

Содержание

Предисловие	10
Список обозначений	14
Список сокращений	14
Глава 1	
Введение	16
1.1. Сжатие многомерных сигналов	19
1.2. Удаление шумов	21
1.3. Обработка мультиспектральных сигналов	25
1.4. Системы визуализации ММ сигналов	28
1.4.1. Системы трехмерного телевидения 3D-TV и с произвольной точкой наблюдения FTV	29
1.4.2. Обработка световых полей	34
1.4.3. Кодирование 4-D и 5-D сигналов	36
1.4.4. Визуализация ММ волновых функций электронов.....	38
1.4.5. Визуализация ММ сигналов в медицине	39
1.5. Рассматриваемые проблемы	39
Глава 2	
Методы и средства преобразования ММ цифровых сигналов	43
2.1. Неразделимые многомерные решетки и фильтры. История вопроса.....	43
2.1.1. Многомерные сигналы и системы	43
2.1.2. Многоскоростные системы и банки фильтров. Введение ...	44
2.1.3. Преимущества неразделимой обработки данных.....	48
2.1.4. Исследования в области синтеза неразделимых матриц децимации.....	51
2.2. Биортогональные и ортогональные многомерные банки фильтров	53
2.2.1. Основные требования, предъявляемые к синтезируемым фильтрам	53
2.2.2. Основные подходы при проектировании многомерных банков фильтров	55
2.3. Системы кодирования многомерных сигналов	65
2.3.1. Моделирование и обработка изображений	67
2.3.2. Скалярное и векторное квантование многомерных сигналов ...	74
2.3.3. Арифметическое кодирование.....	75

2.3.4.	Сжатие с потерями и без потерь	76
2.3.5.	Метод сжатия изображений с помощью частичной сортировки ММ вейвлет-коэффициентов	78
2.4.	Предпосылки прорыва в технологиях обработки многомерных сигналов	88
2.5.	Выводы	91
Глава 3		
Синтез неразделимых дециматоров и интерполяторов ...		93
3.1.	Основные операции с многомерными сигналами	93
3.1.1.	Многомерная дискретизация. Решетки и подрешетки	93
3.1.2.	Многомерная децимация и интерполяция	94
3.2.	Полная параметризация многомерных неразделимых матриц децимации	112
3.2.1.	Требования к матрицам децимации	112
3.2.2.	Двумерный случай	113
3.2.3.	Трехмерный случай	117
3.2.4.	Произвольная размерность D	121
3.3.	Свойства многомерных банков фильтров	124
3.3.1.	Условие точного восстановления сигнала	126
3.3.2.	Фильтры с линейной фазой	127
3.3.3.	Пример. Двухканальные банки фильтров	135
3.4.	Выводы	138
Глава 4		
Разработка биортогональных и ортогональных многомерных банков фильтров		140
4.1.	Банки фильтров с точным восстановлением сигнала	140
4.2.	Синтез биортогональных ММ БФ с помощью метода преобразования	142
4.2.1.	Метод преобразования МакКлеллана	142
4.2.2.	Синтез фильтра-прототипа с четным размером носителя и свойством ТВС	143
4.3.	Синтез биортогональных ММ БФ с помощью методов компьютерной алгебры	146
4.3.1.	Метод достройки унимодулярной матрицы	146
4.3.2.	Синтез банков фильтров с линейной фазой для двухканальной системы	151
4.3.3.	Синтез банков фильтров с нулевой фазой	152
4.3.4.	Синтез прямоугольных фильтров	158

