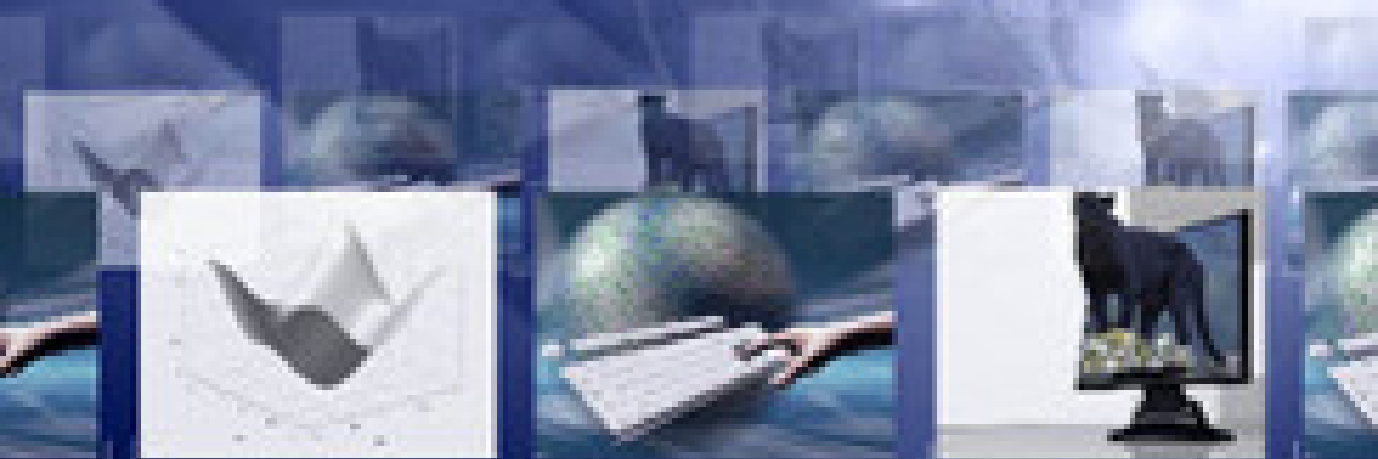


# Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов

М. ЧОБАНУ





*Издание осуществлено при финансовой поддержке  
Российского фонда фундаментальных исследований  
по проекту № 09-07-07022-д*

**Чобану М.**

**Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов**

**Москва:**

**Техносфера, 2009. - 480с. ISBN 978-5-94836-233-5**

В монографии рассматриваются многомерные многоскоростные системы, которые используются для обработки ММ цифровых сигналов. Монография является первым систематическим изложением теории и методов неразделимой обработки ММ сигналов на русском языке, в ней приводится все необходимое для разработки ММ многоскоростных систем, начиная с фундаментальных результатов из теории цифровой обработки ММ сигналов, и заканчивая алгоритмами и программным/аппаратным обеспечением для ММ многоскоростных систем.

Важной чертой монографии является применение математических пакетов MATLAB, MAPLE, Singular и др., а также программ, написанных на языке С, на протяжении всего изложения. Приведены результаты реализации разработанных неразделимых операторов на основе процессоров общего назначения, сигнальных процессоров фирмы Texas Instruments и графических процессоров (GPU) фирмы nVidia.

© 2009, Чобану М.

© 2009, ЗАО "РИЦ "Техносфера",  
оригинал-макет, оформление.

**ISBN 978-5-94836-233-5**

# Содержание

Предисловие .....	10
Список обозначений .....	14
Список сокращений .....	14
<b>Глава 1</b>	
<b>Введение .....</b>	<b>16</b>
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
<b>Глава 2</b>	
<b>Методы и средства преобразования ММ цифровых сигналов .....</b>	<b>43</b>
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
<b>Глава 5</b>		
<b>Построение ММ шкалирующих и вейвлет-функций .....</b>		<b>210</b>
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. Бесспиковый алгоритм .....	329	
6.10.3.	Описание прототипа устройства .....	333	
6.11.	Выводы .....	335	
<b>Приложение А</b>			
<b>Скалярное и векторное квантование .....</b>			<b>337</b>
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	
<b>Приложение Б</b>			
<b>Арифметическое кодирование .....</b>			<b>345</b>
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
<b>Приложение Ж</b>	
<b>Результаты расчета БФ с помощью метода достройки .....</b>	<b>402</b>
Ж.1. Банки фильтров с линейной фазой .....	402
Ж.2. Банки фильтров с нулевой фазой .....	406
<b>Приложение З</b>	
<b>Цветовые модели .....</b>	<b>410</b>
<b>Приложение И</b>	
<b>Результаты математического моделирования .....</b>	<b>418</b>
И.1. Сравнение SPIHT и JPEG2000 .....	418
И.2. Кодирование ММ сигналов с помощью неразделимых БФ .....	421
И.3. Трехканальные системы .....	422
<b>Приложение К</b>	
<b>Особенности программной реализации алгоритма сжатия для GPP .....</b>	<b>425</b>
К.1. Программа i_comp .....	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
<b>Приложение Л</b>	
<b>Программная реализация алгоритма SPIHT для ЦПОС .....</b>	<b>432</b>
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 про- цессоре. Описание проблемной области .....	441
Л.5.2. Описание контроллера DMA .....	443
Л.5.3. Общее описание методики .....	444
<b>Литература .....</b>	<b>449</b>

# ГЛАВА I

## ВВЕДЕНИЕ

К задачам цифровой обработки многомерных сигналов относится обработка неподвижных изображений и видеосигналов, радио- и гидролокационных сигналов, геофизических, акустических и световых полей, сигналов в медицине (рентгеновская и ультразвуковая томография), метеорологии, космонавтике, ядерной физике и др. с целью их преобразования. Эти направления исследования нашли отражение в Приоритетных направлениях развития науки, технологий и техники РФ «Информационно-телекоммуникационные системы», «Рациональное природопользование» и «Транспортные, авиационные и космические системы» и в Перечне критических технологий РФ «Технологии обработки, хранения, передачи и защиты информации» и «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы и гидросферы».

