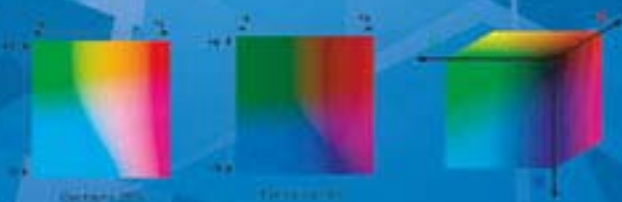


**В.П. Дворкович**  
**А.В. Дворкович**

## Цифровые видеoinформационные системы (теория и практика)





*Издание осуществлено при финансовой  
поддержке Российского фонда фундаментальных  
исследований по проекту № 12-07-07104*

УДК 004.421, 004.932, 519.722, 621.317.799, 621.397

ББК 32.81

Д24

*Рецензенты: д.т.н., профессор Калмыков В.В.;*

*д.т.н., профессор Сагдуллаев Ю.С.*

**Д24 Дворкович В.П., Дворкович А.В.**

**Цифровые видеoinформационные системы (теория и практика)**

**Москва: Техносфера, 2012. – 1008с. ISBN 978-5-94836-336-3**

Книга посвящена теоретическим основам и практической реализации цифровых видеoinформационных систем. Материал содержит девять частей, состоящих из 23 глав.

В Части I изложены проблемы цифрового преобразования статических и динамических изображений, оцениваются объемы информации при преобразовании изображений в цифровую форму. Часть II посвящена исследованиям проблем статистической и визуальной избыточности изображений, излагаются методы эффективного энтропийного кодирования, оцениваются возможности использования визуальной избыточности статических и динамических изображений. В Части III рассматриваются непосредственное кодирование, кодирование с предсказанием и групповое кодирование изображений, методы блочного и фрактального кодирования, кратномасштабная обработка изображений. В Части IV излагаются методы повышения качества внутрикадрового кодирования статических изображений, принципы анализа движения в динамических изображениях, идеология обработки изображений при кратномасштабном анализе. Часть V посвящена анализу методов и стандартов кодирования статических и динамических изображений, рассмотрены некоторые проблемы реализации кодирующих устройств и визуализации их параметров. В Части VI анализируются основные характеристики и цифровое представление речевой и звуковой информации, приводится описание основных стандартов кодирования речи и звука. Часть VII посвящена анализу основных методов канального кодирования и модуляции цифровой информации. В Части VIII приводится описание основных стандартов цифрового ТВ вещания. Часть IX посвящена изложению стандартов мультимедийного телерадиовещания, а также проблемам реализации систем видеоконференцсвязи на базе использования рекомендаций ИТУ-Т.

Книга адресована студентам и специалистам телекоммуникационной отрасли, работающим в области обработки и передачи видео- и звуковой информации.

УДК 004.421, 004.932, 519.722, 621.317.799, 621.397

ББК 32.81

© 2012, Дворкович В.П., Дворкович А.В.

© 2012, ЗАО «РИЦ «Техносфера»,  
оригинал-макет, оформление.

ISBN 978-5-94836-336-3

# Содержание

|   |           |
|---|-----------|
| Вступительное слово академика РАН А.С. Бугаева .....  | 13        |
| Предисловие .....   | 16        |
| <b>Часть I. Видеоинформационные приложения и объем цифровой информации</b>                            |           |
| Введение .....  | 30        |
| <b>Глава 1</b>  |           |
| <b>Форматы изображений. Статические и динамические эталонные изображения .....</b>                    | <b>33</b> |
| 1.1. Аналоговые и цифровые растровые изображения .....  | 33        |
| 1.2. Цветовые системы .....   | 39        |
| 1.3. Статические и динамические эталонные изображения .....   | 47        |
| <b>Глава 2</b>  |           |
| <b>Системы формирования и передачи видеоинформации .....</b>  | <b>52</b> |
| 2.1. Монохромное телевидение .....  | 52        |
| 2.2. Цветное телевидение .....  | 55        |
| 2.2.1. Система NTSC .....   | 57        |
| 2.2.2. Система PAL .....  | 59        |
| 2.2.3. Система SECAM .....  | 62        |
| 2.2.4. Цифровые компонентные телевизионные сигналы .....  | 67        |
| 2.3. Телевидение повышенной, высокой и сверхвысокой четкости, «цифровое кино» .....                   | 70        |
| 2.4. Видеотелефония и видеоконференцсвязь, домашнее видео .....                                       | 71        |
| 2.5. Графические изображения, факсимильные системы и интерактивные системы передачи изображений ..... | 72        |
| <b>Глава 3</b>  |           |
| <b>Цифровое представление видеоинформации .....</b>   | <b>75</b> |
| 3.1. Представление изображения конечным объемом данных .....  | 75        |
| 3.2. Фурье-преобразование, теорема о дискретизации .....  | 79        |
| 3.3. Изображение, изменяющееся во времени .....   | 82        |
| 3.4. Квантование. Импульсно-кодовая модуляция .....   | 84        |
| Литература к части I .....  | 89        |

## Часть II. Статистическая и визуальная избыточность изображений

Введение ..... 93

### Глава 4

**Статистическая избыточность дискретизированных данных**..... 95

- 4.1. Информационная теорема ..... 95
- 4.2. Виды статистического кодирования ..... 96
  - 4.2.1. Методы представления целых чисел..... 97
  - 4.2.2. Алгоритм Шеннона–Фано..... 100
  - 4.2.3. Алгоритм Хаффмана..... 101
  - 4.2.4. Блочное и условное кодирование ..... 105
  - 4.2.5. Арифметическое кодирование ..... 107
  - 4.2.6. Словарные методы кодирования дискретной информации ..... 109
  - 4.2.7. Статистические методы моделирования дискретной информации 115
  - 4.2.8. Контекстные методы энтропийного кодирования ..... 127
- 4.3. Кодирование с преобразованием ..... 136
  - 4.3.1. Кодирование с предсказанием ..... 136
  - 4.3.2. Кодирование с дискретным преобразованием ..... 138
- 4.4. Статистика монохромных и цветных изображений ..... 142
  - 4.4.1. Статистика монохромных изображений без преобразования ..... 142
  - 4.4.2. Статистика монохромных изображений с преобразованием..... 145
  - 4.4.3. Статистика цветных изображений..... 146
- 4.5. Кодирование с сокращением объема передаваемой информации..... 147

