и АФХ каналов. В зависимости от области применения МР рабочий частотный диапазон может изменяться от инфразвукового 10Гц-100Гц, до звукового 300Гц-12кГц и ультразвукового 30кГц-500кГц. Среди типичных спектров обрабатываемых акустических сигналов можно выделить два основных класса – узкополосные (например, ультразвуковые исследования) и широкополосные (задачи распознавания речи в шумах).
4. Возможность реализации алгоритмов формирования требуемой диаграммы направленности в реальном масштабе времени.
5. Возможность реализации в реальном времени алгоритмов адаптивной фильтрации.

Цель диссертационной работы заключается в исследовании, разработке и реализации электронных модулей реального времени системы сбора и обработки данных для МР на основе подхода, предполагающего использование методов аналоговой и цифровой компенсации разницы фаз, а также методических и технических средств создания таких модулей, ориентированных на использование, в первую очередь, в малогабаритной переносной и автономной аппаратуре.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Анализ научно-технической информации и патентной документации с целью выявления применяемых ведущими компаниями структурных, схемотехнических и алгоритмических решений в многоканальных системах обработки данных в фазированных акустических (микрофонных) решетках.
2. Создание обобщенной модели обработки данных в одномерных и двумерных микрофонных решетках. Выделение основных функциональных преобразований, используемых для формирования диаграммы направленности в одномерном и двумерном случаях.
3. Классификация выполняемых электронной системой операций обработки в соответствии с аппаратными и программными (микропрограммными) ресурсами системы.
4. Исследование структуры одномерных и двумерных решеток. Моделирование основных характеристик решеток на основе пакета MathCAD.
5. Классификация основных типов акустических решеток для одномерного, двумерного и трехмерного случаев. Анализ характеристик акустических систем.

6. Разработка методики проектирования электронных модулей многоканальной системы обработки данных, ориентированных на встраиваемые и стационарные применения.
7. Анализ и классификация современных многоканальных АЦП, ориентированных на встраиваемые применения. Анализ функциональных возможностей АЦП. Разработка рекомендаций по выбору БИС многоканальных АЦП.
8. Обоснование состава и формирование библиотеки функциональных узлов обработки данных на основе современной элементной базы – ПЛИС, встраиваемые микроконтроллеры, сигнальные процессоры.
9. Создание лабораторного экспериментального образца многоканальной системы обработки данных в микрофонных решетках. Проведение лабораторных испытаний экспериментального образца.
10. Разработка тестового и диагностического программного обеспечения. Разработка тестовых средств эмуляции источника акустического сигнала с заданными характеристиками.

Научная новизна работы заключается в решении следующих задач:

1. Обоснован композиционный подход к компенсации разницы фаз для сигналов различных каналов микрофонной решетки, предполагающего использование аналоговых и цифровых узлов реального времени с программируемой задержкой. Предложенный способ компенсации разницы фаз предполагает эффективную аппаратную реализацию на основе современных ПЛИС, что позволяет снизить потребляемую мощность встраиваемых многоканальных систем обработки данных для одномерных, двумерных и трехмерных микрофонных решеток [12].

2. Осуществлена разработка структурных схем электронных узлов реального времени для компенсации разницы фаз, ориентированных на использование в одномерных, двумерных и трехмерных МР. Разработаны унифицированные параметризованные структурные и схемотехнические решения для аналоговых и цифровых узлов электронной системы обработки данных в МР на основе предложенного подхода [11-13].

3. Разработаны методики проектирования аналоговых и цифровых узлов многоканальной системы реального времени, предполагающие использование предложенного подхода к компенсации разницы фаз. Цель разработки методик состоит в минимизации параметра энергопотребление/производительность для встраиваемых многоканальных электронных систем обработки данных в фазированных МР [12, 13].

Поставленная цель достигается за счет формализации процесса разработки структурных и схемотехнических решений, обеспечивающих реализацию аналоговых и цифровых узлов компенсации временной задержки (разницы фаз), на основе созданных типичных решений, ориентированных на использование в составе САПР Cadence и Mentor Graphics.

4. Осуществлена разработка моделей одномерных, двумерных и трехмерных микрофонных решеток для САПР MathCAD, позволяющих определить

оптимальные с точки зрения числа используемых каналов обработки данных характеристики решеток.

Практическая значимость работы обусловлена:

1. Разработкой унифицированных аналого-цифровых электронных модулей, предназначенных для построения многоканальных систем обработки данных современных МР, позволяющих по сравнению с известными способами цифровой обработки данных в 3-5 раз снизить потребляемую системой мощность за счет реализации композиционного подхода к формированию фазовых сдвигов.

2. Разработкой лабораторного 16-канального прототипа электронной системы обработки данных для одномерных МР, позволяющего провести изучение эффектов, связанных с формированием диаграмм направленности с требуемыми параметрами.

3. Созданием лабораторного 128-канального стенда, дающего возможность осуществить весь комплекс исследовательских работ при использовании двумерных МР и соответствующих диаграмм направленности.

4. Разработкой встроенных тестовых, диагностических и отладочных аппаратно-программных средств на уровне отдельных функциональных узлов, электронных модулей и электронной системы.

5. Разработкой специализированного программного обеспечения для работы с созданными аналого-цифровыми электронными модулями МР.

Реализация результатов

Разработанные в диссертации методики, модели аналоговых узлов, библиотеки структурных и схемотехнических решений, а также созданные электронные модули использовались при создании прототипа электронной системы обработки данных для многоканальной микрофонной решетки, что позволило снизить потребляемую мощность в 3-5 раз при одновременном формировании трех независимых диаграмм направленности.

Созданные электронные модули обработки данных дают возможность сформулировать требования и осуществить разработку следующей версии встраиваемых электронных модулей со структурой SiP (System in Package), либо SoC (System on Chip) в рамках САПР Cadence и Mentor Graphics.

Основные результаты диссертации использовались:

- при выполнении госбюджетной НИР №02-Г-003-013 «Создание математической модели для реконструкции трехмерного изображения с использованием быстродействующих нейросетей реального времени, изучение прототипов модулей для обработки данных», 2006г.,

- в учебном процессе при модернизации лекционного курса и лабораторных работ по курсу «Проектирование электронных систем» на кафедре Электроники МИФИ для групп А9-04, А9-05, И8-03.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Методика проектирования цифровых узлов реального времени, предназначенных для формирования диаграммы направленности с заданными характеристиками на основе созданных структурных и схмотехнических решений, а также параметризованных моделей.
2. Методика проектирования аналоговых узлов обработки данных в МР на основе созданных библиотечных решений, а также функциональных моделей узлов в САПР OrCAD.
3. Многоканальные электронные аналого-цифровые модули реального времени для обработки данных в МР, реализующий предложенный композиционный подход к компенсации фаз акустических сигналов.
4. Разработанные тестовые, диагностические и отладочные аппаратные и программные средства, а также частные методики экспериментального исследования характеристик многоканальных электронных систем обработки данных в МР.
5. Созданные модели узлов обработки акустических сигналов в МР, предназначенные для использования в рамках системы моделирования MathCAD.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Диссертация вместе с приложениями содержит 169 страниц печатного текста, в том числе 49 таблиц, 68 рисунков и библиографию, включающую 154 наименований.

В приложении 1 к диссертации предоставлены результаты анализа патентной документации США по современным МР.

В приложении 2 представлены результаты анализа научно-технической информации по современным МР.

Содержание диссертации

Во введении на основании проведенного анализа современного состояния и перспектив развития МР сформулированы основные требования к новому поколению встраиваемых и малогабаритных автономных систем, обладающих улучшенной совокупностью технико-экономических параметров, в первую очередь – низким энергопотреблением.

Обоснована цель работы, а также ее новизна, научная и практическая значимость.

В первой главе дан анализ структур применяемых в настоящее время многоканальных акустических систем. Выделены два класса систем обработки данных, предполагающих использование электронных и неэлектронных (физических) принципов обработки сигналов.

Рассмотрены основные классы задач обработки сигналов, решаемые электронными многоканальными системами обработки данных. Выделена

обобщенная структурная схема системы обработки данных, включающая многоканальную аналоговую часть и специализированный цифровой процессор. Выделены операции, предполагающие использование реального масштаба времени.

В табл.1 перечислены основные задачи, решаемые при использовании современных МР.

Таблица 1

Основные задачи, решаемые при использовании современных МР

№№ пп	Задачи, решаемые с помощью современных
1.	Слежение за перемещением источника акустического сигнала
2.	Определение направления на источники шума
3.	Распознавание источника речи
4.	Формирование диаграммы направленности с максимумом в направлении на источник полезной информации
5.	Формирование диаграммы направленности с минимумами в направлении источников помехи (шума)
6.	Улучшение отношения сигнал/шум за счет формирования диаграммы направленности заданного вида
7.	Улучшение отношения сигнал/шум за счет адаптивной фильтрации и учета спектральных особенностей источников полезного сигнала и источников шума

Анализ вычислительных операций, используемых при решении указанных задач позволил выделить наиболее трудоемкую процедуру, обычно выполняемую в реальном масштабе времени для всех данных во всех каналах обработки МР – процедура интерполяция. Достаточно часто для расчета новых значений в промежуточных точках используется интерполяционная формула

$$\text{Лагранжа: } Y(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_n)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)\dots(x_0-x_n)} y_0 + \frac{(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_n)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)\dots(x_0-x_n)} y_1 + \dots + \frac{(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_n)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)\dots(x_0-x_n)} y_n$$

где $Y(X)$ – новое рассчитываемое значение, X – новое значение координаты, X_1, X_2, \dots, X_n – значения координат в соответствии с частотой дискретизации аналогового сигнала, Y_0, Y_1, \dots, Y_n – известные значения сигнала, получаемые с помощью АЦП.