В течение последних лет резко возрос интерес к решению задач анализа, синтеза, обработки, кодирования, сжатия многомерных (ММ или M-D — multi-dimensional) сигналов для их передачи, хранения, архивирования, защиты от несанкционированного доступа, восстановления в системах связи (проводных и беспроводных) при наличии ограничений (на скорость передачи, на полосу пропускания, на динамический диапазон и т. д.). Это объясняется громадным ростом таких областей приложения, как мультимедиа технологии и телекоммуникации, осуществляющих обработку (включая сжатие) неподвижных изображений (2-D сигналы), видеосигналов (3-D сигналы) и меняющихся во времени томографических снимков (4-D сигналы).

Среди бурно развивающихся областей применения предлагаемых методов цифровой обработки ММ сигналов можно упомянуть:

- обработку медицинских и сейсмических изображений;
- дефектоскопию электротехнических изделий, техническое зрение;
- ТВЧ (телевидение высокой четкости) и 3D-TV (трехмерное телевидение);
- конвертеры скорости обработки сигналов;
- цифровые видеокодеки;
- использование методов цифровой обработки ММ сигналов для решения систем уравнений в частных производных, описывающих

многие физические системы (например, решение полевых задач с помощью многомерных фильтров, расчет цепей с распределенными параметрами и др.).

ММ цифровые фильтры (в том числе адаптивные) предпочтительны также при восстановлении изображений, так как они позволяют эффективно использовать корреляцию между соседними пикселями изображения, отслеживать пространственные изменения в распределении ММ сигнала и использовать иную априорную информацию о ММ сигналах.

Теория обработки ММ сигналов разделяет детерминированные и статистические подходы к моделированию, анализу и синтезу пространственно-временных дискретных и непрерывных систем. Сейчас очевидно, что тема ММ систем непосредственно связана с теоретическими и прикладными проблемами, которые возникают из-за непрерывно растущих требований в области приложений. Известно, что проблема обработки сигналов в сущности многомерная, но обычно решается после свертывания на одно из нескольких измерений.

В качестве примера можно привести акустические сигналы, которые реально существуют в трех пространственных и одном временном измерениях, но обрабатываются как 1-D сигналы. Также существуют противоположные ситуации, например, речь, которая первоначально 1-D, но часто анализируется через большое количество многомерных характеристических векторов для ряда целей, включая ее синтез и распознавание.

В то время как большинство разработок было сконцентрировано на одномерных сигналах и ММ случай был реализован лишь через тензорное произведение, некоторые исследователи сосредоточили свои усилия на «истинном» ММ случае. Под «истинным» ММ случаем нужно понимать то, что допускается: и неразделимое осуществление дискретизации, и неразделимая фильтрация. Хотя «истинный» ММ подход может иметь ряд недостатков (более высокую вычислительную сложность, потенциальные проблемы устойчивости в случае ММ рекурсивной фильтрации), он дает некоторые неоспоримые преимущества. Например, использование неразделимых фильтров ведет к большему количеству степеней свободы и при этом, следовательно, можно синтезировать лучшие фильтры. Кроме того, неразделимое осуществление дискретизации открывает возможность создания схем, лучше приспособленных к визуальной системе человека.

Разработки в области цифровой обработки сигналов, проводимые в промышленно развитых странах, уже привели к созданию ряда стандартов (из последних это упомянутый JPEG-2000 для сжатия неподвижных изображений и разрабатываемые стандарты сжатия видео H.265, MPEG-7 и MPEG-21) и производству специализированных СБИС и сиг-

нальных процессоров. Однако задача создания методов и средств соответствующего аппаратного комплекса для многоскоростных систем, удовлетворяющего заданным требованиям (по коэффициенту сжатия, по качеству восстановленного после сжатия сигнала, по быстродействию и т. д.), разработанного и реализованного в наиболее общем — неразделимом виде и пригодного для широкого внедрения, еще не решена.

На сегодняшний день известны работы, проводимые International Organization for Standardization/International Electrotechnical Commission (ISO/IEC) Moving Picture Experts Group (MPEG) и International Telecommunication Union (ITU-T) Video Coding Experts Group (VCEG) в области создания стандартов для сжатия ММ сигналов. Вопросы сжатия традиционного видео, наблюдаемого с одной точки — single-view, а также видео, наблюдаемого с нескольких точек — multiview video coding (Joint Multiview Video Model — JMVM), а также кодирование сигналов, для которых задается глубина — depth-based coding, в настоящее время решаются Joint Video Team (JVT) в сотрудничестве с MPEG и VCEG, в то время как создание стандартов для представления 3D сигналов и для кодирование ММ сеток рассматривается в 3-D Graphics Compression (3DGC) группе MPEG.

X3D (Extensible 3D) — расширяемый язык описания трехмерных сцен, предназначенный для создания трехмерной графики в интернете. Рабочий проект X3D был впервые представлен на Седьмой международной конференции трехмерных веб-технологий 3D Web Technology в США в феврале 2002 года. Сейчас он серьезно рассматривается как преемник VRML (Virtual Reality Markup Language), так и не сумевшего широко внедриться в повседневную жизнь.

Проблемы внедрения VRML были обусловлены объективными причинами — ограниченными возможностями каналов и аппаратных мощностей компьютеров. Сейчас ситуация меняется, и 3D-технологии постепенно становятся вполне реализуемыми и востребованными. Extensible 3D тесно интегрирован с XML, более компактен, чем VRML, и имеет модульную конструкцию. Такие известные компании, как Macromedia и Adobe Systems, высказались в поддержку нового стандарта. Авторы рабочего проекта считают, что X3D может позволить широко внедрять объемные веб-интерфейсы, сетевые игры и другие приложения.