### Глава 5

**Визуальная избыточность изображений**..... 150

- 5.1. Заметность пространственных изменений яркости изображений ..... 150
- 5.2. Заметность временных изменений яркости изображений..... 157
- 5.3. Влияние помех..... 158
- 5.4. Специфические особенности восприятия цветов..... 159
- 5.5. Методы субъективной оценки качества изображений..... 162
- 5.6. Компьютерные методы хранения изображений..... 166

**Литература к части II** ..... 178

## Часть III. Основные методы сжатия изображений

Введение ..... 185

### Глава 6

**Непосредственное кодирование изображений и кодирование с предсказанием** ..... 188

- 6.1. Импульсно-кодовая модуляция..... 188
- 6.2. Кодирование изображений с предсказанием, дифференциальная импульсно-кодовая модуляция ..... 191

|        |  |     |
|--------|--|-----|
| 6.3.   | Основные виды предсказания.....                      | 197 |
| 6.3.1. | Внутрикадровое предсказание .....                    | 197 |
| 6.3.2. | Межкадровое предсказание.....                        | 199 |
| 6.4.   | Квантование сигналов, ошибки предсказания .....      | 201 |
| 6.5.   | Помехоустойчивость кодирования с предсказанием ..... | 206 |

## Глава 7

|  |   |     |
|--|---|-----|
| <b>Групповое кодирование изображений .....</b> | <b>208</b>  |     |
| 7.1.   | Дискретные линейные ортогональные преобразования..... | 208 |
| 7.1.1.   | Дискретное преобразование Фурье.....                  | 210 |
| 7.1.2.   | Преобразование Хаара .....                            | 213 |
| 7.1.3.   | Преобразование Уолша–Адамара .....                    | 214 |
| 7.1.4.   | Дискретное синусное преобразование .....              | 217 |
| 7.1.5.   | Дискретные косинусные преобразования .....            | 217 |
| 7.1.6.   | Преобразование Кархунена–Лоэва .....                  | 221 |
| 7.1.7.   | Другие виды преобразований .....                      | 226 |
| 7.2.   | Квантование коэффициентов преобразования.....         | 228 |
| 7.3.   | Кодирование коэффициентов преобразования .....        | 231 |
| 7.4.   | Межкадровое или трехмерное кодирование .....          | 233 |

## Глава 8

|   |  |     |
|---|--|-----|
| <b>Другие методы кодирования изображений.....</b> | <b>235</b>   |     |
| 8.1.  | Кодирование с использованием гибридных преобразований .....  | 235 |
| 8.2.  | Другие методы блочного и интерполяционного кодирования ..... | 236 |
| 8.3.  | Фрактальные методы кодирования изображений.....              | 244 |

## Глава 9

|  |   |     |
|--|---|-----|
| <b>Вейвлеты и кратномасштабная обработка изображений .....</b> | <b>252</b>  |     |
| 9.1.   | Непрерывное вейвлет-преобразование.....   | 253 |
| 9.2.   | Дискретное вейвлет-преобразование.....  | 256 |
| 9.3.   | Кратномасштабный вейвлет-анализ .....   | 258 |
| 9.4.   | Основные сведения о субполосном кодировании.....                                      | 262 |
| 9.4.1.   | КИХ-фильтры с нечетным числом отсчетов цифровой решетки и линейной (нулевой) ФЧХ..... | 265 |
| 9.4.2.   | КИХ-фильтры с четным числом отсчетов цифровой решетки....                             | 269 |
| 9.4.3.   | Квадратурно-зеркальные КИХ-фильтры .....  | 273 |
| 9.4.4.   | Кратномасштабное дискретное вейвлет-преобразование изображений .....                  | 274 |
| 9.4.5.   | Использование банков трехполосных КИХ-фильтров при обработке изображений .....        | 275 |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| <b>Литература к части III.....</b> | <b>281</b> |
|------------------------------------|------------|

## Часть IV. Внутрикадровая и межкадровая обработка изображений

Введение ..... 287

### Глава 10

**Внутрикадровое кодирование изображений** ..... 290

10.1. Изменения коэффициентов квантования блоков в JPEG-подобных алгоритмах видеокомпрессии ..... 290

10.2. Направленное пространственное внутрикадровое предсказание ..... 295

10.2.1. Режим предсказания пикселей яркости блоков  $4 \times 4$  ..... 297

10.2.2. Режим предсказания пикселей яркости блоков  $8 \times 8$  ..... 301

10.2.3. Режим предсказания пикселей яркости блоков  $16 \times 16$  ..... 304

10.2.4. Режим предсказания пикселей блоков цветности ..... 305

10.3. Уменьшение влияния блокинг-эффекта ..... 308

### Глава 11

**Обработка изображений при кратномасштабном анализе** 314

11.1. Оценка энергетических характеристик изображения в зависимости от вида вейвлет-базиса разложения ..... 315

11.2. Выбор маски квантования высокочастотных компонент вейвлет-преобразования изображений ..... 317

11.3. Обработка тестовых изображений двухполосными вейвлет-фильтрами 322

11.4. Обработка тестовых изображений трехполосными вейвлет-фильтрами 323

### Глава 12

**Методы анализа и компенсации движения в динамических изображениях** ..... 329

12.1. Основные методы анализа движения ..... 331

12.1.1. Метод полного перебора ..... 332

12.1.2. Логарифмический, комбинированный по двум направлениям, трехшаговый, иерархический методы ..... 332

12.1.3. Методы, основанные на оптическом уравнении ..... 335

12.1.4. Использование временной и пространственной корреляции для поиска векторов движения ..... 336

12.1.5. Использование временной и пространственной корреляции векторов с оптимизацией возмущения битового потока ..... 337

12.1.6. Метод полного перебора с преобразованием Фурье ..... 338

12.1.7. Методы фазовой корреляции ..... 339

12.1.8. Оптимизация поиска векторов движения по стандарту MPEG-4 (метод быстрого поиска MVFAST) ..... 340

12.2. Повышение эффективности анализа движения по опорным точкам .. 344

12.3. Дополнительные возможности компенсации движения деталей в динамических изображениях ..... 355