В табл.2 дана оценка требуемого быстродействия электронной системы МР (в скобках приведены данные при осуществлении операции деления за несколько тактов), обслуживающей число каналов N (10-10000) для различных структур МР – одномерной (1D), двумерной (2D) и трехмерной (3D), при формировании одного лепестка диаграммы направленности для заданного направления. Увеличение размерности МР приводит к увеличению операций интерполяции – в два раза для двумерной 2D МР по отношению к одномерной 1D МР и соответственно в три раза для трехмерной 3D по сравнению с

одномерной 1D МР. Оценки даны при использовании частоты дискретизации $F_0=44.5\text{кГц}$.

Таблица 2

Оценка требуемого быстродействия электронной системы МР

МР	Общее число каналов МР - N			
	10	100	1000	10 000
1D	$34 \cdot 10^6$ ($85 \cdot 10^6$)	$34 \cdot 10^7$ ($85 \cdot 10^7$)	$34 \cdot 10^8$ ($85 \cdot 10^8$)	$34 \cdot 10^9$ ($85 \cdot 10^9$)
2D	$68 \cdot 10^6$ ($170 \cdot 10^6$)	$68 \cdot 10^7$ ($170 \cdot 10^7$)	$68 \cdot 10^8$ ($170 \cdot 10^8$)	$68 \cdot 10^9$ ($170 \cdot 10^9$)
3D	$102 \cdot 10^6$ ($255 \cdot 10^6$)	$102 \cdot 10^7$ ($255 \cdot 10^7$)	$102 \cdot 10^8$ ($255 \cdot 10^8$)	$102 \cdot 10^9$ ($255 \cdot 10^9$)

Полученные значения показывают, что даже для сравнительно небольших МР, содержащих $N=10$ каналов обработки и работающих в одномерном режиме 1D, число операций составляет порядка 24 (86) миллионов в секунду для формирования только одного лепестка диаграммы направленности с заданными параметрами.

В этой связи предлагаемый в данной работе подход, ориентированный на композиционную аналого-цифровую реализацию элементов компенсации разницы фаз в МР, является актуальным, так как дает возможность существенно снизить требования к вычислительным ресурсам, а также позволяет снизить энергопотребление всей системы, что имеет особое значение для встраиваемых автономных приложений.

Наибольший выигрыш предлагаемый подход позволяет получить при создании специализированной аналого-цифровой микросхемы, дающей возможность реализовать многоканальные цепи изменения фазы аналоговых сигналов.

Во второй главе рассмотрена сущность предлагаемого композиционного аналого-цифрового подхода к построению многоканальных систем компенсации временных задержек в МР. Представлена обобщенная структурная схема электронной системы обработки данных в МР, реализующая композиционный подход.

Дано математическое обоснование идентичности функций, выполняемых аналоговыми и цифровыми узлами компенсации фаз при создании электронной системы обработки МР различных классов.

Дана классификация конструкций одномерных 1D, двумерных 2D и трехмерных 3D МР. Обосновывается возможность создания унифицированных электронных модулей реального времени, предназначенных для построения многоканальных электронных систем обработки.

Сущность предлагаемого в работе композиционного подхода заключается в использовании аналоговых и цифровых компонент для реализации функций компенсации фазы. При этом узел компенсации фаз в каждом из каналов МР содержит две составляющие - аналоговую и цифровую, предназначенные соответственно для:

- компенсации дробной части фазового сдвига в данном канале,
- компенсации целой части фазового сдвига в канале.

Под целой и дробной частями фазового сдвига понимаются соответственно целая и дробная части временной задержки, нормированной на период дискретизации.

На рис.1 представлена обобщенная структурная схема многоканальной электронной системы обработки данных МР, реализующая данный подход. На рис.1 используются обозначения: M_1, M_2, \dots, M_N – микрофоны МР, $U_{\text{вых}}$ – выходной цифровой сигнал электронной системы.

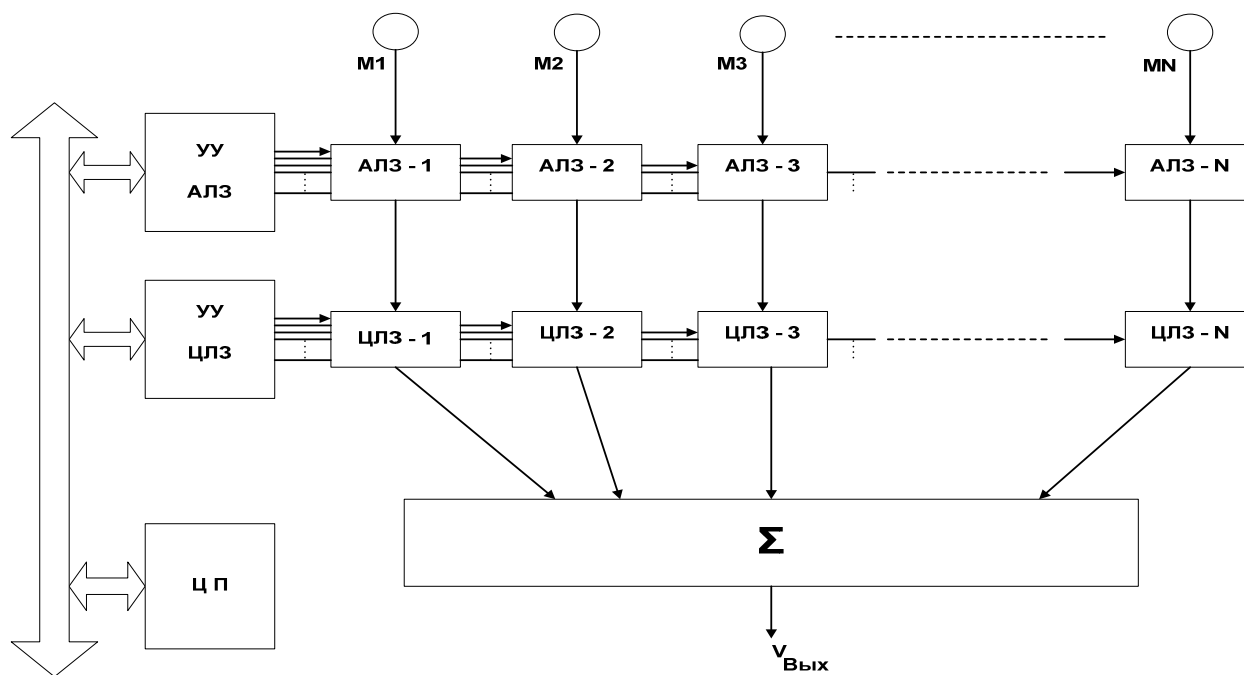


Рис.1. Обобщенная структура электронной системы обработки данных

Многоканальная электронная система содержит следующие основные функциональные блоки: АЛЗ-1, АЛЗ-2, АЛЗ-3, ..., АЛЗ-N – аналоговые фрагменты линии задержки соответственно в каналах обработки микрофонов $M_1, M_2, M_3, \dots, M_N$; ЦЛЗ-1, ЦЛЗ-2, ЦЛЗ-3, ..., ЦЛЗ-N – цифровые компоненты линии задержки соответственно в каналах обработки микрофонов $M_1, M_2, M_3, \dots, M_N$; УУ АЛЗ – устройство управления аналоговыми линиями задержки; УУ ЦЛЗ – устройство управления цифровыми линиями задержки; ЦП – центральный процессорный узел, формирующий управляющие сигналы для аналоговых и цифровых линий задержки; Σ – цифровой сумматор сигналов.

Проведенный анализ патентной документации, а также научно-технической информации позволили выделить следующие классы одномерных 1D, двумерных 2D и трехмерных 3D МР, отличающихся способами расположения микрофонов: равномерное с одинаковым шагом расположения микрофонов в МР; регулярное, предполагающее наличие нескольких субрешеток с различными шагами расположения микрофонов; нерегулярное, предполагающее расположение микрофонов с произвольными шагами.

В табл.3 представлены выделенные классы одномерных 1D, двумерных 2D и трехмерных 3D МР (N, M, L – соответственно число микрофонов по оси X, Y и Z).

Таблица 3

Выделенные классы одномерных 1D, двумерных 2D и трехмерных 3D МР

Размерность	№	Расположения микрофонов	Код классификации	Число микрофонов
1D	1	Равномерное	1D - 1	1D - 1-N
	2	Регулярное	1D - 2	1D - 2-N
	3	Нерегулярное	1D - 3	1D - 3-N
2D	1	Равномерное	2D - 1	2D - 1-N-M
	2	Регулярное	2D - 2	2D - 2-N-M
	3	Нерегулярное	2D - 3	2D - 3-N-M
	4	Квазилинейное	2D - 4	2D - 4-N-M
3D	1	Равномерное	3D - 1	3D - 1-N-M-L
	2	Регулярное	3D - 2	3D - 2-N-M-L
	3	Нерегулярное	3D - 3	3D - 3-N-M-L

На рис.2 представлен пример нерегулярной МР класса 1D-3-N.

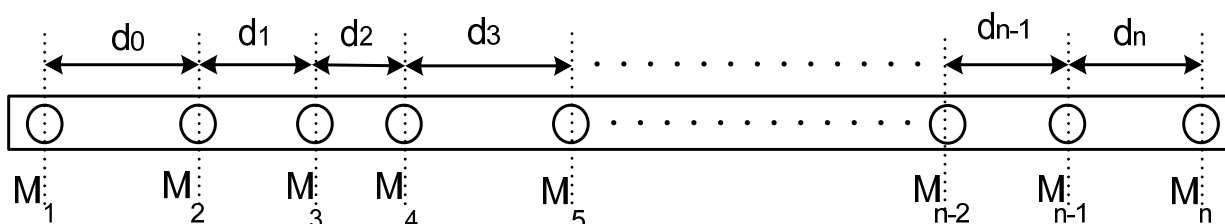


Рис.2. Пример нерегулярной МР класса 1D – 3-N

На рис.3 представлен пример нерегулярной МР класса 2D-4-N-M.