4.3.5.	Проблемы достройки многомерных полиномиальных матриц.....	159
4.4.	Синтез биортогональных ММ БФ с помощью полиномов Бернштейна	161
4.4.1.	Полиномы Бернштейна. Двумерный случай	162
4.4.2.	Трехмерный случай	163
4.4.3.	Четырехмерный случай	165
4.4.4.	Теорема о разделяющей гиперплоскости.....	167
4.4.5.	СКО-оптимизированные банки фильтров	168
4.4.6.	Метод «неразделимый-через-разделимый»	169
4.4.7.	Примеры проектирования	172
4.5.	Синтез биортогональных ММ БФ с помощью метода лифтинга	173
4.5.1.	Основные этапы лифтинга	173
4.5.2.	Лифтинг-схема и полифазное представление	174
4.5.3.	Многомерные интерполяционные фильтры и фильтры с дробным сдвигом	176
4.5.4.	l_2 норма фильтров с дробным сдвигом.....	186
4.6.	Синтез ММ неразделимых ортогональных фильтров	189
4.6.1.	Введение. Ортогональные банки фильтров	189
4.6.2.	Синтез двухканальных неразделимых ортогональных фильтров	191
4.6.3.	Структурный синтез четырехканальных ортогональных фильтров	193
4.6.4.	Примеры проектирования	198
4.7.	Факторизация полифазных матриц	199
4.7.1.	Разложение полиномиальных матриц на элементарные множители	199
4.7.2.	Факторизация двухканальных многомерных полифазных матриц	201
4.7.3.	Сравнение числа операций	202
4.8.	Синтезированные классы банков фильтров.....	204
4.9.	Синтез трехканальных неразделимых фильтров.....	204
4.10.	Результаты применения синтезированных многомерных банков фильтров.....	208
4.11.	Выводы	208

Глава 5

	Построение ММ шкалирующих и вейвлет-функций	210
5.1.	Вейвлет-преобразование.....	210
5.2.	Дискретное вейвлет-преобразование в \mathbb{R}^D	213
5.3.	Построение вейвлет-базисов для двухканальных систем в \mathbb{R}^D	216

5.4.	Построение фильтров в \mathbb{R}^D при наличии сдвигов	220
5.5.	Критерий Коэна	222
5.6.	Связь частотных характеристик фильтров многоскоростных систем и порождаемых ими вейвлетов.....	227
5.6.1.	Условия Стренга–Фикса.....	228
5.7.	Алгоритм построения многомерных вейвлетов.....	229
5.8.	Выводы	234

Глава 6

Разработка и реализация системы кодирования ММ сигналов.....	235
6.1. Выбор оптимальной цветовой модели для кодирования цветных изображений иерархическим алгоритмом.....	235
6.1.1. Классификация цветовых систем и анализ их характеристик	236
6.1.2. Разработка новой цветовой модели	237
6.1.3. Распределение бит по каналам цветного изображения. Динамический формат кодирования	237
6.1.4. Субъективное тестирование	241
6.1.5. Альтернативные критерии оценки качества сжатых изображений	243
6.2. Сжатие изображений с помощью частичной сортировки вейвлет-коэффициентов	250
6.2.1. Вейвлет-декомпозиция — вход алгоритма.....	250
6.2.2. Приоритет	251
6.2.3. Квантование.....	253
6.2.4. Алгоритм А. Льюиса и Г. Ноулеса.....	254
6.2.5. Алгоритм EZW.....	256
6.2.6. Алгоритм SPIHT	260
6.2.7. Свойства потока	264
6.2.8. Оптимизация алгоритма	265
6.3. Применение иерархического алгоритма для неразделимых решеток и банков фильтров.....	268
6.3.1. Неразделимая децимация.....	268
6.3.2. Необходимость адаптации алгоритма SPIHT	269
6.3.3. Сдвиг	270
6.3.4. Трехканальные неразделимые системы	274
6.3.5. Модификация алгоритма для случая трехмерного сигнала	276
6.3.6. Результаты	280
6.4. Сжатие изображений с помощью блочного алгоритма.....	280
6.4.1. Алгоритм SQP.....	281

6.4.2.	Результаты моделирования	286
6.5.	Одновременное сжатие изображений и удаление аддитивного шума	288
6.6.	Обработка трехмерных данных	289
6.6.1.	Обработка томографических сигналов	289
6.6.2.	Обработка мультиспектральных сигналов	291
6.7.	Реализация многомерных многоскоростных систем	301
6.7.1.	Описание многомерных сигналов	301
6.7.2.	Продолжение сигнала	302
6.7.3.	Децимация	306
6.7.4.	Результаты моделирования 3-D многоскоростной системы	308
6.8.	Программная реализация алгоритма сжатия изображений	310
6.8.1.	Программный комплекс. Обзор	311
6.8.2.	Программы i_comp и sptv	312
6.8.3.	Три поколения программного обеспечения	313
6.9.	Системы обработки ММ сигналов на основе GPU	314
6.9.1.	Особенности применения GPU	314
6.9.2.	Результаты тестирования	323
6.9.3.	Обзор технологии CUDA	326
6.10.	Аппаратная реализация алгоритмов сжатия и передачи видеоданных	329
6.10.1.	Аппаратная ориентация	329
6.10.2.	Описание алгоритма. Бесспиновый алгоритм	329
6.10.3.	Описание прототипа устройства	333
6.11.	Выводы	335