12.4. Анализ смены сюжета в динамических изображениях ..... 361

**Литература к части IV** ..... 366

## Часть V. Основные стандарты цифрового кодирования видеоинформации

Введение ..... 369

### Глава 13

**Стандарты кодирования статических изображений** ..... 371

13.1. Стандарт JPEG и его модификация ..... 372

13.2. Стандарт JPEG-2000 ..... 377

### Глава 14

**Стандарты кодирования динамических изображений** ..... 387

14.1. H.261 — первый стандарт видеокодирования МСЭ ..... 390

14.2. H.263. Видеокодирование для систем связи с низкой пропускной способностью ..... 395

14.3. MPEG-1 — кодирование видео- и аудиоинформации для цифровых систем с объемом данных приблизительно до 1,5 Мбитов/с ..... 402

14.4. MPEG-2. Кодирование динамических изображений и связанной с ними звуковой информации ..... 406

14.4.1. Общие положения ..... 407

14.4.2. Совместимость стандартов MPEG-1 и MPEG-2 ..... 410

14.4.3. Масштабируемость в MPEG-2 ..... 411

14.4.4. Профили и уровни ..... 414

14.4.5. Транспортный и программный потоки MPEG-2 ..... 415

14.4.6. Видеопоток стандарта MPEG-2 ..... 421

14.4.7. Структура битового потока видеопоследовательности стандарта MPEG-2 ..... 429

14.5. MPEG-4. Обобщенное кодирование аудиовизуальных объектов ..... 454

14.5.1. Кодированное представление мультимедийных объектов ..... 455

14.5.2. Аудиообъекты ..... 457

14.5.3. Видеообъекты ..... 458

14.6. H.264/MPEG-4 часть 10 AVC — улучшенное видеокодирование ..... 467

14.6.1. Профили и уровни стандарта H.264/AVC ..... 468

14.6.2. Эффективность сжатия в стандарте H.264/AVC ..... 471

14.6.3. Уровень сетевой абстракции ..... 476

14.6.4. Уровень видеокодирования ..... 478

14.6.5. Преобразование, масштабирование и квантование ..... 490

14.6.6. Деблокирующая фильтрация ..... 497

14.6.7. Энтропийное кодирование ..... 498

14.7. Некоторые проблемы реализации видеокодирующих систем ..... 503

14.7.1. Методика построения промежуточных кадров видеопоследовательности ..... 503

14.7.2. Методика регулировки потока при сжатии динамических изображений ..... 506

14.7.3. Анализ смены сюжета ..... 516

14.7.4. Оценка быстродействия кодирования изображений ..... 519



|   |            |
|---|------------|
| 14.7.5. Возможности кодирования стереоскопических изображений<br>в рамках совместимости со стандартами MPEG ..... | 521        |
| 14.8. Визуализация параметров видеокодирования .....  | 528        |
| <b>Литература к части V .....</b>   | <b>537</b> |

## **Часть VI. Основные методы кодирования речевой и звуковой информации**

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| <b>Введение .....</b> | <b>543</b> |
|-----------------------|------------|

### **Глава 15**

#### **Основные характеристики и цифровое представление звуковой информации .....**

|  |     |
|--|-----|
| 15.1. Статистика мгновенных значений и уровней звуковых сигналов.....              | 548 |
| 15.2. Спектральные характеристики звуковых сигналов .....                          | 553 |
| 15.3. Огибающая и мгновенная частота звуковых сигналов.....                        | 558 |
| 15.4. Пространственное восприятие звуковых сигналов .....                          | 561 |
| 15.5. Основные принципы цифровых преобразований звуковых сигналов .....            | 564 |
| 15.6. Аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование<br>звуковых сигналов..... | 568 |
| 15.6.1. Импульсно-кодовая модуляция (ИКМ) .....                                    | 568 |
| 15.6.2. Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (ДИКМ) .....                  | 569 |
| 15.6.3. Сигма-дельта-модуляция (СДМ).....  | 571 |
| 15.7. Принципы кодирования речевой и звуковой информации.....                      | 574 |
| 15.7.1. Принципы кодирования речевой информации.....                               | 574 |
| 15.7.2. Принципы кодирования звуковой информации .....                             | 577 |
| 15.8. Предысказания звуковых сигналов при цифровом кодировании .....               | 591 |

### **Глава 16**

#### **Основные стандарты кодирования речевой информации 592**

|   |     |
|---|-----|
| 16.1. G.711 — стандарт кодирования речи с применением ИКМ.....                            | 593 |
| 16.2. G.722 — кодирование речи со спектром до 7 кГц в цифровой поток<br>64 кбитов/с ..... | 593 |
| 16.3. G.723.1 — речевой кодек с двумя скоростями<br>потока — 5,3 и 6,3 кбитов/с .....     | 596 |
| 16.4. G.726 — речевой кодек АДИКМ со скоростями 40, 32, 24, 16 кбитов/с.....              | 602 |
| 16.5. G.727 — речевой кодек с алгоритмом вложенной АДИКМ.....                             | 603 |
| 16.6. G.728 — речевой кодек с выходным потоком 16 кбитов/с и малой<br>задержкой.....      | 605 |
| 16.7. G.729 — речевой кодек со скоростью 8 кбитов/с .....                                 | 607 |
| 16.8. GSM — речевой кодек для систем сотовой связи .....                                  | 611 |
| 16.9. GIPS iLBC — кодек, предназначенный для передачи речи<br>по IP-сетям.....            | 616 |
| 16.10. Speex — свободный кодек, предназначенный для передачи речи по<br>IP-сетям.....     | 621 |