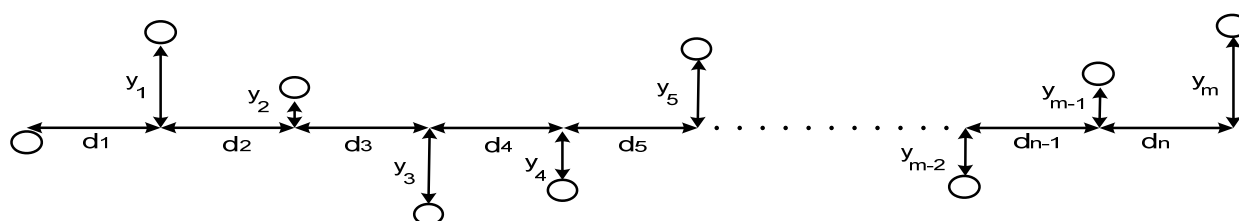


Рис.3. Пример квазилинейной МР класса 2D-4-N-M

Для выделенных классов МР в работе получены аналитические выражения для расчета разницы хода акустических сигналов ($(\Delta L_i(Q))$, $\Delta L_{ij}(Q, \gamma)$, $\Delta L_{ijk}(Q, \gamma)$) для каждого из микрофонов решетки для вариантов ее построения – соответственно 1D, 2D и 3D:

$$\Delta L_i(Q) = R \cdot \cos Q \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{1}{R \cos Q} \left(\sum_{k=1}^i d_k - \frac{LR}{2} - R \cdot \sin Q \right)^2} - 1 \right),$$

$$\Delta L_{ij}(Q, \gamma) = F4(i, j, R_0, Q, \gamma),$$

$$\Delta L_{ijk}(Q, \gamma) = F6(i, j, R_0, Q, \gamma),$$

где i, j, k – соответственно номер микрофона для 1D, 2D и 3D МР, R_0 – расстояние от центра МР до источника сигнала, LR - линейный размер 1D МР, Q, γ – углы, определяющие направление на источник сигнала в полярных координатах, $F4, F6$ – аналитические выражения.

Указанные выражения были использованы для определения целой и дробной частей фазы для выделенных классов 1D, 2D и 3D МР, которые, например, для случая 1D МР составляют соответственно:

$$N_u(Q) = \left[\frac{\Delta T_i(Q)}{\Delta t_{F_0}} \right] \text{ и } N_D(Q) = \frac{\Delta T_i(Q)}{\Delta t_{F_0}} - N_u(Q),$$

где $\Delta t_{F_0} = \frac{1}{F_0}$ - временной интервал (F_0 - частота дискретизации).

В работе осуществлен расчет диапазонов возможных значений для целой и дробной частей фазы для перспективных конструкций МР. В частности показано, что использование только целой части фазы приводит к ступенчатому изменению положения лепестка в диаграмме направленности МР, что недопустимо с точки зрения устойчивости работы применяемых алгоритмов адаптивной фильтрации и слежения за источником сигнала.

В табл.4 показаны значения для шага изменения положения лепестка диаграммы направленности (в градусах) для различных конструкций МР.

Таблица 4

Возможный шаг изменения направления луча диаграммы направленности

F_0 , кГц	Шаг расположения микрофонов в МР (d_0)					
	2 см	4см	8см	16см	32см	64см
3	510	255	127,5	63,75	31,875	15,9375
5,5	278,1818	139,09	69,5454	34,7727	17,3863	8,6931
11,05	138,4615	69,2307	34,6153	17,3076	8,6538	4,3269
22,1	69,2307	34,6153	17,3076	8,6538	4,3269	2,1634
44,2	34,6153	17,3076	8,6538	4,3269	2,1634	1,0817
88,4	17,3076	8,6538	4,3269	2,1634	1,0817	0,5408
177	8,6440	4,3220	2,1610	1,0805	0,5402	0,2701
354	4,3220	2,1610	1,0805	0,5402	0,2701	0,1350

Из приведенных значений видно, что при использовании только целой части фазы МР с шагом расположения микрофонов $d_0 = 8$ см и при $F_0 = 44,2$ кГц

электронная система может обеспечить формирование диаграммы направленности с шагом изменения направления на источник полезного сигнала в 8,6538 градусов, что принципиально недостаточно для устойчивой работы как алгоритмов слежения за перемещением источника сигнала, так и алгоритмов адаптивной фильтрации, требующих возможности непрерывного изменения направления лепестков синтезируемой диаграммы направленности. Это обуславливает необходимость использования аналоговых узлов компенсации фазы.

В третьей главе представлены результаты разработки структурных и схемотехнических решений для построения аналоговых и цифровых узлов компенсации разницы фаз на основе предложенного подхода. Рассмотрены особенности построения электронной системы компенсации с учетом использования модулей АЦП. Предложены структурные решения для реализации аналоговой и цифровой частей узлов компенсации. Рассмотрены методики проектирования аналоговой и цифровой частей на основе созданных структурных решений в зависимости от класса используемой МР.

Сформулированы рекомендации к создаваемым унифицированным аналого-цифровым модулям, предназначенным для построения многоканальных систем обработки данных в современных МР реального времени.

На рис.4 показана разработанная структурная схема, предназначенная для реализации композиционного подхода для одномерных 1D МР.

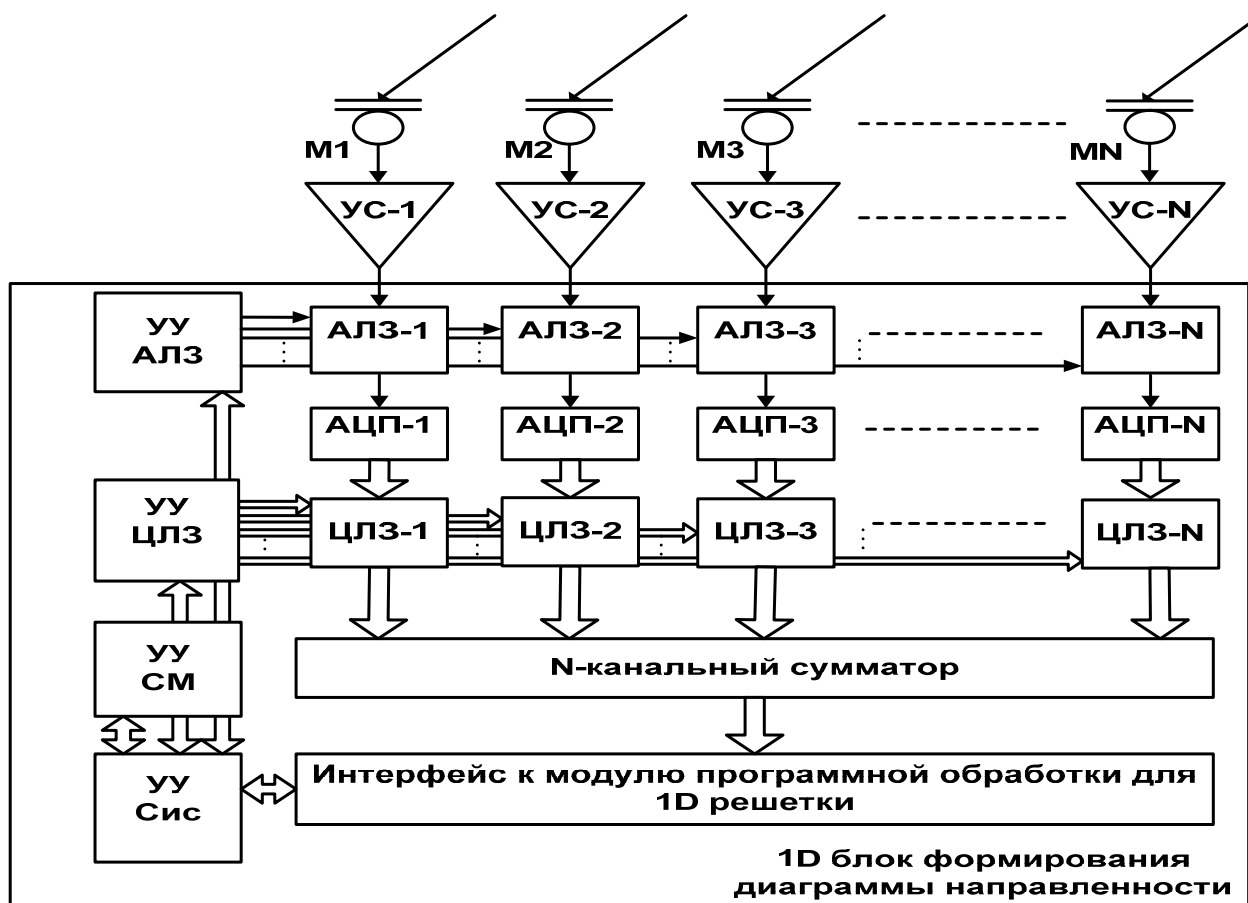


Рис.4. Разработанная структурная схема для одномерных 1D МР

На рис.4 используются следующие обозначения: M_1, \dots, M_N - микрофоны M_P , $УС-1, \dots, УС-N$ - предварительные усилители, $АЛЗ-1, \dots, АЛЗ-N$ - узлы аналоговой задержки, $АЦП-1, \dots, АЦП-N$ - блоки АЦП, $ЦЛЗ-1, \dots, ЦЛЗ-N$ - узлы цифровой задержки, $УУАЛЗ$ - устройство управления блоками АЛЗ, $УУЦЛЗ$ - устройство управления ЦЛЗ, $УУСМ$ - устройство управления submodule аналоговых и цифровых задержек, $УУСис$ - общее устройство управления, осуществляющее расчет дробной и целой части задержек исходя из заданных координат объекта. Показанная структурная схема предполагает использование одного набора аналоговых и цифровых узлов компенсации фаз, что дает возможность реализовать формирование одной диаграммы направленности с заданными характеристиками.

На рис.5 показана разработанная структурная схема электронной системы обработки, ориентированная на одновременный синтез в реальном масштабе времени нескольких независимых диаграмм направленности.