Существует целый ряд приложений, в которых цифровая обработка ММ сигналов играет ключевую роль. Среди них можно назвать следующие:

- 1) системы сжатия ММ сигналов (многоскоростные системы, трансмультиплексоры);
- 2) удаление шумов;

- 3) системы обработки мультиспектральных сигналов дистанционного зондирования Земли;
- 4) системы трехмерной визуализации (трехмерное телевидение 3D-TV, обработка световых и акустических полей).

## 1.1. Сжатие многомерных сигналов

Фундаментальной проблемой при создании цифровых систем является сокращение избыточности информации. Разработка эффективных способов и методов сжатия 1-D и ММ сигналов является предпосылкой эффективного использования устройств памяти и каналов проводной и беспроводной связи, используемых для хранения и передачи сигналов, обеспечивая сохранение действующих частотных планов, высвобождение большей части частотного пространства для передачи пользователям таких видов услуг, как телевидение высокой четкости (ТВЧ), трехмерное телевидение (3D-TV), видеоконференции, многопрограммное заказное ТВ и звуковое вещание.

Результаты современных методов сжатия далеки от окончательных пределов, наложенных глубиной структурой источников данных, например, видеосигналов, изображений или акустических явлений. Понимание проблемы сжатия для данного типа данных подразумевает знание основ моделирования и аппроксимации именно этого типа данных. Это, в свою очередь, может быть полезно для многих других важных задач, включая классификацию, подавление шумов, интерполяцию и сегментацию.

Точная модель для различных эмпирических явлений имела бы потенциально огромную сложность. В действительности видеосигналы, изображения и звуки, даже в ограниченной области применения, являются не только ММ, но и бесконечномерными ( $\infty$ -D) явлениями. Они имеют место в континууме, и, в принципе, запись звука или изображения не может ограничиваться конечным числом параметров. Реально лежащий в основе механизм во многих случаях не гауссовский и существенно не стационарный. Еще не было предложено никакого эффективного способа описать структуру таких комплексных явлений. В гауссовском сигнале все параметры могут быть выведены из вычисляемой последовательности собственных значений ковариационного ядра. Однако вне гауссовского случая очень немного известно относительно характеристических  $\infty$ -D вероятностных распределениях, которые были бы в ближайшее время полезны для моделирования реальных явлений и эффективных методов сжатия.

Эффективным способом преобразования ММ сигналов является применение ММ многоскоростных систем. С их помощью сигнал может

быть представлен в виде, более удобном для решения многих прикладных задач, таких как сжатие (с потерями или без потерь), удаление шумов, распознавание образов и др. Многоскоростные системы состоят из цифровых фильтров и устройств изменения плотности отсчетов в пространственно-временной области, поэтому обработка сигнала в различных частях системы происходит с разной скоростью. Применение таких систем позволяет строить схемы кратномасштабного анализа на основе вейвлетов. Использование вейвлет-преобразования позволило одновременно снизить сложность и повысить эффективность кодеков.

Цифровые многоскоростные наборы, или, как их чаще называют, банки фильтров (БФ) были впервые описаны в [139], где они использовались для сжатия речи. В дальнейшем они стали применяться шире, главным образом, для кодирования подполос речи, статических изображений и видео [277, 284, 303]. Основы теории исходили из того, чтобы отсутствовали наложение и искажение сигналов. Речь шла о синтезе систем, достигающих точного восстановления сигнала в одном или нескольких измерениях, от двухканальных ортогональных банков до многоканальных систем. Для выполнения этих требований все усилия были сконцентрированы на фильтрах, имеющих дробно-рациональные функции преобразования, т. е. на линейных инвариантных к сдвигу системах.

Независимо от этих работ в прикладной математике была разработана теория вейвлетов. С работами Добеши [18], Малла и Мейера стало ясно, что банки фильтров и вейвлеты связаны неразрывно. Банки фильтров вычисляют эквивалент дискретного вейвлет-преобразования, и при известных условиях они могут использоваться для получения непрерывных вейвлет-базисов. Практика применения вейвлетов для решения задач сжатия и обработки изображений и видео, являющихся нестационарными по своей природе, получила большое развитие. В этой области применение вейвлет-преобразования позволило достичь одновременного снижения сложности и повышения эффективности кодеков. В настоящее время разработаны международные стандарты по сжатию неподвижных изображений и видеосигналов — JPEG-2000, H.264/AVC, WMP10 и MPEG-4. Стандарт JPEG-2000 является единственным стандартом, основанным на вейвлет-преобразовании. Тем самым задача синтеза ММ многоскоростных систем и схем вейвлетного кратномасштабного анализа, построенных на их основе, является исключительно важной, в том числе для будущих стандартов сжатия ММ сигналов.

В разд. 3.1.2 будет показано, что многоскоростные системы состоят из двух наборов (банков) фильтров — банка анализа и банка синтеза. В зависимости от того, в каком порядке они соединены, можно получить различные устройства. В случае, если на вход банка анализа подается

сигнал, который раскладывается на подполосовые составляющие и далее восстанавливается обратно в банке синтеза, такая система называется банком фильтров анализа/синтеза (устоявшегося названия нет, поэтому это устройство будет называться просто «многоскоростной системой»; см. рис. 1.1, а). Если поменять порядок следования банка анализа и банка синтеза, в этом случае набор сигналов подается на вход банка синтеза, с выхода которого комбинированный сигнал подается на вход банка анализа, производящего его разложение на составляющие. Такая система называется банком фильтров синтеза/анализа, или (в данном случае имеется устоявшееся название) трансмультиплексором (см. рис. 1.1, б). Очень важно то, что обе системы описываются по сути одними и теми же типами уравнений.