|   |            |
|---|------------|
| <b>Глава 17</b>   |            |
| <b>Стандарты кодирования звуковой информации .....</b>  | <b>624</b> |
| 17.1. MPEG-1 Audio — кодирование аудиоинформации для цифровых систем с потоком до 1,5 Мбит/с.....                 | 625        |
| 17.1.1. MPEG-1 Audio Layer-1 — профессиональная система кодирования аудиоинформации с высоким качеством.....      | 626        |
| 17.1.2. MPEG-1 Audio Layer-2 — система кодирования аудиоинформации для высококачественного телерадиовещания ..... | 632        |
| 17.1.3. MPEG-1 Audio Layer-3 — система кодирования аудиоинформации для Интернет-вещания .....                     | 634        |
| 17.2. MPEG-2 Audio — стандарт кодирования аудиоинформации для многоканального стереофонического вещания.....      | 640        |
| 17.3. MPEG-2 AAC — стандарт усовершенствованного аудиокодирования.  | 643        |
| 17.4. MPEG-4 Audio — стандарт аудиокодера для мультимедийных приложений.....                                      | 645        |
| 17.5. Dolby AC3 — стандарт аудиокодера для телевидения и других применений .....                                  | 647        |
| 17.6. Совершенствование алгоритмов сжатия звука на основе стандарта AAC .....                                     | 651        |
| 17.6.1. Общие алгоритмы кодека AAC.....   | 654        |
| 17.6.2. Метод спектрального дублирования SBR.....   | 658        |
| 17.6.3. Параметрическое стереокодирование PS .....  | 663        |
| 17.6.4. Конфигурации режимов работы кодеков AAC и HE-AAC .....  | 664        |
| <b>Глава 18</b>   |            |
| <b>Подавление акустического эха в системах телеконференцсвязи.....</b>  | <b>667</b> |
| 18.1. Основные положения .....  | 667        |
| 18.2. Алгоритмы подавления акустического эха .....  | 670        |
| 18.3. Принципы линейной адаптивной фильтрации.....  | 674        |
| 18.4. Детектор двойного разговора.....  | 676        |
| 18.5. Подавление акустического эха на базе фильтра Калмана .....  | 679        |
| 18.6. Особые случаи .....   | 681        |
| 18.7. Метрологические требования к подавлению акустического эха.....  | 682        |
| <b>Литература к части VI.....</b>   | <b>684</b> |
| <b>Часть VII. Основные методы и системы канального кодирования и модуляции цифровой информации</b>                |            |
| <b>Введение .....</b>   | <b>688</b> |
| <b>Глава 19</b>   |            |
| <b>Помехоустойчивое кодирование в системах передачи цифровой информации.....</b>                                  | <b>691</b> |
| 19.1. Принципы кодирования источника сообщений .....  | 691        |
| 19.1.1. Теоретические предпосылки помехоустойчивого кодирования ....  | 692        |

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| 19.1.2.  | Классификация помехоустойчивых кодов .....                           | 696 |
| 19.2.    | Линейные блочные коды .....  | 698 |
| 19.2.1.  | Математическое описание линейных блочных кодов .....                 | 698 |
| 19.2.2.  | Свойства линейных блочных кодов .....                                | 701 |
| 19.2.3.  | Практические примеры блочных кодов.....                              | 704 |
| 19.3.    | Циклические коды .....   | 708 |
| 19.3.1.  | Понятие циклического кода .....                                      | 708 |
| 19.3.2.  | Порождающая и проверочная матрицы циклического кода .....            | 710 |
| 19.3.3.  | Систематическое кодирование циклическими кодами .....                | 712 |
| 19.3.4.  | Обнаружение ошибок.....  | 714 |
| 19.3.5.  | Исправление однократных ошибок.....                                  | 714 |
| 19.3.6.  | Общий принцип декодирования циклических кодов.....                   | 715 |
| 19.3.7.  | Арифметика полей Галуа.....  | 716 |
| 19.3.8.  | Циклические коды Хэмминга .....                                      | 722 |
| 19.3.9.  | CRC-коды .....   | 723 |
| 19.3.10. | Двоичные BCH-коды. ....  | 724 |
| 19.3.11. | Коды Рида–Соломона .....   | 726 |
| 19.4.    | Сверточные коды .....  | 728 |
| 19.4.1.  | Систематические сверточные коды .....                                | 730 |
| 19.4.2.  | Управление скоростью кодирования.....                                | 732 |
| 19.4.3.  | Представление сверточных кодеров в виде цифровых фильтров.....       | 733 |
| 19.4.4.  | Диаграммы состояний и кодовые решетки .....                          | 734 |
| 19.4.5.  | Декодирование сверточных кодов .....                                 | 736 |
| 19.5.    | Турбокодирование .....   | 741 |
| 19.5.1.  | Основные положения .....   | 741 |
| 19.5.2.  | Обобщенная схема турбокодера ТСС с параллельным каскадированием..... | 742 |
| 19.5.3.  | Сверточные турбокоды .....   | 742 |
| 19.5.4.  | Декодирование турбокодов .....                                       | 744 |
| 19.5.5.  | Характеристики помехоустойчивости сверточных турбокодов ТСС.....     | 749 |
| 19.5.6.  | Блочные турбокоды.....   | 751 |
| 19.6.    | Низкоплотностные коды .....  | 753 |
| 19.6.1.  | Основные положения .....   | 753 |
| 19.6.2.  | Классификация LDPC-кодов.....  | 754 |
| 19.6.3.  | Методы построения проверочных матриц .....                           | 755 |
| 19.6.4.  | Алгоритмы декодирования низкоплотностных кодов .....                 | 761 |
| 19.6.5.  | Оценка сложности алгоритмов декодирования.....                       | 764 |

## Глава 20

### Системы модуляции и сигнального кодирования цифровой информации.....

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 20.1.   | Созвездия дискретной модуляции.....                         | 768 |
| 20.1.1. | Одномерные и двумерные созвездия .....                      | 768 |
| 20.1.2. | Сигнальные созвездия квадратурно-амплитудной модуляции .... | 769 |
| 20.1.3. | Фильтрация сигналов в передающих и приемных устройствах...  | 776 |



|  |            |
|--|------------|
| 20.2. Система многочастотной модуляции .....                                     | 778        |
| 20.2.1. Структурные схемы OFDM-модуляторов и демодуляторов.....                  | 779        |
| 20.2.2. Защитный интервал, устранение интерференции между несущими частотам..... | 782        |
| 20.2.3. Иерархические режимы OFDM-модуляции .....                                | 784        |
| 20.3. Алгоритмы синхронизации OFDM-сигналов в приемных устройствах               | 786        |
| 20.3.1. Методы демодуляции OFDM-сигнала.....                                     | 786        |
| 20.3.2. Оценка частотного смещения при приеме OFDM-сигнала .....                 | 789        |
| <b>Литература к части VII .....</b>  | <b>791</b> |

## **Часть VIII. Основные стандарты систем цифрового телевизионного вещания**

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| <b>Введение .....</b> | <b>794</b> |
|-----------------------|------------|