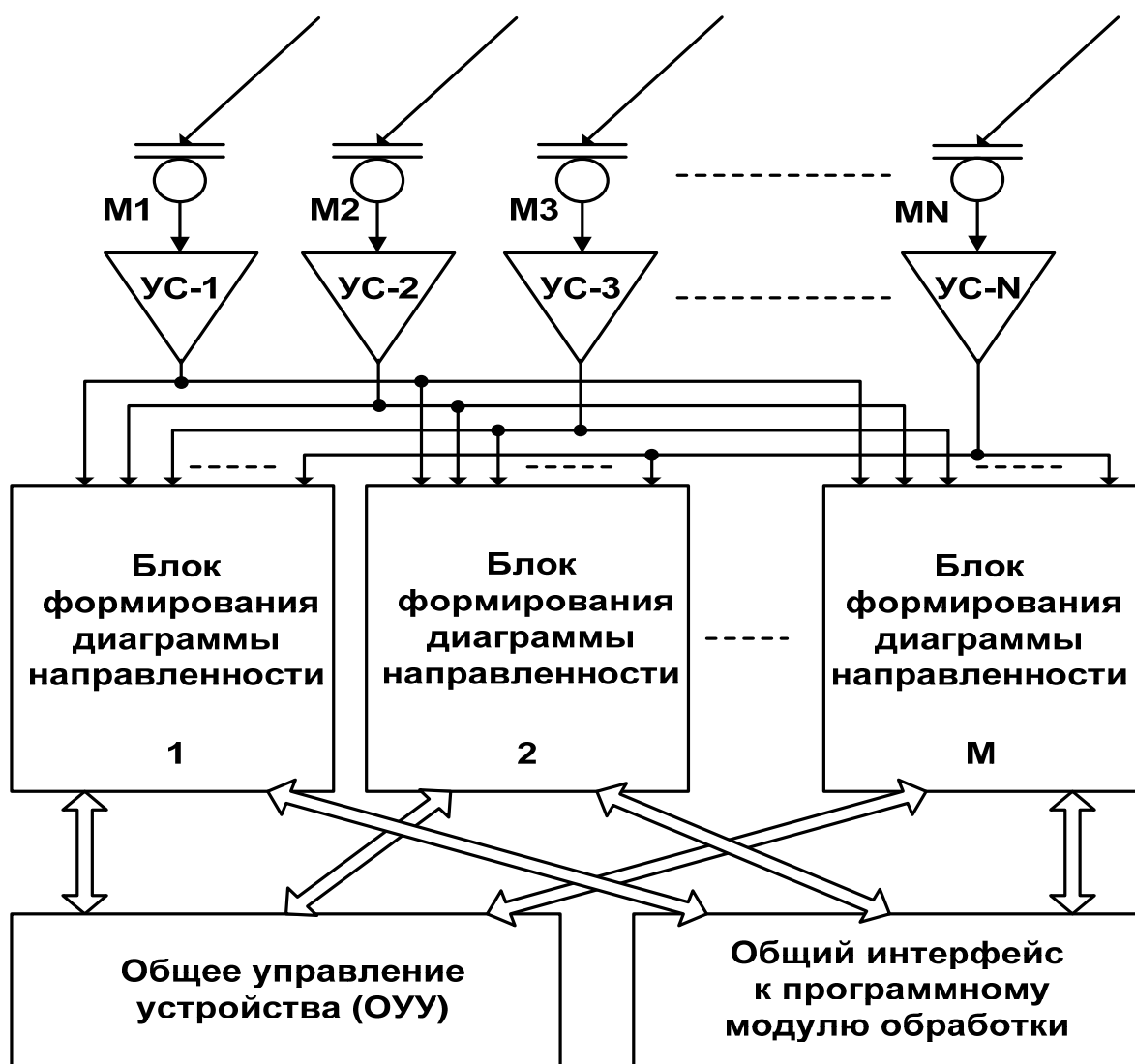


Рис.5. Разработанная структурная схема для синтеза в реальном масштабе времени нескольких независимых диаграмм направленности

Принцип работы электронной системы, реализующей данную структурную схему, заключается в независимой обработке сигналов, поступающих от микрофонов для одновременного формирования заданного числа диаграмм направленности. На практике общее число одновременно формируемых диаграмм направленности не превышает 5-10 градусов. типичным примером является одновременное формирование трех диаграмм направленности в задачах слежения за перемещением объекта. На рис.6 показан пример для случая формирования трех независимых диаграмм направленности (M_1, M_2, \dots, M_N – микрофоны МР, R – расстояние до источника акустического сигнала). $\Delta\varphi$ – угол между направлением на источник сигнала и вспомогательными направлениями, используемымися для слежения за перемещающимся источником сигнала. Как правило, значения этого угла лежат в пределах 5-10 градусов.

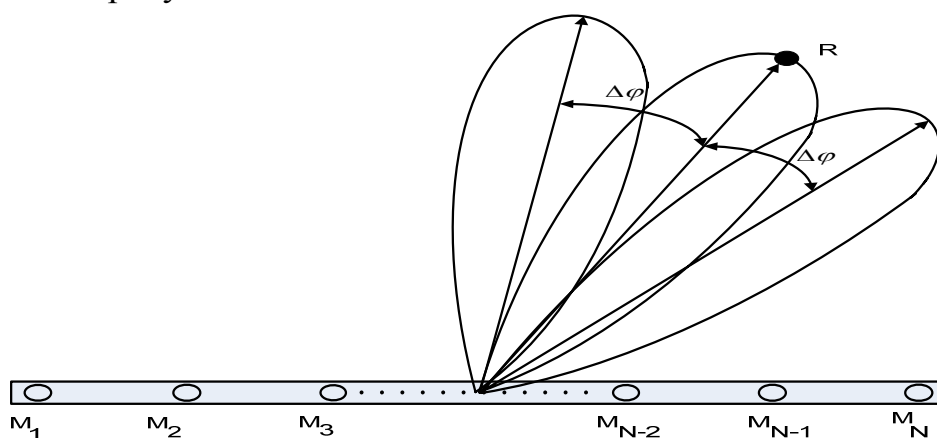


Рис.6. Пример формирования трех независимых диаграмм направленности

Реализация данной структурной схемы на практике предполагает использование ПЛИС для реализации основных узлов цифровой обработки, а также специализированного цифрового процессора, основными функциями которого являются:

- расчет новых значений параметров управления цифровыми и аналоговыми узлами компенсации фаз для формирования новых диаграмм направленности,
- контроль за предельными значениями параметров управления аналоговыми и цифровыми узлами компенсации фаз,
- контроль за устойчивостью процесса управления.

Наиболее эффективными решениями данных задач точки зрения экономичности и габаритов исполнения следует считать:

- сигнальные процессоры семейства ADSP2106X, ADSP2116X,
- ядра сигнальной обработки, проинтегрированные в составе современных ПЛИС со структурой SOC (System on Chip) – Xilinx Virtex Pro,
- стандартные микроконтроллеры при небольших размерностях МР.

С точки зрения габаритов всей электронной системы наиболее предпочтительным вариантом является использование ПЛИС со структурой SOC, что позволяет в одной микросхеме реализовать как необходимое

микропрограммное управление, так и цифровые узлы коррекции фаз в составе многоканальной электронной системы обработки данных МР.

В третьей главе представлены разработанные структурные схемы, позволяющие реализовать композиционный подход для 2D и 3D МР. Например, на рис.7 представлена разработанная структурная схема электронного блока обработки, предназначенного для использования с 2D МР.

Изменение параметров диаграммы направленности осуществляется на основе перепрограммирования аналоговых и цифровых узлов компенсации фаз, для чего используются соответствующие блоки управления УУАЛЗ и УУЦЛЗ, а также общее устройство управления УУСис, блок управления синхронизацией УУСМ и системный интерфейс.

Структурная схема имеет модульный принцип построения, ориентированный на использование унифицированных многоканальных электронных модулей, осуществляющих аналоговую и цифровую компенсацию фаз одновременно для всех каналов одного ряда – соответственно АЛЗL1,..., АЛЗLk и ЦЛЗL1,..., ЦЛЗLk применительно к последнему ряду с номером L матрицы микрофонов.