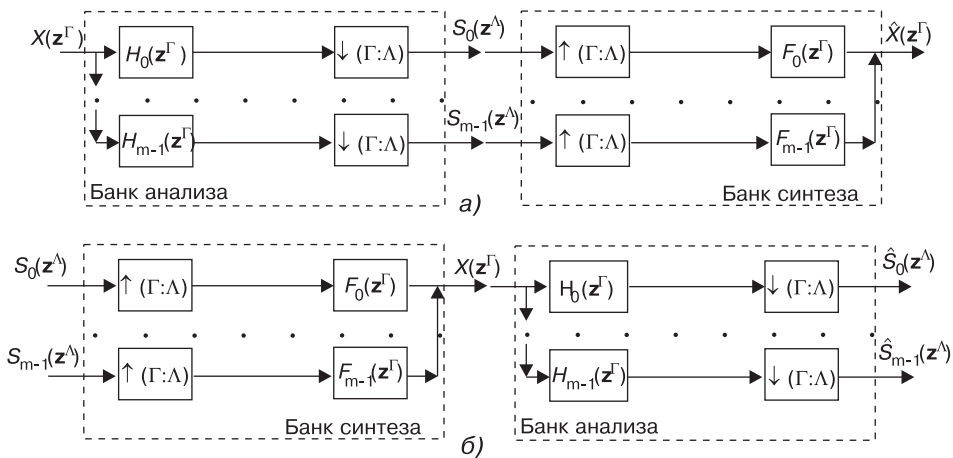


Рис. 1.1. Два варианта соединения банков анализа и синтеза: а) банк фильтров анализа/синтеза («многоскоростная система»); б) банк фильтров синтеза/анализа (трансмультиплексор)

Ниже будут рассмотрены только многоскоростные системы. Однако полученные результаты в равной степени применимы как к трансмультиплексорам, так и к системам со многими входами и многими выходами (MIMO — multiple inputs multiple outputs). Аппарат многомерных полифазных матриц, развитый в работе, позволяет решать и задачу синтеза таких систем, включая случай, когда число входных сигналов отличается от числа выходных сигналов.

## 1.2. Удаление шумов

Важнейшей областью применения методов обработки многомерных сигналов является улучшение и/или сжатие сигналов, получаемых при уль-

тразвуковых (УЗ) исследованиях, РСА изображений (от решеток с синтезированной апертурой) и других сигналов в системах с когерентным излучением. В силу того, что поверхность/объем облучаемых деталей вызывают случайные фазовые отклонения отраженного излучения, это приводит к появлению гранулированного шума на изображении (спекл-шум). Такой шум может считаться мультипликативным.

Примерами таких сигналов являются:

- 1) сигналы медицинского УЗ исследования (двумерные снимки — 2D (two-dimensional), трехмерные изображения — 3D, четырехмерные — изменяющиеся во времени трехмерные изображения — 4D). Такие исследования получают все более широкое распространение в силу их безопасности, неинвазивности, относительно низкой стоимости, мобильности и возможности работать в реальном времени. Развитие телекоммуникационных систем и появление мобильной связи позволяют проводить удаленную диагностику и, возможно, лечение больных. Это особенно важно для нашей страны, при наблюдении за космонавтами или при работе в труднодоступных районах. Возможные области применения включают обработку эхокардиограмм (2D, 3D и 4D изображения позволяют визуализировать внутрисердечные структуры, сосуды сердца, выявлять патологические изменения камер сердца, определять патологию клапанов сердца и аорты, оценивать область риска и величину инфаркта и контролировать результаты проводимой терапии), УЗ исследования мозга (2D и 3D изображения для диагностики повреждения белого вещества, кровоизлияний в мозговом веществе и др.) и других органов;
- 2) сигналы рентгеновской флюороскопии и рентгеновской коронарной ангиографии, позволяющие вести наблюдение в реальном времени за проводимой операцией (слабые дозы излучения); сигналы цифровой радиографии (умеренные дозы излучения);
- 3) данные дистанционного зондирования — РСА изображения Земли, рек, городов, шельфов, лесов — с целью проведения гидрологических исследований, исследования береговых геоморфологических изменений, наблюдения за изменением русел рек и мониторинга окружающей среды;
- 4) РСА изображения, получаемые при проведении дефектоскопических исследований, при измерении и оценке термических деформаций и вибрации электронных приборов.

Наличие спекл-шума мешает правильному восприятию изображений человеком (с целью постановки диагноза, принятия решения и т. д.), автоматическому распознаванию образов, эффективному сжатию сигналов.



Поэтому проблема удаления шума при одновременном сохранении и/или восстановлении информации о резких/плавных переходах и о текстуре изображения является очень важной. В связи с тем, что скорость роста объема регистрируемых многомерных данных больше скорости роста пропускной способности каналов их передачи, задача сжатия многомерных данных становится все более значимой.

Важным является выбор модели помехосигнальной обстановки. Как показывает опыт, одним из важнейших параметров модели мультипликативного шума является степень  $\gamma$ , в которую возводится сигнал, как составляющая спекл-шума. Для РСА изображений  $\gamma = 1$  с достаточно большой точностью. Для УЗ изображений значение  $\gamma$  выходит за пределы интервала  $(0,5, 1,0)$ . Для других типов изображений  $\gamma$  может стать даже отрицательным.

Последние исследования доказали, что именно применение многомерных 3D и 4D систем позволяет существенно улучшить характеристики подавления спекл-шума (за счет декорреляции шумов и усреднения во времени). Неразделимые решетки дискретизации, неразделимые банки фильтров и неразделимое деление частотной области наилучшим образом подходят для представления и анализа многомерных изображений. Например, двумерная система с двумя каналами ВП производит более тонкую, чем в разделимом случае, декомпозицию изображения с коэффициентом масштабирования, равным  $\sqrt{2}$ , а не 2. Поэтому такой анализ изображения является более эффективным, чем в разделимом случае.