### **Глава 21**

|   |            |
|---|------------|
| <b>Стандарты цифрового телевизионного вещания .....</b> | <b>797</b> |
|---|------------|

|   |     |
|---|-----|
| 21.1. Стандарт цифрового телевидения ATSC.....                                | 799 |
| 21.2. Система цифрового наземного телевизионного вещания DVB-T.....           | 808 |
| 21.3. Усовершенствованная система цифрового наземного ТВ-вещания DVB-T2 ..... | 826 |
| 21.4. Система цифрового спутникового телевизионного вещания DVB-S...          | 867 |
| 21.5. Система высокоскоростного цифрового спутникового ТВ-вещания DVB-S2..... | 870 |
| 21.6. Система цифрового кабельного телевизионного вещания DVB-C.....          | 881 |
| 21.7. Система высокоскоростного цифрового кабельного ТВ-вещания DVB-C2 .....  | 883 |
| 21.8. Система наземного цифрового телевизионного вещания ISDB-T .....         | 893 |
| 21.9. Система цифрового спутникового многопрограммного ТВ-вещания ISDB-S..... | 897 |
| 21.10. Система цифрового кабельного многопрограммного ТВ-вещания ISDB-C ..... | 902 |
| 21.11. Система цифрового наземного телевизионного вещания DTMB .....          | 905 |
| 21.12. Эффективность использования систем цифрового ТВ-вещания в России ..... | 909 |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| <b>Литература к части VIII.....</b> | <b>918</b> |
|-------------------------------------|------------|

## **Часть IX. Стандарты систем мобильного радиовещания и видеоконференцсвязи**

|                       |            |
|-----------------------|------------|
| <b>Введение .....</b> | <b>921</b> |
|-----------------------|------------|

### **Глава 22**

|   |            |
|---|------------|
| <b>Стандарты цифрового мобильного радиовещания.....</b> | <b>930</b> |
|---|------------|

|  |     |
|--|-----|
| 22.1. Система мобильного телевизионного вещания DVB-H .....    | 930 |
| 22.2. Система мобильного телевизионного вещания MediaFLO ..... | 937 |
| 22.3. Система мобильного мультимедийного вещания T-DMB .....   | 940 |

- 22.4. Аудиовизуальная информационная система реального времени РАВИС ... 943  
22.5. Цифровое радиовещание DRM+ в ОБЧ-диапазоне частот..... 963

## **Глава 23**

### **Системы видеоконференцсвязи ..... 969**

- 23.1. Основные стандарты систем видеоконференцсвязи..... 969  
23.2. Возможности технологии видеоконференцсвязи ..... 985

### **Литература к части IX..... 999**

## ЧАСТЬ I

# ВИДЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ ПРИЛОЖЕНИЯ И ОБЪЕМ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

## Введение

Процесс цифровой обработки визуальной информации охватил различные виды видеоинформационных приложений и существенно расширил их спектр: кроме широко распространенного традиционного телевидения и различных экзотических разновидностей ТВ специального назначения появились и повсеместно внедряются самые различные видеоприложения — от видеотелефонии до телевидения высокой четкости (ТВЧ) и «цифрового кино» [1.1, 1.2].

Цифровые системы кодирования изображений, их передачи и приема позволяют достичь невиданного доселе уровня качества и предоставляют пользователю массу новых возможностей и новых видов услуг [1.1–1.4].

Неудивительно в связи с этим то, что цифровая обработка телевизионных и компьютерных изображений в виду ее особой важности выделилась в самостоятельную область техники, в которую входят [1.5–1.7]:

- коррекция изображений, их «препарирование», т. е. сознательное разделение на части цифровыми средствами, видоизменение этих частей и их обратная «сборка»;
- оценка параметров изображений с целью контроля качества их передачи и приема;
- преобразование и кодирование изображений для хранения или передачи по каналам связи;

- компьютерная графика, а также визуализация информации, т. е. представление массивов данных в виде различных изображений, что очень эффективно, так как облегчает решение многих задач, сложных именно своей абстрактностью.

Эта область включает также моделирование систем обработки, хранения и передачи визуальной информации по каналам связи, т. е. набор компьютерно-математических задач, необходимых для разработки новой цифровой телевизионной техники.

Разумеется, все перечисленные задачи связаны между собой — и по методам решения, и по используемым для этого техническим средствам.

Цифровая обработка изображений является, по сути, основной базой для создания нового поколения видеоинформационной техники. Без нее невыполнима реализация систем видеотелефонии, видеоконференцсвязи, цифрового интерактивного телевизионного вещания, цифрового кино. Работы по созданию таких систем уже полным ходом ведутся сегодня в технически развитых странах, и привлеченные финансовые, технические и интеллектуальные ресурсы таковы, что становится совершенно ясно: переход к цифровым видеоинформационным системам в общемировом масштабе неизбежен и является делом близкого будущего.

Именно по всем этим причинам исследования методов цифровой обработки видеоинформации должны стать одной из важнейших частей курса обучения специалистов широкого профиля, и в частности, телевидения.

Однако и сама цифровая обработка изображений в связи с особенностями проблем, стоящих на пути создания видеоинформационных систем будущего, имеет свое ядро, т. е. свою главную задачу, без решения которой невыполнимо решение всех остальных.

Это — задача так называемого сжатия изображений, т. е. уменьшения объема информации, необходимого для передачи информации по каналам связи путем сокращения содержащейся в составе изображения информационной избыточности. Таким образом, ключевыми вопросами, решение которых определяет эффективность развивающихся и вновь создаваемых систем, являются задачи компрессии видеоинформации и оценки ее качества.

Решение именно этой задачи имеет, в частности, важное значение для внедрения телевидения высокой четкости. Упомянутая «высокая четкость» в этих системах достигается увеличением как количества строк в кадре, так и количества элементов в каждой строке, а значит, резко возрастает и соответствующий каждому изображению (кадру) объем информации.

Между тем передавать эти изображения предстоит с использованием существующих каналов связи, пропускная способность которых, естественно, остается прежней. Становится очевидным, что как только будет создан эффективный и достаточно просто реализуемый алгоритм сжатия телевизионных изображений (а такие работы ведутся давно, и варианты решения этой задачи практически уже найдены), внедрение телевидения высокой четкости станет реальностью.

Однако не только для телевидения высокой четкости нужно сжатие изображений. Максимально эффективное использование существующих каналов связи является сегодня для телевидения проблемой номер один.

Частотное пространство телевидения во многих случаях ограничено, а, кроме того, крайне привлекательным представляется внедрять новые системы телеви-

дения, не меняя при этом существующую линейную каналообразующую аппаратуру. Поэтому решение такой задачи, как обеспечение возможности передачи хотя бы 4–6 программ телевидения в стандартном радиоканале, является сегодня исключительно важным, прежде всего с точки зрения экономической.