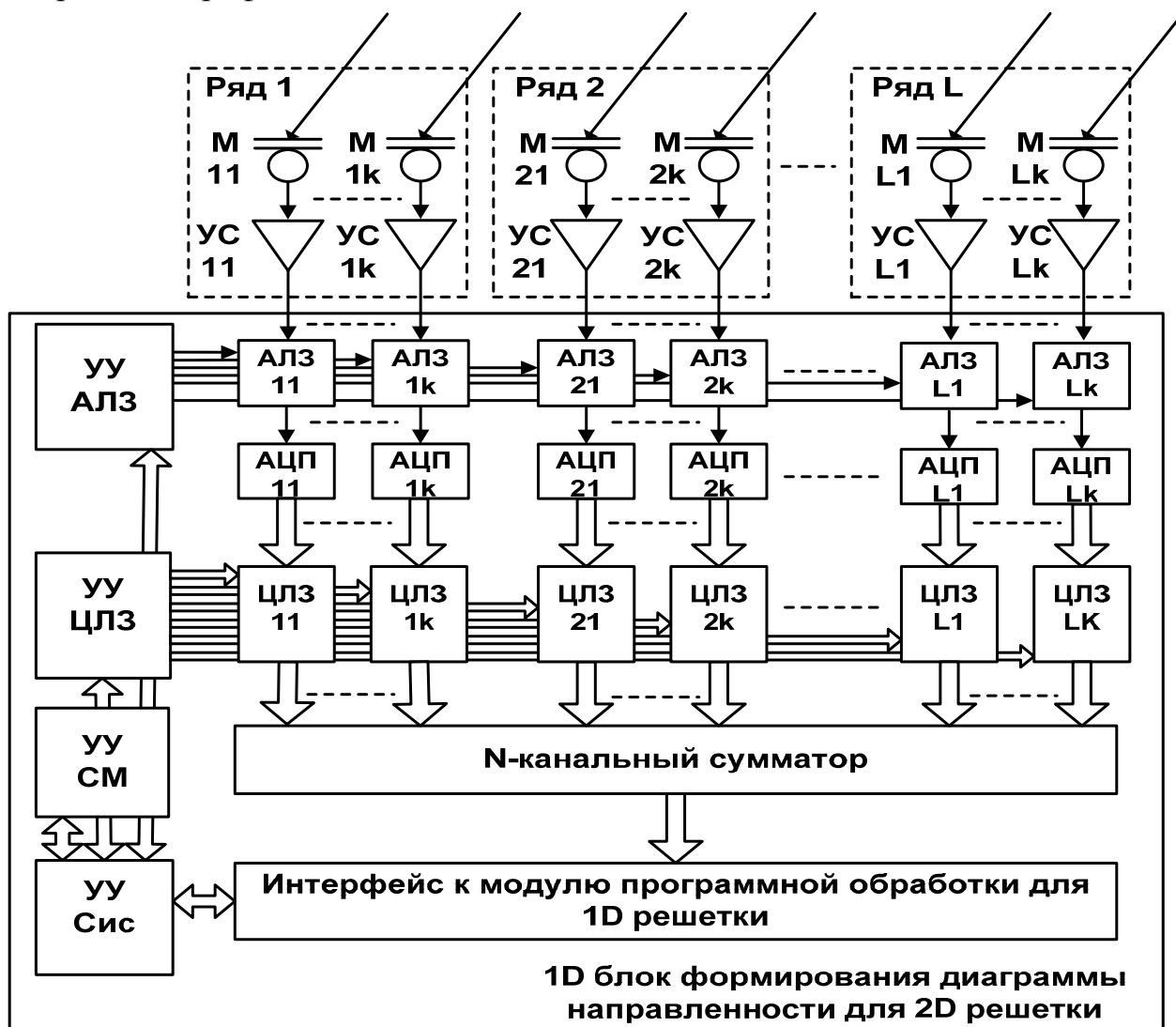


Рис.7. Разработанная структурная схема электронного блока обработки, предназначенного для использования с 2D МР

В третьей главе также представлены разработанные параметризованные решения для построения узлов аналоговой и цифровой обработки. На рис.8 представлена структурная схема цифрового узла компенсации целой части значения фазы, предназначенного для обработки данных в нескольких каналах. Узел реализован на основе одного сдвигового регистра на многоразрядных триггерах DD1, ..., DDN. Устройство управления УУТЗ осуществляет выбор необходимой цифровой задержки, которая измеряется в тактах частоты синхронизации CLK. В качестве сигнала CLK обычно используется значение частоты дискретизации F_0 .

Основными параметрами данного решения являются: число выходов L, максимальная длина сдвига K, разрядность входной шины данных D.

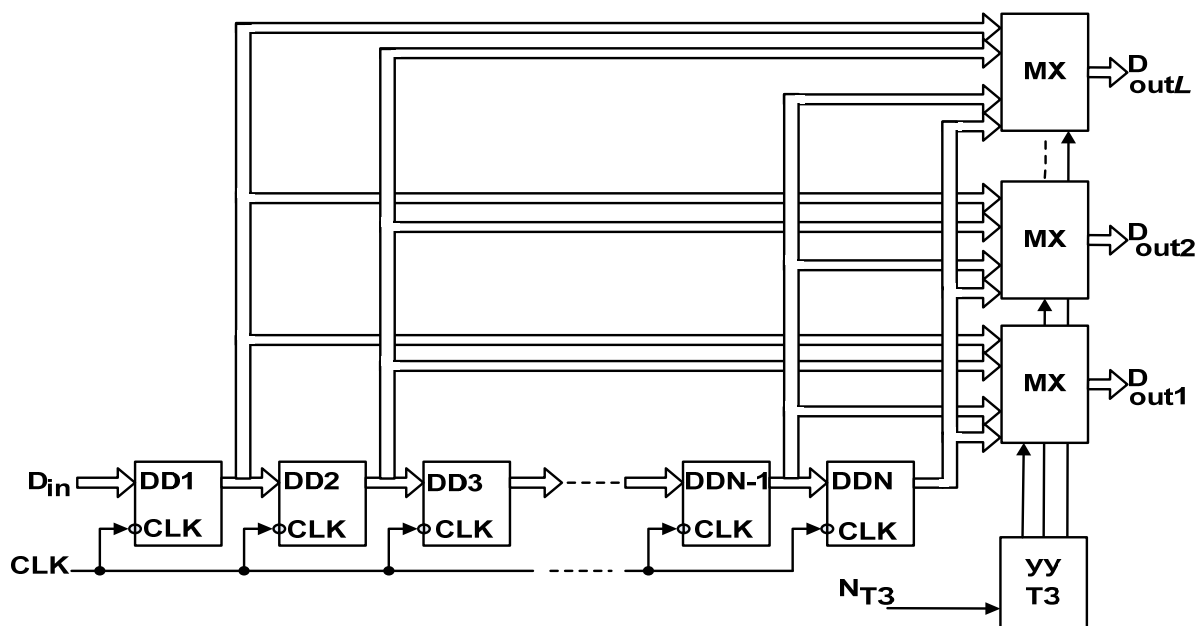


Рис.8. Структурная схема цифрового узла

На рис.9 представлена структурная схема цифрового узла компенсации целой части значения фазы на основе ОЗУ. Областью применения данного цифрового узла компенсации являются электронные системы МР, формирующие одну диаграмму направленности. Узел предполагает использование блока ОЗУ для хранения данных в режиме кольцевого регистра. Формирование адресов для записи и чтения данных осуществляется с помощью устройства управления УУ. Использование данного варианта реализации узла целесообразно при достаточно больших значениях параметра TN (максимальная задержка в тактах). Для ряда применений целесообразно использовать данный вариант построения узла начиная со значений $TN=128$.

Аналогичные параметризованные модели разработаны и для аналоговых узлов компенсации фазы. На рис.10 представлена структурная схема аналогового узла компенсации дробной части значения фазы, реализованного на основе RC линии задержки первого порядка.

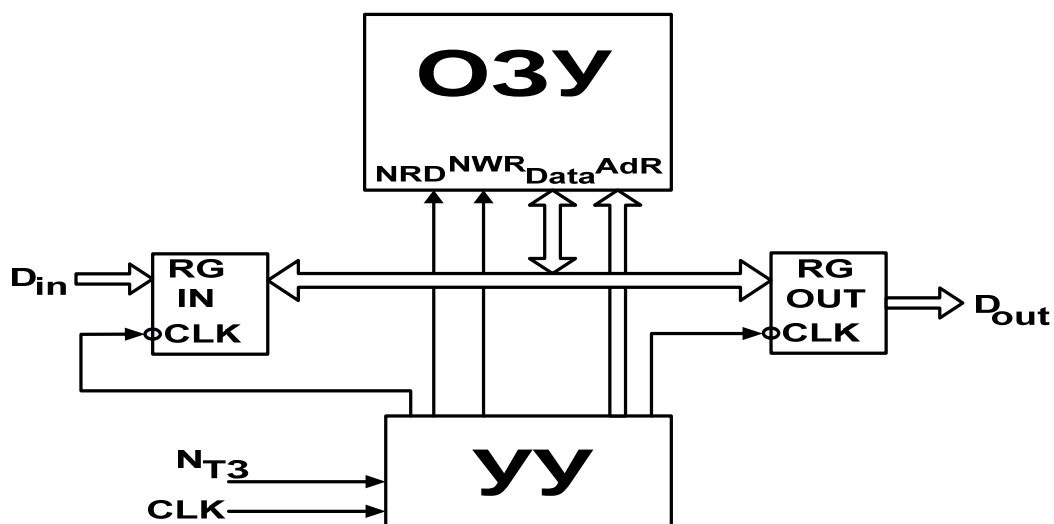


Рис.9. Структурная схема цифрового узла компенсации фазы

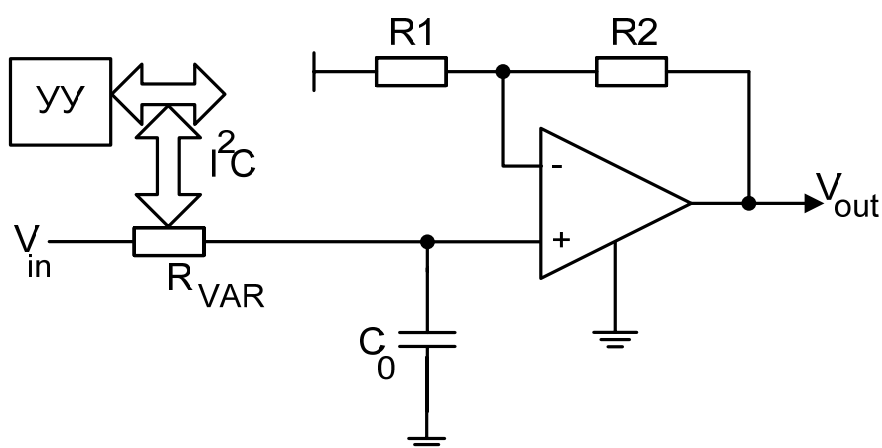


Рис.10. Структурная схема аналогового узла компенсации фазы

Для изменения величины задержки используется резистор с программируемой величиной сопротивления, например, выпускаемый фирмой Analog Devices. Операционный усилитель используется для сохранения требуемого коэффициента передачи (задается отношением сопротивлений $R1$ и $R2$).

Проведенный анализ выпускаемых в настоящее время специализированных АЦП, ориентированных на использование в акустических системах, позволил выделить обобщенную структуру таких устройств, представленную на рис.11.