Возможно решение задачи одновременного подавления сложных шумов и эффективного сжатия многомерных сигналов, получаемых с помощью РСА, или подобных им систем. Такая задача имеет несколько особенностей (см. также разд. 6.5). Первая особенность состоит в наличии спекл-шума, возникающего в системах с когерентным излучением. Такой гранулированный шум существенно снижает качество изображений. Второй особенностью является то, что в изображении имеются области с развитой текстурой и достаточно однородные области. Поэтому имеется возможность существенно уменьшить число бит, необходимых для кодирования таких однородных участков. Третья особенность заключается в том, что РСА изображения имеют существенно другой динамический диапазон значений, чем, например, оптические изображения. Поэтому требуется изменение известных методов кодирования многомерных оптических изображений.

ВП получило широкое распространение в силу своей способности к мультиразрешению. Это свойство позволяет эффективно анализировать изображения. В случае УЗ изображений часто случается, что небольшие малоконтрастные объекты накладываются на контрастные большие

объекты. Поэтому многоуровневая декомпозиция таких изображений приведет к разделению наложенных сигналов по разным уровням, где они могут быть обработаны по отдельности. ВП успешно применяется для сжатия сигналов, их анализа/аппроксимации, подавления шума, при обработке мультиспектральных изображений.

Одновременное применение дискретного ВП вместе с процедурами сегментации изображения, подавления спекл-шума и сжатия изображения позволит осуществлять разложение и восстановление сигнала в рамках единого процесса. Таким образом, необходимо создать древовидный алгоритм анализа текстуры, алгоритм «мягкого»/«жесткого» ограничения вейвлет-коэффициентов для подавления спекл-шума и алгоритм однородной декомпозиции дерева квадрантов (для делимого случая, для неразделимого — дерева половинок) с помощью модифицированной схемы метода пространственно-упорядоченных иерархических деревьев (см. разд. 6.3).

Традиционное пирамидальное ВП рекурсивно разлагает каждый новый уровень сигнала в более низкочастотные (НЧ) составляющие. Так как наиболее важная информация о текстуре часто появляется в средних частотных составляющих, то простое разложение на все более НЧ составляющие не окажется оптимальным для РСА изображений. Поэтому нужно определять те частотные составляющие, которые содержат существенную энергию текстур, и далее разлагать именно их.

Декомпозиция дерева квадрантов заключается в делении многомерного изображения на блоки (участки), являющиеся более однородными, чем само изображение. В делимом двумерном случае изображение делится на 4 части, в неразделимом двумерном двухканальном случае — на 2 части. Соответственно в делимом трехмерном случае изображение делится на 8 частей, а в неразделимом трехмерном двухканальном случае — на 2 части. Для каждого блока проверяется условие однородности. Если блок однороден, в дальнейшем он не делится. Если же он неоднороден, процесс деления на 4 новых субблока (на 2 новых субблока в неразделимом случае) продолжается. В итоге будут получены два набора блоков — множество однородных блоков и множество неоднородных блоков.

Данный метод позволит задавать степень подавления спекл-шума; применять «мягкое»/«жесткое» ограничение для всех вейвлет-коэффициентов, кроме самой НЧ составляющей (после квантования коэффициентов число бит, необходимых для их кодирования, уменьшится); кодировать однородные области; кодировать неоднородные области с помощью модифицированного метода пространственно-упорядоченных иерархических деревьев; для случая кодирования без потерь можно применять арифметическое кодирование оставшихся после квантования вейвлет-коэффициентов.

### 1.3. Обработка мультиспектральных сигналов

Мультиспектральные, или многоканальные системы дистанционного зондирования (ДЗ) поверхности Земли с аэрокосмических носителей широко применяются для решения задач экологии, океанографии, геологии, картографии, в сельском хозяйстве. Радиолокационные системы (РС) ДЗ способны обеспечить высокую оперативность получения информации вне зависимости от освещенности подстилающей поверхности и также обладают меньшей зависимостью эффективности функционирования от погодных условий по сравнению с оптическими и инфракрасными средствами ДЗ. Кроме того, способность радиоволн дециметрового и метрового диапазонов проникать сквозь растительный покров и сухую почву обуславливает возможность применения РС ДЗ для обнаружения подповерхностных объектов естественного и искусственного происхождения, а также для картографирования слоев почв. При этом для радиодиапазона целесообразно применять многоканальные РС ДЗ, которые одновременно формируют несколько радиолокационных изображений (РЛИ) участка подстилающей поверхности, используя различные рабочие длины и поляризации радиоволн, различные углы зондирования.

Для обеспечения приблизительно одинаковой разрешающей способности в многоканальных (многочастотных) РС ДЗ совместно используют радиолокаторы бокового обзора (РБО) и радиолокаторы с синтезированием апертуры (РСА). При этом РЛИ, полученные РБО и РСА, значительно отличаются по статистическим характеристикам мультипликативных помех (спекла) — их плотности распределения вероятности и интенсивности (относительной дисперсии). Кроме того, компонентные изображения, формируемые подсистемами ДЗ, могут быть смещены друг относительно друга, иметь различные размеры, масштаб и пространственную ориентацию. Примером такой системы является спектрометр видимого и инфракрасного диапазонов AVIRIS [115]. Покрывая достаточно широкий диапазон волн, данная система имеет 224 канала записи 16-битной информации об изображениях размером  $512 \times 614$  пикселей каждое. Тем самым один мультиспектральный сигнал занимает примерно 134 МБ. При необходимости оперативной оценки и обработки сигнала, а также при его передаче и/или архивировании возникают проблемы, связанные с его большим объемом. В связи с этим очень актуальной становится задача создания средств автоматической оценки и обработки сигналов ДЗ.