Приложение А

Скалярное и векторное квантование	337
A.1. Скалярное квантование	337
A.2. Векторное квантование	337
A.2.1. Основы векторного квантования	337
A.2.2. Основные компоненты и свойства	338
A.2.3. Оценка качества восстановленного сигнала	339
A.2.4. Коды со словом фиксированной длины	341
A.2.5. Построение оптимальной кодовой книги	343

Приложение Б

Арифметическое кодирование	345
B.1. Алгоритм арифметического кодирования	345
B.2. Практическая реализация	347
B.3. Адаптивные модели	351

Приложение В**Синтез неразделимых матриц децимации** 352

- В.1. Первое решение для $k = 3$ при положительном определителе ... 352
 В.2. Второе решение для $k = 3$ при положительном определителе ... 354
 В.3. Второе решение для $k = 3$ при отрицательном определителе ... 356

Приложение Г**Результаты синтеза биортогональных банков фильтров** 358

- Г.1. Применение метода преобразования 358
 Г.2. Применение полиномов Бернштейна 361
 Г.3. Реализация метода «неразделимый-через-разделимый» 366
 Г.4. 2-D фильтры с дробным сдвигом. Применение ряда Тейлора... 367
 Г.5. 2-D фильтры с дробным сдвигом. Симметричные структуры..... 369
 Г.5.1. Порядок $N = 8$ 373
 Г.5.2. Порядок $N = 10$ 374

Приложение Д**Результаты синтеза ортогональных банков фильтров** 376

- Д.1. Двухканальный ортогональный БФ 376
 Д.2. Четырехканальный ортогональный БФ 377

Приложение Е**Основные сведения из компьютерной алгебры**..... 382

- Е.1. Упорядочивание в многомерном случае 382
 Е.2. Базис Гребнера 385
 Е.3. Вычисление сизигии 388
 Е.4. Достройка полиномиальной унимодулярной матрицы..... 389
 Е.4.1. Основные определения 389
 Е.4.2. Основной алгоритм достройки унимодулярной матрицы 392
 Е.4.3. Поиск глобально минимального базиса сизигий \mathbf{S} 392
 Е.4.4. Достройка унимодулярной матрицы над кольцом полиномов Лорана 394
 Е.5. Дробно-матричное описание многомерных полиномиальных матриц 394
 Е.5.1. Двумерный случай 395
 Е.5.2. Число переменных $n \geq 3$ 397
 Е.6. Определение обратной матрицы 398
 Е.6.1. Определение наибольшего левого общего делителя двух матриц 399
 Е.6.2. Связь базиса Гребнера с типом упорядочивания 400

Е.7. Упрощение полиномиальных систем	400
Приложение Ж	
Результаты расчета БФ с помощью метода достройки	402
Ж.1. Банки фильтров с линейной фазой	402
Ж.2. Банки фильтров с нулевой фазой	406
Приложение З	
Цветовые модели	410
Приложение И	
Результаты математического моделирования	418
И.1. Сравнение SPIHT и JPEG2000	418
И.2. Кодирование ММ сигналов с помощью неразделимых БФ	421
И.3. Трехканальные системы	422
Приложение К	
Особенности программной реализации алгоритма сжатия для GPP	425
К.1. Программа icomp	425
К.1.1. Руководство пользователя	425
К.1.2. Работа с программой	427
К.2. Программа sptv	428
К.2.1. Руководство пользователя	428
К.3. Особенности реализации	429
Приложение Л	
Программная реализация алгоритма SPIHT для ЦПОС	432
Л.1. Ресурсоемкость реализации	432
Л.2. Интерфейсы взаимодействия с внешними модулями	434
Л.3. Описание алгоритма кодирования	436
Л.4. Описание функций	437
Л.5. Критические секции и меры их оптимизации	441
Л.5.1. Разработка методики оптимизированного вычисления вейвлет-преобразования изображений на сигнальном процессоре. Описание проблемной области	441
Л.5.2. Описание контроллера DMA	443
Л.5.3. Общее описание методики	444
Литература	449