Таким образом, разработка эффективного способа сжатия изображений позволит решить сразу две задачи, равные по своей важности.

Главной функцией данного материала является создание ясного представления о сложных цифровых преобразованиях сигналов в процессе сокращения объема передаваемой визуальной информации.

Прежде чем перейти к изложению методов цифровой обработки видеоинформации, необходимо оценить ее объем для различных систем формирования и передачи изображений. Этому и посвящен первый раздел настоящего материала. В нем кратко изложены сведения об особенностях существующих стандартов телевидения, а также систем кодирования цвета, а кроме того, рассмотрены некоторые вопросы, связанные с представлением в цифровом виде сигналов различных систем передачи изображений. Следует отметить, что везде в этом разделе, где будет говориться о способах уменьшения объема информации при цифровой передаче изображений, имеются в виду широко известные тривиальные методы предварительного снижения объема цифрового потока, которые сами по себе не в состоянии обеспечить решения изложенных выше задач и не имеют ничего общего с собственно алгоритмами сжатия изображений, содержание которых изложено в последующих разделах.



# ГЛАВА I

## ФОРМАТЫ ИЗОБРАЖЕНИЙ. СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ЭТАЛОННЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ

### 1.1. Аналоговые и цифровые растровые изображения

Телевизионные и компьютерные изображения обычно воспроизводятся в виде растра, представимого непрерывной или дискретной функцией вдоль строк по горизонтали и конечным числом строк по вертикали. В аналоговом телевидении каждый кадр динамического изображения формируется путем чересстрочной развертки в виде двух последовательно передаваемых полей [1.8, 1.9].

На рис. 1.1 приведено схематичное представление чересстрочной развертки изображения. Сплошные черные линии характеризуют движение луча электронной трубки в одном поле, а пунктирные — в другом поле кадра. Тонкие серые штриховые линии характеризуют обратный ход луча по строкам и между полями.

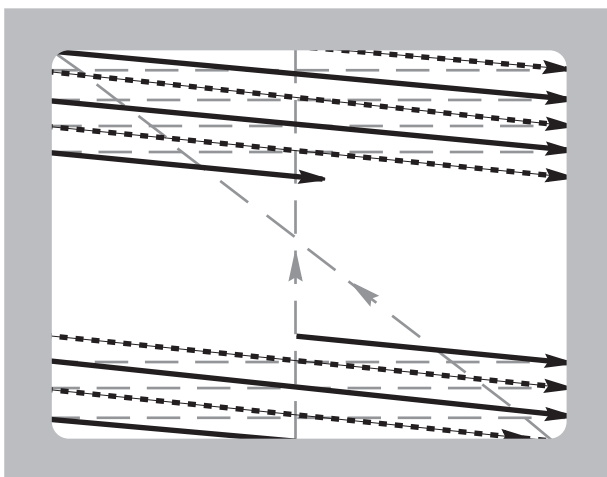


Рис. 1.1. Представление растра аналогового телевидения

Цифровые изображения разбиваются также и вдоль строк на дискретные отсчеты, называемые **пикселями** (от сокращения английских слов — **PI**Cture'S **E**lement, элемент изображения). Количество пикселей, на которые разбито изображение, определяет его детальность. Если изображение представимо в виде  $M$

строку, каждая из которых содержит  $N$  дискретных отсчетов, то массив кадра состоит из  $N \times M$  пикселей.

В различных приложениях используются разные форматы кадров. Так, эталонные компьютерные изображения часто имеют равное количество строк и пикселей в каждой строке, т. е.  $NM$ . В стандартном телевидении используется формат кадра с соотношением  $N : M = 4 : 3$ , а в телевидении высокой четкости и в цифровом кино — с соотношением  $N : M = 16 : 9$  [1.2]. Однако номенклатура используемых форматов кадра значительно более обширна, часть достаточно широко используемых форматов приведена в табл. 1.1 [1.10–1.18].

Таблица 1.1. Форматы кадра изображения

| Наименование формата                                 | Разрешение, $N \times M$ | Соотношение сторон кадра | Применение                   |
|--|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| 1  | 2                        | 3                        | 4                            |
| Общий формат обмена CIF и его производные            |                          |                          |                              |
| QQCIF  | 88 × 72                  | 11 : 9                   | Мобильные телефоны           |
| SQCIF (Sub-QCIF)                                     | 128 × 96                 | 4 : 3                    | - «-                         |
| QCIF   | 176 × 144                | 11 : 9                   | Видеоконференция (PAL/SECAM) |
| CIF  | 352 × 288                | - «-                     | - «-                         |
| iCIF   | 352 × 576                | 11:18                    | Цифровое видео (PAL/SECAM)   |
| 2CIF   | 704 × 288                | 22:9                     | - «-                         |
| 4CIF   | 704 × 576                | 11:9                     | ТВ PAL/SECAM                 |
| 16CIF  | 1408 × 1152              | - «-                     | Цифровое видео               |
| Стандартный формат изображения SIF и его производные |                          |                          |                              |
| SQSIF  | 80 × 60                  | 4:3                      | Мобильные телефоны           |
| QSIF   | 160 × 120                | - «-                     | - «-                         |
| SIF  | 320 × 240                | - «-                     | Видеоконференция (NTSC)      |
| iSIF   | 352 × 480                | 11:15                    | Цифровое видео (NTSC)        |
| 2SIF   | 704 × 240                | 44:15                    | -                            |
| 4SIF   | 704 × 480                | 22:15                    | ТВ NTSC                      |
| Форматы графических подсистем                        |                          |                          |                              |
| QQQVGA   | 80 × 60                  | 4:3                      | Мобильные телефоны           |
| QQVGA  | 160 × 120                | - «-                     | - «-                         |
| QVGA   | 320 × 240                | - «-                     | Видеоконференция             |
| VGA  | 640 × 480                | - «-                     | ТВ NTSC                      |
| WVGA   | 800 × 480                | 5:3                      | Компьютерные мониторы        |
| SVGA   | 800 × 600                | 4:3                      | - «-                         |
| XGA  | 1024 × 768               | - «-                     | - «-                         |
| WXGA   | 1280 × 768               | 5:3                      | - «-                         |
| QuadVGA  | 1280 × 960               | 8:3                      | - «-                         |
| SXGA   | 1280 × 1024              | 5:4                      | - «-                         |
| SXGA+  | 1400 × 1050              | 4:3                      | - «-                         |