Вопросам фильтрации одноканальных РЛИ в последние 20 лет уделялось значительное внимание. С целью повышения качества многоканальных РЛИ, устранения флуктуационных и импульсных помех часто

используются нелинейные адаптивные алгоритмы фильтрации в скользящем окне, применяемые обычно раздельно для каждого компонента мультиспектрального изображения. К преимуществам такого подхода следует отнести возможность выбора наилучшего алгоритма фильтрации в зависимости от типа системы формирования изображения и характеристик помех, сравнительно невысокие вычислительные затраты, сравнительную простоту программной (или аппаратной) реализации.

Как показано в [220], отдельные кадры мультиспектрального сигнала (рис. 1.2) могут обладать различными шумовыми свойствами и очень высокой степенью коррелированности между кадрами (рис. 1.3 и 1.4).

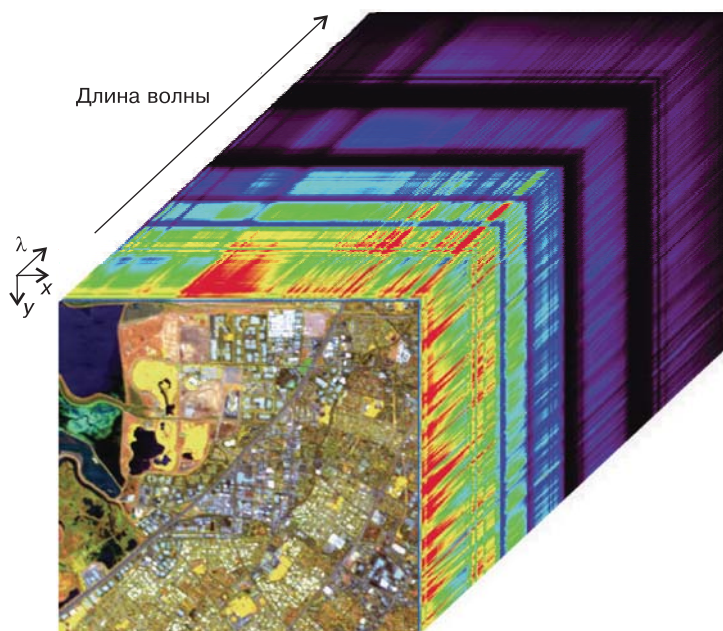
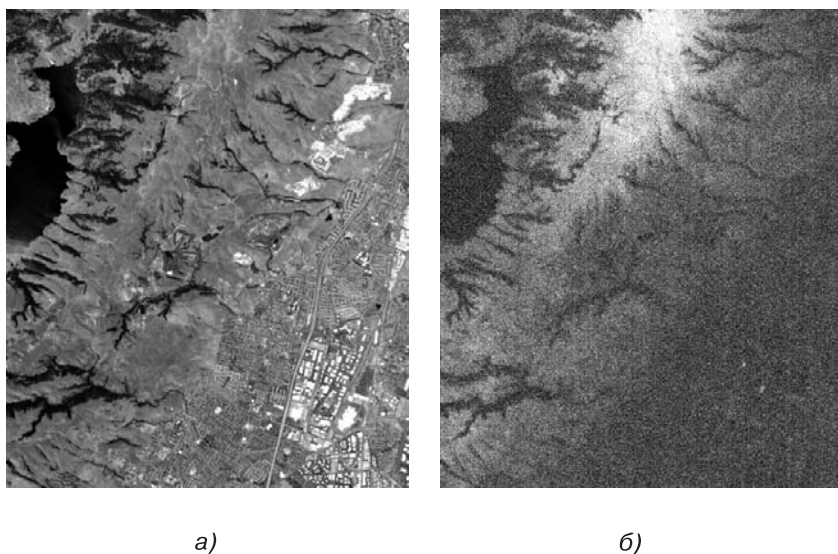


Рис. 1.2. Пример мультиспектрального сигнала

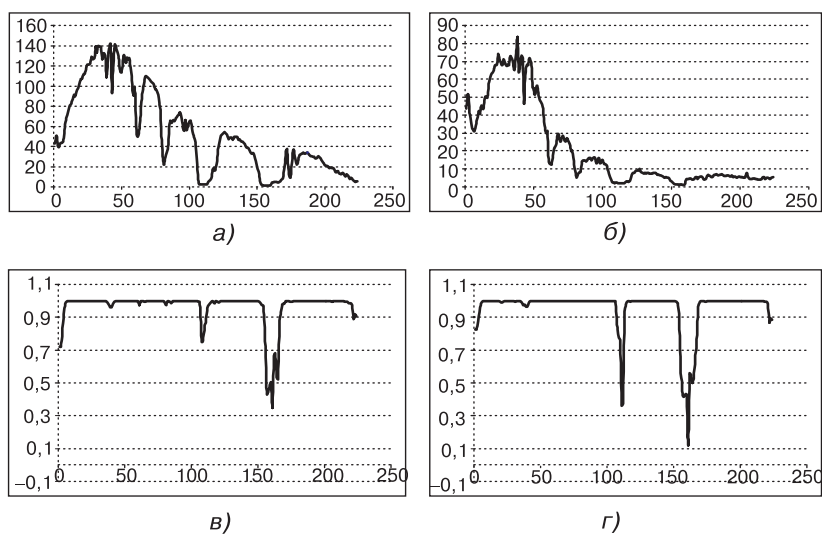
Можно заметить, что более низкий коэффициент корреляции для некоторых кадров многоканального сигнала ДЗ обусловлен высоким уровнем шума (см. рис. 1.4). Это особенно заметно, если сравнить зависимости ОСШ (рис. 1.4, *a*, *б*) и ПОСШ (рис. 1.4, *д*, *е*) и коэффициента корреляции (рис. 1.4, *в*, *г*).