*Посвящая своим любимым родителям —
Константину и Нинель Чобану*

Предисловие

В работе рассматривается обширная область цифровой обработки сигналов, получившая за рубежом громадное развитие в течение последних 20–30 лет. Это методы и средства цифровой обработки многомерных сигналов — неподвижных изображений, видео, меняющихся во времени томографических, сейсмических и многих других сигналов. В последнее время с этой целью все чаще стали использоваться неразделимые операторы, которые являются операторами наиболее общего вида.

Сейчас можно говорить о новом научно-техническом направлении в области информационно-телекоммуникационных технологий и обработки сигналов. Это разработка теории многомерных систем и методов обработки многомерных сигналов, развитие которых стимулируется важными практическими задачами. Многомерные сигналы описываются функциями нескольких переменных и могут обрабатываться только многомерными системами, т. е. системами, описываемыми функциями и уравнениями многих переменных. Интенсивное развитие данного направления началось с 60-х годов и основано на теории одномерных и многомерных сигналов и систем, а также на таких разделах математики, как теория функций многих переменных, компьютерная алгебра, теория вейвлет-преобразования, функциональный анализ, аппроксимации и др.

В работе речь пойдет о цифровых системах, имеющих широкое применение, которые обрабатывают многомерные цифровые сигналы, получаемые в результате дискретизации и квантования многомерных аналоговых сигналов. В работе будут представлены новые методы, в основном, аналитического (нечисленного) синтеза основных операторов и устройств, из которых состоят многомерные многоскоростные системы, применяемые в системах преобразования многомерных сигналов с целью их сжатия, архивирования, передачи и т. д. Это методы синтеза неразделимых матриц децимации, неразделимых биортогональных и ортогональных банков фильтров, систем преобразования цветового формата, квантования и кодирования многомерных сигналов. Приведены результаты реализации и применения разработанных неразделимых операторов систем обработки многомерных сигналов.

Основные решаемые в данном исследовании задачи перечислены ниже:

- созданы новые средства изменения пространственно-временной плотности многомерных сигналов (прореживания, или децимации, или

- перехода от заданной многомерной решетки к более редкой, а также интерполяции — обратной прореживанию операций);
- разработаны новые цифровые системы для неразделимой фильтрации многомерных сигналов и их обработки на решетках различной плотности (многоскоростная обработка);
 - построены и исследованы новые базисы многомерных вейвлетов, позволяющие эффективно аппроксимировать многомерные сигналы;
 - синтезированы и реализованы на практике кодирующие системы для эффективного сжатия многомерных сигналов, включая операторы изменения пространственно-временной плотности сигналов, цифровые фильтры, новые оптимальные схемы для представления цветных многомерных сигналов, распределение бит между каналами, кодирующие устройства и др.;
 - разработаны новые программные и аппаратные средства, использующие последние достижения в области программирования и вычислительной техники.

Сегодня мы сталкиваемся с целым рядом нерешенных проблем:

- в системах сжатия почти не используется вейвлет-преобразование (кроме JPEG-2000);
- все известные стандарты сжатия являются разделимыми (покоординатная обработка);
- отсутствуют стандарты сжатия реальных трехмерных, четырехмерных . . . сигналов, а также мультиспектральных сигналов дистанционного зондирования Земли;
- для создания систем визуализации многомерных сигналов (в трехмерном телевидении, при обработке фотореалистичных световых полей) нужны эффективные системы сжатия многомерных сигналов с низкой вычислительной сложностью.