Таблица 1.1 (окончание)

| 1                                    | 2         | 3     | 4                          |
|--------------------------------------|-----------|-------|----------------------------|
| WSXGA                                | 1440×900  | 8:5   | - «-                       |
| UGA, UVGA                            | 1600×1200 | 4:3   | - «-                       |
| UXGA                                 | 1600×1280 | 5:4   | - «-                       |
| WSXGA+                               | 1680×1050 | 8:5   | - «-                       |
| WUXGA                                | 1920×1200 | - «-  | - «-                       |
| QXGA                                 | 2048×1536 | 4:3   | - «-                       |
| WQXGA                                | 2560×1600 | 8:5   | - «-                       |
| QSXGA                                | 2560×2048 | 5:4   | - «-                       |
| WQSXGA                               | 3200×2048 | 25:16 | - «-                       |
| QUXGA                                | 3200×2400 | 4:3   | - «-                       |
| WQUXGA                               | 3840×2400 | 8:5   | - «-                       |
| HXGA                                 | 4096×3072 | 4:3   | - «-                       |
| WHXGA                                | 5120×3200 | 8:5   | - «-                       |
| HSXGA                                | 5120×4096 | 5:4   | - «-                       |
| WHSXGA                               | 6400×4096 | 25:16 | - «-                       |
| HUXGA                                | 6400×4800 | 4:3   | - «-                       |
| WHUXGA                               | 7680×4800 | 8:5   | - «-                       |
| Видеоформаты и телевизионные форматы |           |       |                            |
| w288p                                | 512×288   | 16:9  | Широкоформатное видео      |
| 400p                                 | 528×400   | 4:3   | Видео стандартной четкости |
| 448p                                 | 576×448   | - «-  | - «-                       |
| w384p                                | 672×384   | 16:9  | Широкоформатное видео      |
| ТВ стандарт (D1)                     | 720×480   | 3:2   | DVD-Video NTSC             |
| ТВ стандарт (D1)                     | 720×576   | 5:4   | DVD-Video PAL/SECAM        |
| w448p                                | 768×448   | 16:9  | Широкоформатное видео      |
| w480p, ED                            | 854×480   | - «-  | LCD/PDP ТВ-дисплеи         |
| w576p                                | 1024×576  | - «-  | Широкоформатное видео      |
| w720p, HD                            | 1280×720  | - «-  | ТВ повышенной четкости     |
| w768p                                | 1366×768  | - «-  | LCD/PDP ТВ дисплеи         |
| w1080p, UHD                          | 1920×1080 | - «-  | ТВЧ ATSC                   |
| w1152p, UHD                          | 2048×1152 | - «-  | ТВЧ DVB-T                  |
| w4320p, UHDV                         | 7680×4320 | - «-  | ТВ сверхвысокой четкости   |

Форматы кадров в этой таблице разбиты на 4 раздела.

Первый из них характеризует **Общий Формат Обмена CIF (Common Intermediate Format)**, обычно используемый в телеконференциях, и производ-

ные от него форматы. Второй раздел определяет параметры стандартного формата изображения **SIF (Standard Image/Interchange Format)** и его производных. Третий, наибольший раздел характеризует форматы графических подсистем, используемые в основном в компьютерных дисплеях. И, наконец, в четвертом разделе приведен перечень основных форматов, используемых в телевизионных системах стандартной и высокой четкости.

В зависимости от параметров каждого пиксела изображения можно разделить на бинарные, полутоновые, полноцветные и палитровые [1.6, 1.19].

Пикселы **бинарных изображений** имеют лишь два значения, характеризующие черные или белые точки. Такая информация используется для передачи простых изображений, например при передаче факсов.

**Полутоновые изображения** характеризуются значительным количеством уровней на каждый пиксел — его величина определяет яркость воспроизводимого элемента. Существуют различные форматы полутоновых изображений, определяющие динамический диапазон воспроизводимых яркостей элементов. Чаще всего используется формат элементов, который кодируется 8 битами на пиксел, т. е. может принимать значения от 0 до  $2^8 - 1 = 255$ . В ряде случаев, например в медицинских технологиях, используют полутоновые изображения, элементы которых кодируются до 16 битов на пиксел, т. е. число возможных градаций их яркости может составлять  $2^{16} = 65\,536$ .

Каждый пиксел **полноцветного изображения** представим в виде тройки — красной (**Red**), зеленой (**Green**) и синей (**Blue**) составляющих, каждая из которых обычно задается 8 битами — значениями от 0 до 255. Следовательно, цвет каждого пиксела определяется 24 битами, и изображение теоретически может содержать  $(2^8)^3 = 16\,777\,216$  различных цветов.

Величины красного, зеленого и синего цветов являются *координатами цвета* и обозначаются соответственно X, Y и Z. Часто описание цвета выражают *координатами цветности* — относительными величинами, которые задаются соотношениями:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}; \quad z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (1.1)$$

Из (1.1) следует, что  $x + y + z = 1$ .

На рис. 1.2 приведено схематическое изображение цветового куба хуз. Точки, соответствующие красному, зеленому и синему цветам, расположены на трех вершинах куба с координатами (1, 0, 0), (0, 1, 0) и (0, 0, 1). Точки на главной диагонали представляют собой оттенки серого цвета: от черного в начале координат (0, 0, 0) до белого в точке (1, 1, 1).

На рис. 1.3 представлены изображения цветового куба, состоящего из  $(2^8)^3$  различных цветов. Иногда 24-битовое цветное изображение называют изображением в естественных цветах, поскольку при этом возможно воспроизведение практически всех оттенков реально существующих предметов.