Применение известных алгоритмов фильтрации для каждого кадра в отдельности не позволит в полной мере учитывать и эффективно использовать корреляционные связи между компонентами многоканальных сигналов. Разработка и применение методов и средств декорреляции таких сигналов с помощью ММ многоскоростных систем позволит существенно сжимать (с потерями или без потерь) и эффективно обрабаты-



**Рис. 1.3.** Кадры мультиспектрального сигнала [220]: а) кадр с высоким ОСШ; б) кадр с низким ОСШ

вать мультиспектральные сигналы ДЗ. Схожие задачи решаются при обработке ММ медицинских сигналов рентгеновской и ультразвуковой томографии.



**Рис. 1.4.** Характеристики двух мультиспектральных сигналов [220]: а) сигнал 1 (ОСШ); б) сигнал 2 (ОСШ); в) сигнал 1 (коэффициент корреляции); г) сигнал 2 (коэффициент корреляции)

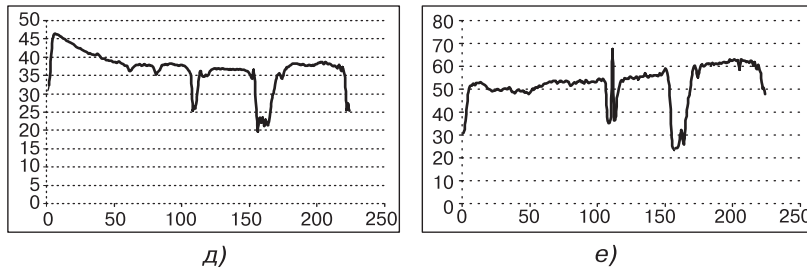


Рис. 1.4 (продолжение). *д)* сигнал 1 (ПОСШ); *е)* сигнал 2 (ПОСШ)

При применении методов компонентной фильтрации на основе порядковых статистик для обработки многоканальных изображений может наблюдаться эффект ложных границ, обусловленный, при воздействии помех, смещением границ объектов (перепадов двумерного сигнала) относительно их истинного значения. Учитывая то, что коэффициент корреляции между, например, РЛИ миллиметрового и сантиметрового диапазонов при линейном разрешении около 30 м имеет порядок 0,5–0,8 и для компонентов многоканального РЛИ при значительном разnose рабочих частот помехи можно считать независимыми, при вторичной обработке данных многоканального ДЗ для повышения эффективности сохранения границ и мелких деталей целесообразно так или иначе использовать отмеченное свойство информационных составляющих компонентных изображений.

Ниже будет предложен алгоритм редукции разностей вейвлет-коэффициентов, который был разработан для сжатия мультиспектральных сигналов.

#### 1.4. Системы визуализации ММ сигналов

В различных областях физики, химии, биологии, аэрофотосъемки и др. имеются огромные ММ наборы данных, которые необходимо визуализировать, анализировать и обрабатывать. Имеются многочисленные сферы преимущественного применения будущих систем ММ визуализации: телевидение, реклама, архитектура, не виртуальная, а «углубленная» реальность (с полным погружением), безопасность, системы автоматизированного проектирования и конструирования, управление воздушным движением, военные приложения, дистанционное присутствие, многофункциональные мониторы, мобильные телефоны и PDA, системы индикации на лобовом стекле кабины экипажа самолета или автомобиля, игровая индустрия и многие другие.

Ниже рассмотрены вопросы преобразования 2-D и 3-D сигналов с целью их сжатия. Рассматривается случай, когда ММ сигнал регистрируется только с одной точки наблюдения (single-view). Однако предложенные алгоритмы могут быть также обобщены на случай, когда регистрация (съемка) ведется с нескольких точек наблюдения (multi-view; см. рис. 1.5). Учитывая ограниченные сетевые ресурсы, доступные для передачи таких сигналов, а также высокие требования к степени сжатия и качеству восстановленного после сжатия ММ сигнала, требуется разработать новые эффективные, с низкой вычислительной сложностью методы обработки ММ сигналов. Решение такой задачи лежит в направлении использования «истинных» – неразделимых – многомерных подходов (т. е. систем, не представимых в ММ пространственной или частотной области в виде произведения одномерных многоскоростных систем). В качестве альтернативы обыкновенным разделимым схемам, основанным на разделимом дискретном косинусном преобразовании и схемах компенсации движения, предлагаются неразделимые методы кодирования ММ сигналов, основанные на применении неразделимого ММ вейвлет-преобразования и методах частичной сортировки ММ вейвлет-коэффициентов (см. разд. 6.3).

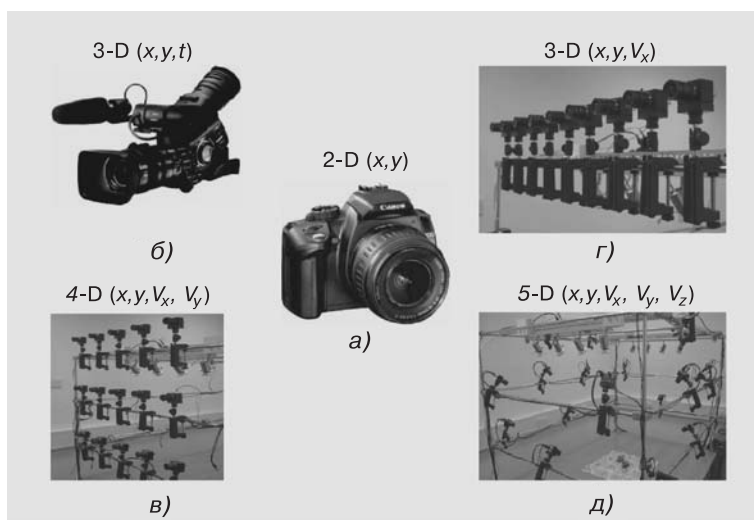


Рис. 1.5. Варианты регистрируемых многомерных функций [121]