Рассмотрению и решению части указанных проблем посвящена данная книга. С точки зрения приложений основное внимание будет уделено проблеме сжатия многомерных сигналов (включая мультиспектральные сигналы дистанционного зондирования Земли и сигналы в системах визуализации для будущего трехмерного телевидения и при обработке световых и акустических полей), хотя, как будет показано ниже, разработанные многомерные неразделимые операторы, сигналы и устройства могут найти применение во многих других областях (см. «Введение»).

Специфика решаемых задач заключается в следующем:

- 1) исследуемая область задач находится на пересечении интересов трех научных сообществ:

- математиков (решающих задачи теории аппроксимации, алгебры и др.);
 - компьютерной графики (рассматривающих многомерные сетки, эффективные реализации систем обработки многомерных сигналов);
 - цифровой обработки сигналов (синтезирующих многоскоростные системы, цифровые фильтры);
- 2) в работе представлен в основном не численный, а аналитический подход к разработке и исследованию составных частей многомерных систем, позволяющий учесть требуемые ограничения и получить результат в удобной для анализа различных характеристик форме;
 - 3) имеется достаточно мало работ в области современных способов цифровой обработки многомерных сигналов с помощью неразделимых устройств и операторов (задача синтеза всех необходимых для эффективной работы системы устройств, сигналов, алгоритмических и программных средств ранее не решалась);
 - 4) радикальное изменение технологических возможностей новейших процессорных систем (таких как сигнальные процессоры, ПЛИС, графические процессоры) может обеспечить реализацию сложных и математически емких алгоритмов обработки сигналов.

Во «Введении» показана важность рассматриваемых в монографии задач, приводится широкий спектр возможных областей применения представленных результатов. Во второй главе приводится обзор известных методов и средств преобразования многомерных цифровых сигналов, ставится задача аналитического синтеза неразделимых операторов, сигналов и устройств для многоскоростных систем обработки изображений. В третьей главе рассмотрены основные операции над цифровыми многомерными сигналами, предложена полная параметризация многомерных матриц децимации, получены основные соотношения, на основе которых в дальнейшем будут синтезироваться многоскоростные системы.

В четвертой главе предложены и исследованы аналитические методы синтеза многомерных цифровых фильтров для биортогональных и ортогональных многоскоростных систем.

В пятой главе исследуются масштабирующие и вейвлет-функции для банков фильтров, разработанных в четвертой главе, разработан итерационный алгоритм построения многомерных неразделимых масштабирующих и вейвлет-функций. В шестой главе исследована и реализована система преобразования многомерных сигналов с целью их сжатия на основе синтезированных ранее банков фильтров, разработаны и опти-

мизированы алгоритмы иерархического, вложенного кодирования (для неразделимого случая) и редукции разностей вейвлет-коэффициентов, описана программная и аппаратная реализация многомерной многоскоростной системы.

В «Приложении» приведены некоторые доказательства полученных результатов, построены зависимости для функций и параметров устройств многомерных многоскоростных систем, приводятся сведения из компьютерной алгебры, результаты математического моделирования процесса сжатия многомерных сигналов, приводятся особенности и результаты программной реализации разработанной многомерной многоскоростной системы с помощью GPU (графических процессоров) и сигнальных процессоров фирмы Texas Instruments.

Пользуясь случаем, хочу выразить признательность своим коллегам, которые в разное время работали вместе со мной над получением результатов, изложенных в монографии: Миронову В. Г., Скопиной М. А., Рамстаду Т. (Tor Ramstad, NTNU, Тронхейм, Норвегия), Вудбурн С. (Cynthia Woodburn, PSU, Канзас, Питтсбург, США), Сарамяки Т. (Tariu Saramaki), Готчеву А. (Atanas Gotchev), Егязаряну К. (Karen Egiazarian, все из TUT, Тампере, Финляндия), Ямаде И. (Isao Yamada, ТИТ, Токио, Япония), Авдееву О. В., Батлуку А. В., Большаковой О. В., Волкову М. В., Зандер К. (Kathrin Sander), Илюшкиной Н. С., Кисловой Д. В., Ключкину В. И., Максименко И. Е., Плахову А. Г., Рычкову А. Н., Сержантову А. В., Степачевой А. И., Черникову А. В., Чобану С. Г.

Москва,
май 2009.

Чобану Михаил