Основными функциональными узлами данного класса АЦП являются:

- входные микрофонные усилители с дифференциальными входами, что расширяет функциональные возможности их использования,
- входной аналоговый мультиплексор, позволяющий обрабатывать входные сигналы непосредственно с узлов аналоговой компенсации фаз,
- программируемый усилитель с цифровым интерфейсом,

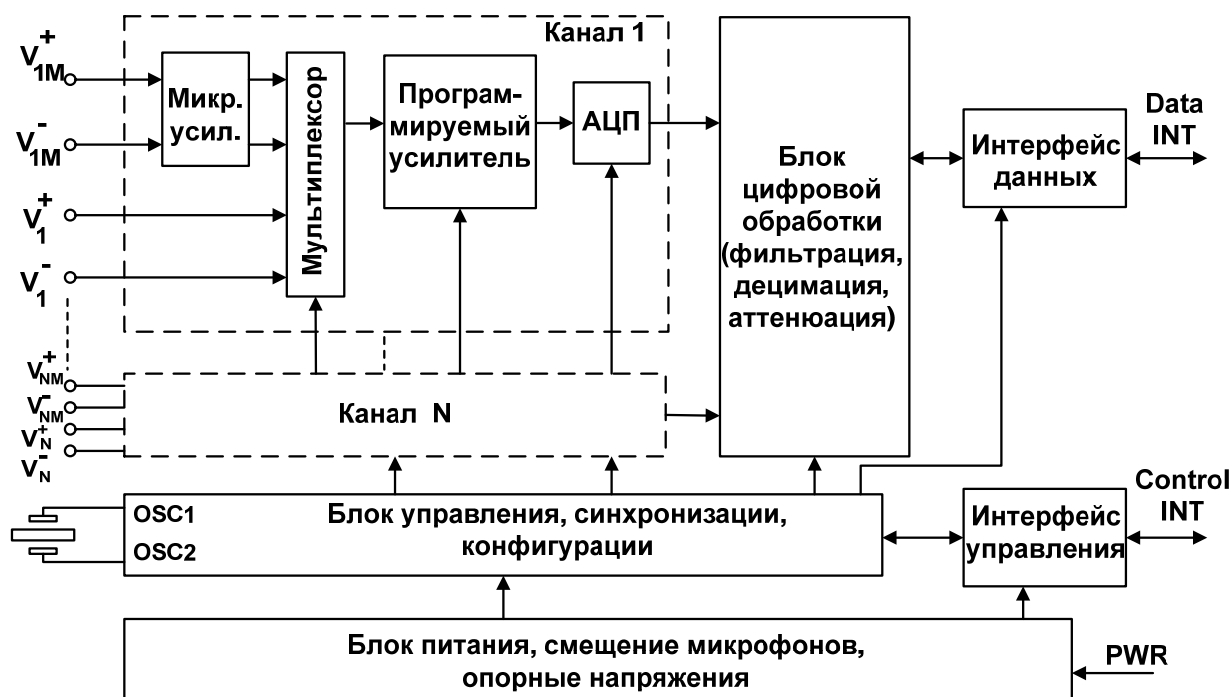


Рис.11. Обобщенная структура АЦП, ориентированных на многоканальные применения

- блок АЦП для каждого из обрабатываемых каналов,
- блок цифровой обработки (децимация, фильтрация),
- блок управления, синхронизации и конфигурации, осуществляющий общее управление всеми функциональными узлами системы,
- блок задания аналогового и цифрового питания, предназначенного также для формирования опорных напряжений для блоков АЦП, питания микрофонов,
- блок интерфейса для осуществления операций чтения данных из АЦП,
- блок управляющего интерфейса, предназначенного для независимого тестирования и конфигурации системы в процессе работы.

Проведенный анализ выпускаемых АЦП позволил выделить ведущих производителей - PCM (Texas Instruments) и CS (Cirrus Logic). По совокупности технических параметров наиболее перспективными для использования во встраиваемых переносных приложениях следует считать 24-разрядные АЦП CS53L32 и CS5368.

На рис.12 показана последовательность решаемых задач в соответствии с разработанной методикой проектирования на основе использования библиотечного набора цифровых моделей.

Основными решаемыми задачами являются:

1. Выбор структурной схемы реализации цифрового узла компенсации фаз в соответствии с параметрами МР. Для решения данной задачи используется созданный библиотечный набор структурных решений для цифровых узлов, формирующих одну, либо несколько независимых диаграмм направленности. Выбор оптимальной структуры осуществляется на основе разработанных таблиц соответствия.

2. Определение способа реализации цифрового узла задержки в зависимости от числа используемых каналов, требуемых максимальных значений цифровой задержки в тактах частоты дискретизации. Для решения данной задачи предлагается использовать таблицы с рекомендованными способами реализации цифрового узла в зависимости от параметров МР.

3. Определение характеристик цифровых узлов в соответствии с параметрами МР. На этом этапе осуществляется сопряжение выбранной общей структурной схемы построения цифрового узла, выбранного на основе имеющейся библиотеки решений, с конкретным вариантом реализации узла.

4. Синтез принципиальной схемы устройства в соответствии с выбранной структурой в системе OrCAD на основе имеющейся библиотеки разработанных параметризованных моделей.

5. Получение параметров узла по результатам моделирования. Подготовка кода для реализации на основе ПЛИС.

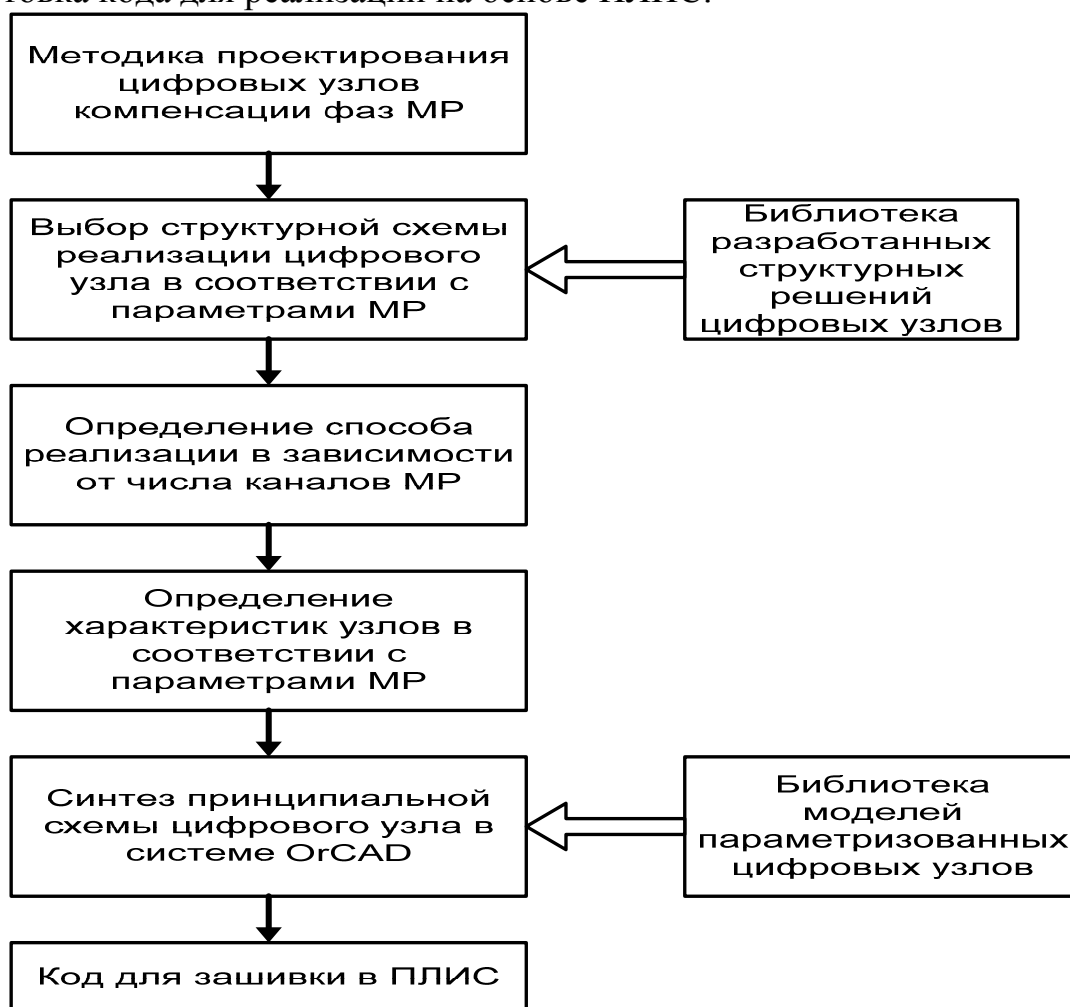


Рис.12. Методика проектирования цифровых узлов компенсации фаз

Данная методика позволяет сократить время и трудоемкость проектирования цифровых узлов электронных блоков реального времени, ориентированных на применение в составе систем обработки МР [11-13]. Методика была апробирована при проектировании ряда цифровых узлов на основе ПЛИС Altera и Xilinx.

Основными задачами, решаемыми в соответствии с разработанной методикой проектирования аналоговых узлов (рис.13), являются:

1. Выбор структурной схемы реализации аналогового узла компенсации фаз из имеющихся в библиотечном наборе.

2. Выбор способа реализации в зависимости от числа используемых каналов. На этом этапе решается вопрос о целесообразности применения дискретных компонентов, либо использования аналоговых ПЛИС, либо формулируются требования к полностью заказной БИС.

3. Определение характеристик узлов с помощью программы моделирования. В качестве программы моделирования предполагается использование системы OrCAD.

4. Оценка полученных характеристик узла, включая энергопотребление и габариты. Проверка на соответствие системным требованиям. В случае несоответствия повторение этапа проектирования для альтернативных вариантов реализации аналогового узла, либо при изменении параметров одного и того же узла.