#### 1.4.1. Системы трехмерного телевидения 3D-TV и с произвольной точкой наблюдения FTV

Приведенные выше приложения нуждаются в специальных ММ средствах визуализации. Создание систем трехмерного телевидения 3D-TV и систем

телевидения с произвольной точкой наблюдения (free viewpoint TV) FTV может стать стартовой точкой для таких систем визуализации. Современные достижения в науке и повышенный спрос со стороны приложений позволили начать разработку таких систем телевидения. Создание системы включает в себя вопросы обработки сигналов, записи, трехмерного воспроизведения (рис. 1.6 и 1.7), сжатия, передачи, создания трехмерных дисплеев и т. д. Среди приложений нужно упомянуть наряду с системами мультимедиа также вещание для 3D-TV, трехмерное кино, применения в медицинских целях, в реальных трехмерных играх, телеконференции с эффектом присутствия, показ культурных ценностей.

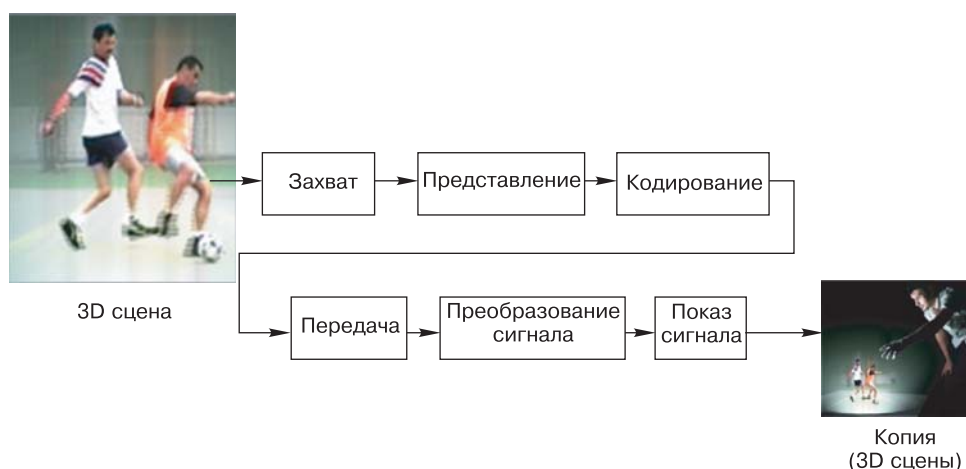


Рис. 1.6. Базовые компоненты системы трехмерного ТВ [208]

До недавнего времени фотография, кино и телевидение являлись различными системами регистрации и обработки изображений. Данные системы, основанные на попиксельной регистрации ММ сигнала, развиваются в направлении увеличения числа пикселей. И хотя система телевидения сверхвысокой четкости имеет в сотни раз больше пикселей, чем обыкновенный телевизор, однако при этом используется только одна точка наблюдения.

В будущем требование увеличения числа пикселей не останется главенствующим и будет заменено на необходимость записи нескольких точек наблюдения, т. е. большего числа световых лучей в 3D пространстве. Это является эволюцией систем от опоры на запись отдельных пикселей, регистрируемых с одной точки наблюдения, к записи многих лучей в системе со многими точками наблюдения. Технологии записи световых лучей и их отображения развиваются быстро, создав системам 3DTV/FTV реальную возможность для прорыва на потребительский рынок в ближайшем



будущем. Обработка изображений, снимаемых с нескольких точек наблюдения, откроет дорогу технологиям многомерной обработки сигналов, основанным на регистрации лучей, рассматриваемых по отдельности.



Рис. 1.7. Система записи сигналов для FTV и примеры созданных видов [201]

На сегодняшний день известно несколько систем 3D-TV. Первыми были австралийская компания DDD, разрабатывающая 3-D мониторы, для которых число точек съемки равно 7–9, а также европейская система ATTEST (Advanced Three-Dimensional Television Systems Technologies), разрабатываемая в рамках европейского проекта IST. В последней системе сигнал включает как видеoinформацию, так и сведения о глубине. Для сжатия подобных сигналов используется стандарт MPEG-2 [153]. Впервые система трехмерного телевидения была представлена институтом Fraunhofer ННІ (Fraunhofer Nachrichtentechnik Heinrich-Hertz-Institut) на Международной конвенции по радио- и телевидению (International Broadcast Convention — IBC) в 2004 г.

Распределяющая часть состояла из DTV-рекордера – генератора (DVRG) от Rhode & Schwartz, который использовался для воспроизведения в реальном времени заранее записанного с помощью MPEG-2 транспортного потока данных. С помощью DVB-T передатчика (SFQ) 3-D телевизионный сигнал передавался на выставочный стенд. Приемная часть состояла из PC с PCI DVB-T картой от TechnoTrend. Принимаемый MPEG-2 транспортный поток данных был программно демультиплексирован, и соответствующие синхронизированные видеопотоки были переданы на 3-D рендерер, который генерировал виртуальные стереоскопические изображения на 3-D мониторах Free2C от Fraunhofer ННІ (см. рис. 1.8).

В [185, 233] представлен специальный монитор, созданный в Токийском университете (Япония), для удаленного просмотра 3-D изображений компьютерной графики без применения каких-либо дополнительных очков. Изображения создаются с помощью рендеринга (процесса построения и отображения графической сцены или 3-D объекта по его описанию в растровую цифровую форму) световых полей и алгоритма распределения пикселей при создании интегральной фотографии и/или интеграль-