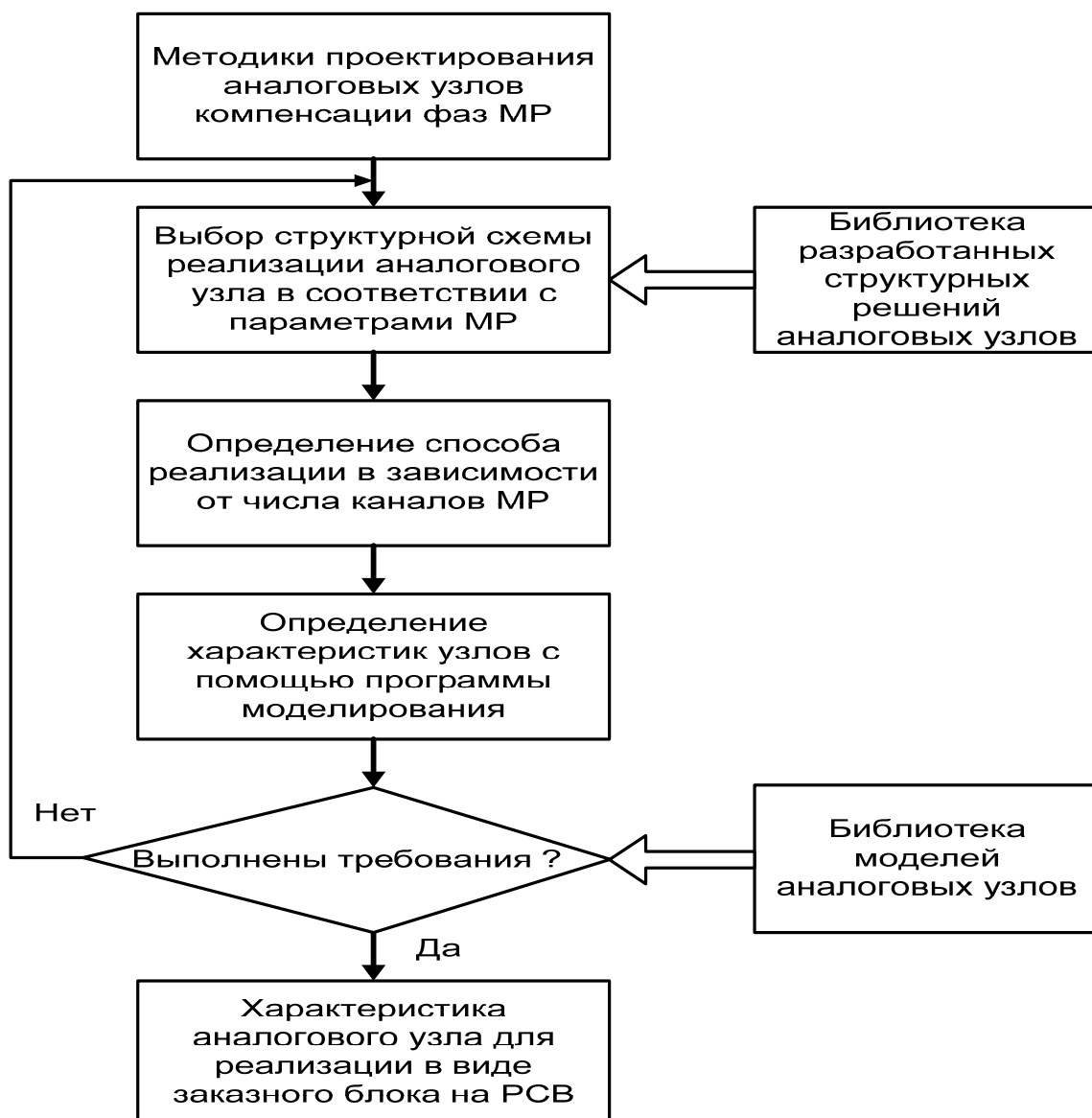


Рис.13. Методика проектирования аналоговых узлов

5. Результатом проектирования аналогового узла компенсации фазы является принципиальная схема на основе дискретных компонентов, либо программа зашивки аналоговой ПЛИС. В случае необходимости массового производства акустических систем формулируются исходные системные требования к разрабатываемой заказной БИС.

Данная методика позволяет сократить время и трудоемкость проектирования аналоговых узлов электронных блоков реального времени, ориентированных на применение в составе систем обработки МР [11-13].

Методика была апробирована при проектировании ряда аналоговых узлов на основе дискретных компонентов.

В четвертой главе представлены результаты проектирования и разработки экспериментальных лабораторных образцов аналого-цифровых модулей обработки данных в МР на основе композиционного подхода к компенсации фаз в акустических сигналах.

Представлены результаты разработки специализированного компьютерного стенда, предназначенного для измерения АЧХ каналов МР в лабораторных условиях.

Представлены результаты разработки 128-канального фрагмента системы обработки данных, ориентированного на мобильные применения в геологоразведке.

На рис.14 показан внешний вид разработанного модуля со стороны 16-канальной аналого-цифровой обработки.



Рис.14. Внешний вид 16-канального модуля

Модуль предназначен для параллельной независимой обработки в реальном масштабе времени 16 аналоговых каналов акустической информации и может быть использована как в составе макетов по обработке данных от МР в реальном масштабе времени, так и в составе многоканальных встраиваемых

устройств. Основными функциональными узлами модуля являются: 16-канальный аналоговый входной узел, включающий в себя входные усилители, аналоговые узлы компенсации фаз; 16-канальный модуль АЦП; блок статической буферной памяти; интерфейсный блок на основе ПЛИС Altera. На рис.15 показана структурная схема 16-канального цифрового узла модуля.

ОБЩАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА 16-КАНАЛЬНОГО АДС

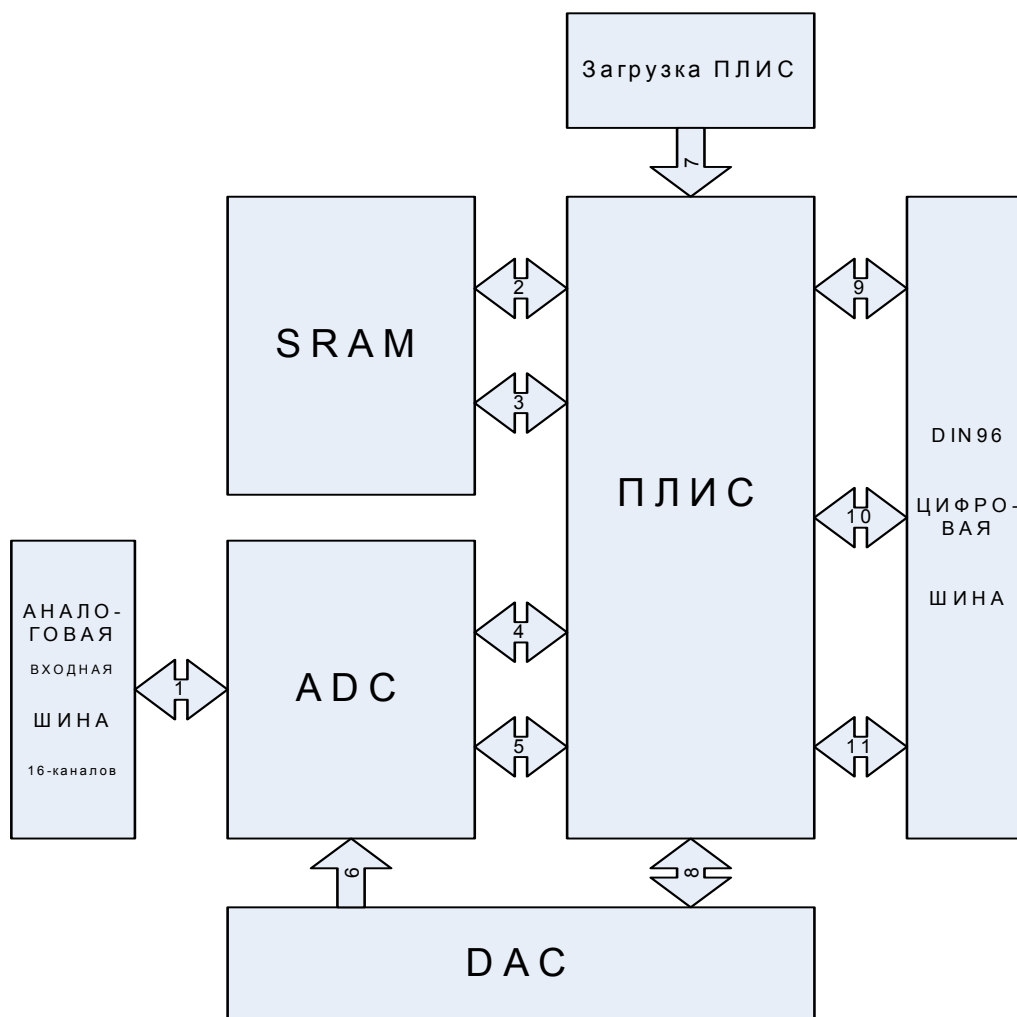


Рис.15. Структурная схема 16-канального цифрового узла

Разработанный модуль цифровой обработки предназначен для реализации алгоритмов формирования луча и слежения за источником звука, цифровой фильтрации в пространственной и частотной областях в реальном масштабе времени. Общая структурная схема модуля цифровой обработки представлена на рис.16. Основными узлами модуля являются: цифровой сигнальный процессор ADSP2106х; программируемый интерфейс на ПЛИС типа FPGA XILINX; блок статической памяти SRAM; блок загрузки.

Для реализации цифровых шин и протоколов обмена по ним используется ПЛИС фирмы XILINX XCV300E BGA432. Возможна установка на плате других ПЛИС этой серии (432 BGA)- XCV400E, XCV600E, XCV1000E. На рис.17 представлен внешний вид модуля.

Проведенные экспериментальные исследования разработанных аналоговых и цифровых модулей реального времени, предназначенных для построения многоканальных систем обработки данных в МР на основе композиционного подхода к компенсации фаз, подтвердили эффективность их использования и возможность снижения потребляемой мощности до 3-5 раз, что обуславливает их использование во встраиваемых и переносных системах.

ОБЩАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА
ПЛАТЫ DSP

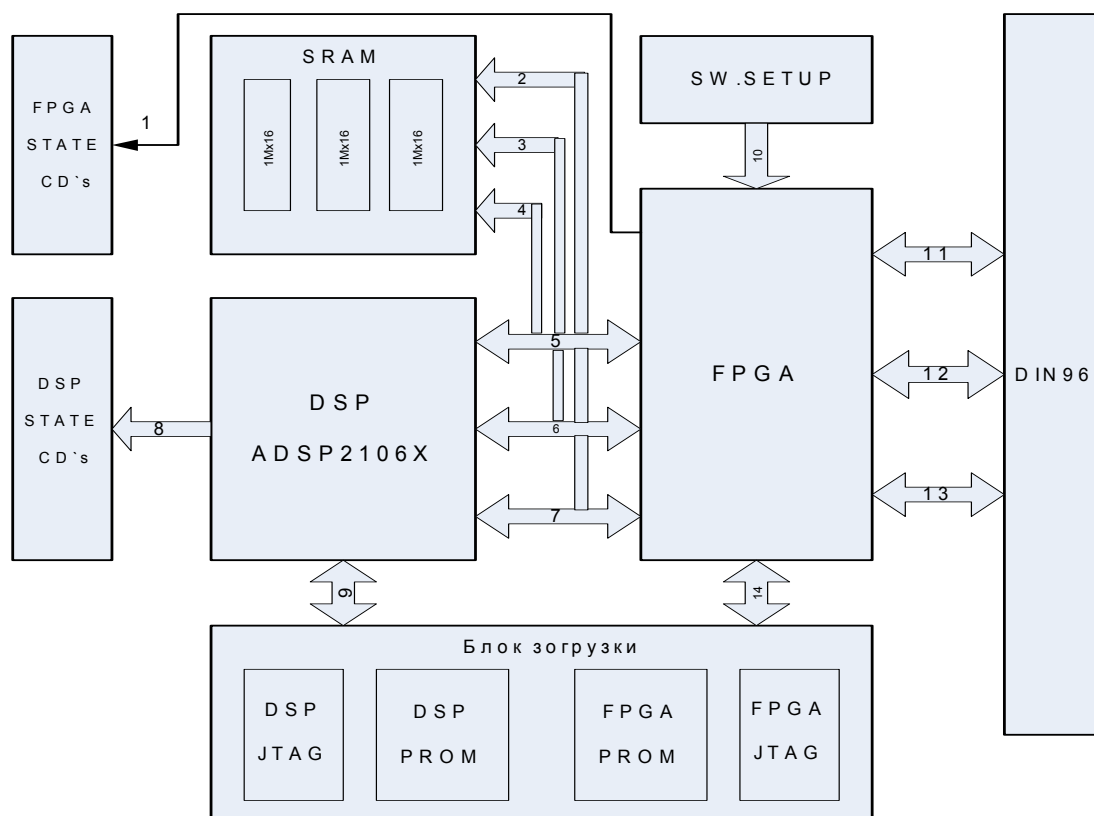


Рис.16. Структурная схема модуля цифровой обработки



Рис.17. Внешний вид модуля сигнальной обработки

В пятой главе представлены результаты экспериментального исследования характеристик разработанных аналого-цифровых модулей, таких, как равномерность АЧХ каналов, уровень межканальной развязки, имеющих принципиальное значение при создании многоканальной электронной системы обработки с широким динамическим диапазоном.

Представлены результаты моделирования диаграмм направленности МР, реализующих композиционный подход к компенсации фаз, на основе системы моделирования MathCAD.

Проведенные экспериментальные исследования характеристик разработанных аналого-цифровых модулей подтвердили возможность их эффективного использования в фазированных системах обработки. Так, равномерность АЧХ каналов составила величину порядка 10%, а уровень межканальной развязки - 60дБ.

Основные выводы и результаты

Основным результатом проведенных исследований является развитие методов проектирования, разработка типовых структурных и схмотехнических решений, обеспечивающих создание высокопроизводительных электронных узлов многоканальной системы сбора и обработки данных для одномерных, двумерных и трехмерных акустических фазированных решеток для встраиваемых применений с пониженным значением параметра «энергопотребление - производительность», а также создание и исследование конкретных реализаций многоканальных систем обработки на основе композиционного подхода.

К основным научным результатам работы следует отнести следующие:.

1. Предложен способ компенсации разницы фаз для сигналов различных каналов микрофонной решетки, предполагающий использование аналоговых и цифровых узлов реального времени с программируемой задержкой. Предложенный способ компенсации разницы фаз предполагает эффективную аппаратную реализацию на основе современных ПЛИС, что позволяет снизить потребляемую мощность встраиваемых многоканальных систем обработки данных для одномерных, двумерных и трехмерных микрофонных решеток.

2. Разработаны структурные схемы электронных узлов реального времени для компенсации разницы фаз, ориентированные на использование в одномерных, двумерных и трехмерных микрофонных решетках. Рассмотрены варианты построения аналогового и цифрового узлов с программируемой задержкой.

2. Разработаны методики проектирования аналоговых и цифровых узлов многоканальной системы реального времени, предполагающие использование предложенного подхода к компенсации разницы фаз. Цель разработки методик состояла в минимизации параметра энергопотребление/производительность для встраиваемых многоканальных электронных систем обработки данных в фазированных микрофонных решетках.

Поставленная цель достигается за счет формализации процесса разработки структурных и схемотехнических решений, обеспечивающих реализацию аналоговых и цифровых узлов компенсации временной задержки (разницы фаз), на основе созданных типичных решений, ориентированных на использование в составе САПР Cadence и Mentor Graphics.

4. Разработаны модели одномерных, двумерных и трехмерных микрофонных решеток для САПР MathCAD, позволившие определить оптимальные с точки зрения числа использующихся каналов обработки данных характеристики решеток.

Практическая значимость работы обусловлена следующими факторами.

Разработанные в диссертации методики, модели аналоговых узлов, библиотеки структурных и схемотехнических решений, а также созданные электронные модули использовались при создании прототипа электронной системы обработки данных для многоканальной микрофонной решетки, что позволило снизить потребляемую мощность в 3-5 раз при одновременном формировании трех независимых диаграмм направленности.

Созданные электронные модули обработки данных дают возможность сформулировать требования и осуществить разработку следующей версии встраиваемых электронных модулей со структурой SiP (System in Package), либо SoC (System on Chip) в рамках САПР Cadence и Mentor Graphics.

Основные результаты диссертации изложены в следующих работах

1. Мью Ти Ха, Илиницкий А.А., Алюшин А.В., Павленко А.Н. Модуль сигнальной обработки на основе процессора ADSP21061L для опытного образца отечественного гамма-томографа // Научная сессия МИФИ - 2004. Сб. Научн. трудов. В 15 томах. Т.1. М.:МИФИ, 2004. - С.208-209.
2. Мью Ти Ха, Илиницкий А.А., Алюшин А.В., Павленко А.Н. Модуль сигнальной обработки на основе процессора ADSP21061L. для опытного образца отечественного гамма-томографа // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сб. научн.трудов.-МИФИ, 2004.-С.250-251.
3. Мью Ти Ха, Мью Ньют Вин, Мьят Вин Тун, Калиуллин Р.И. Исследование диаграммы направленности микрофонных решеток // Научная сессия МИФИ - 2005. Сб. Научн. трудов. В 15 томах. Т. 15. Конференция «Молодежь и наука». М.:МИФИ, 2005. - С.109-112.
4. Мью Ти Ха. Разработка системы разделения нескольких источников звуковых сигналов на основе микрофонной решетки для мобильного робота // Электроника, микро- и нанoeлектроника. Сборник научных трудов / Под ред. В.Я. Стенина. -М.: МИФИ, 2005.-С183-185.
5. Мью Ти Ха. Анализ сигналов на основе АКС-3166 логического анализатора для микрофонной решетки в системе распознавания речи // Научная сессия МИФИ - 2006. Сб. Научн. трудов. В 16 томах. Т. 16. Конференция «Молодежь и наука». М.:МИФИ, 2006. - С.89-91.

6. Мьо Ти Ха. Использование микрофонных решеток для улучшения качества записываемого сигнала в условиях сильного шума // Научная сессия МИФИ -2007. Сб. Научн. Трудов. В 17 томах. Т.1. М: МИФИ, 2007.-С.154-155.
7. Мьо Ти Ха. Современное состояние и перспективы развития микрофонных решеток // Научная сессия МИФИ -2007. Сб. Научн. Трудов. В 17 томах. Т.17. Конференция «Молодежь и наука» М: МИФИ, 2007.-С. 82-83.
8. Мьо Ти Ха. Адаптивная система подавления помех в микрофонной решетке // Научная сессия МИФИ -2007. Сб. Научн. Трудов. В 17 томах. Т.17. Конференция «Молодежь и наука». М: МИФИ, 2007.-С.89-90.
9. Мьо Ти Ха. Многоканальный микрофонный усилитель // Научная сессия МИФИ -2007. Сб. Научн. Трудов. В 17 томах. Т.17. Конференция «Молодежь и наука». М: МИФИ, 2007.-С.95-96.
10. Мьо Ти Ха, Алюшин М.В. Многоканальный усилитель для 2D и 3D микрофонных решеток // Известия вузов. Электроника. №4. 2007.-С.98-99.
11. Мьо Ти Ха, Алюшин М.В. Аналого-цифровой способ компенсации разницы фаз в многоканальных акустических решетках // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сборник научных трудов / Под ред. В.Я. Стенина. -М.: МИФИ, 2007.-С.93-95.
12. Мьо Ти Ха, Алюшин М.В. Аппаратные и программные средства реального времени для одно- и двумерных микрофонных решеток // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сборник научных трудов / Под ред. В.Я. Стенина. -М.: МИФИ, 2007.-С.96-98.
13. Мьо Ти Ха, Алюшин М.В. Методика проектирования аналоговых и цифровых узлов многоканальной системы реального времени для микрофонных решеток // Электроника, микро- и наноэлектроника. Сборник научных трудов / Под ред. В.Я. Стенина. -М.: МИФИ, 2007.-С.101-104.