**Палитровые изображения** используются в целом ряде приложений, в которых имеет смысл использовать ограниченное число цветов. При этом используемое количество воспроизводимых цветов ограничено величиной 256 или меньшим числом. Применительно к Интернет-приложениям это подмножество цветов называется палитрой фиксированных Web цветов или набором цветов, одинаково

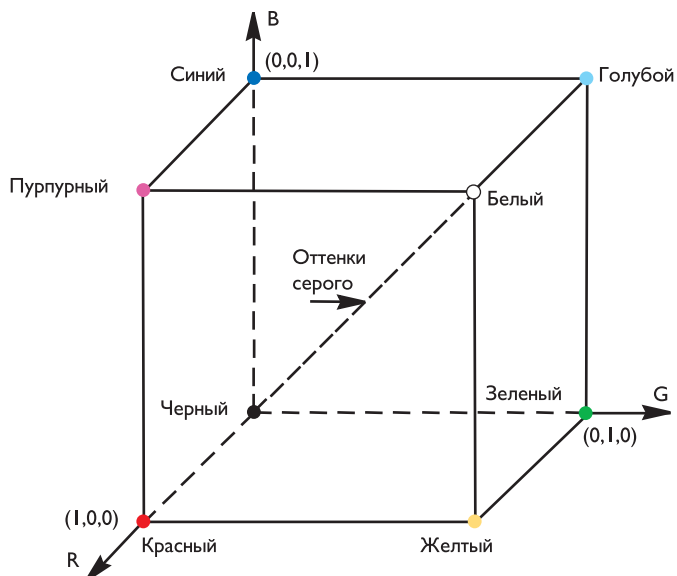


Рис. 1.2. Схематическое изображение цветового куба

воспроизводимых всеми программами просмотра Интернет-сайтов. Поскольку из 256 цветов только 216 воспроизводятся одинаково большинством операционных систем, эти  $216 = 6^3$  цветов стали *de facto* стандартом фиксированных цветов (см. рис. 1.4).

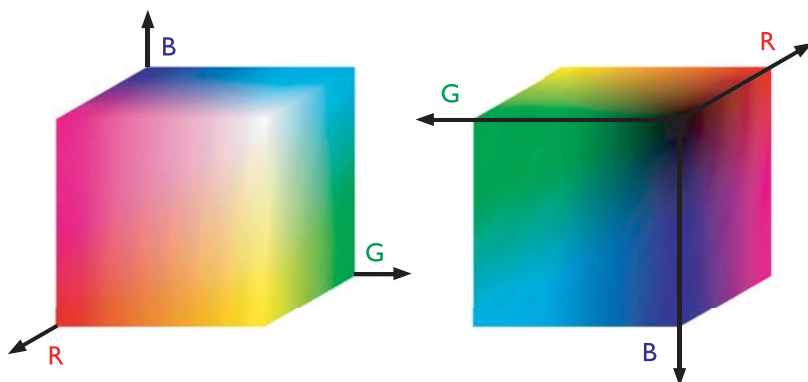


Рис. 1.3. 24-битовый полноцветный куб RGB: вид с двух сторон

В данном варианте каждая из трех RGB компонент может принимать лишь 6 возможных значений: 0, 51, 102, 153, 204 и 255. Эти значения обычно выражают в шестнадцатеричной системе счисления, как приведено в табл. 1.2.

Поскольку для формирования цвета требуется три числа, каждый цвет из палитры задается тремя двузначными числами (в шестнадцатеричной системе

счисления). Так, шесть воспроизводимых оттенков серого цвета, входящих в па-

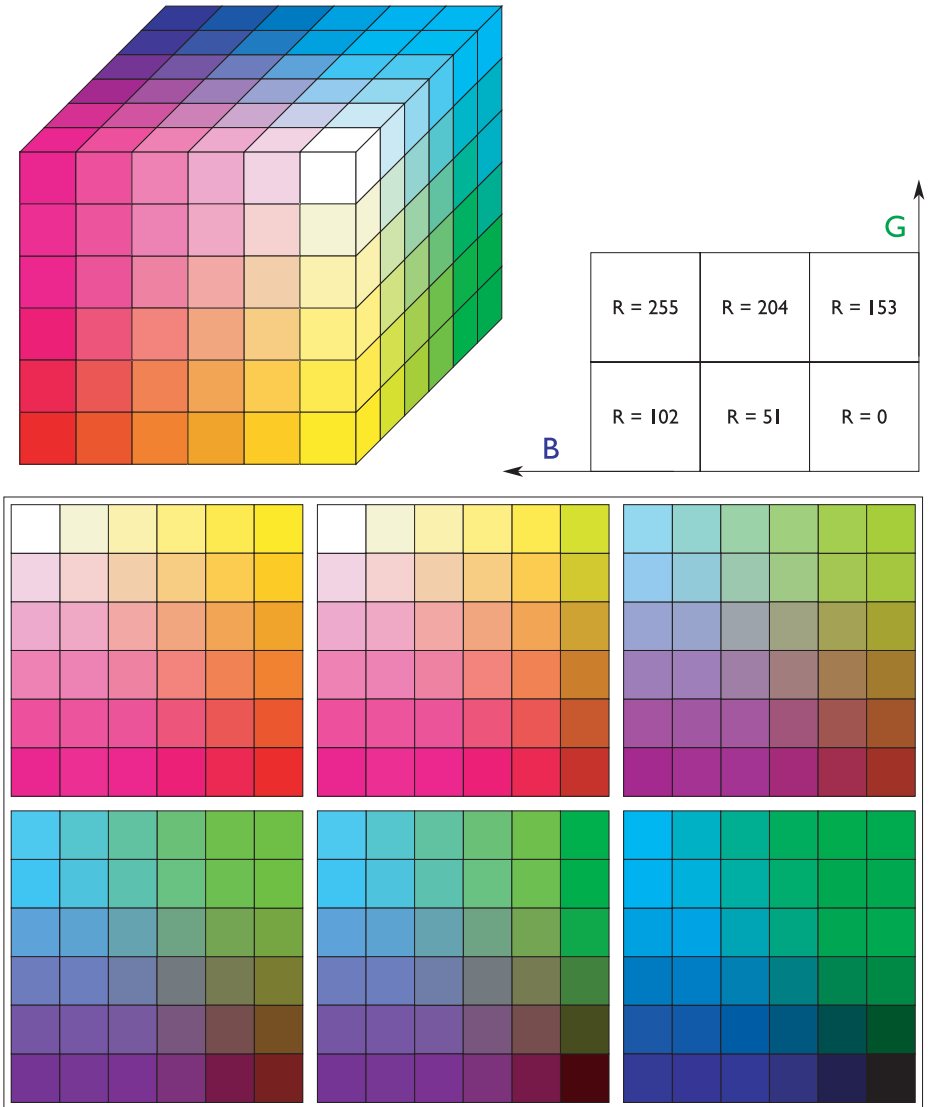


Рис. 1.4. Куб (а) и палитра (б) фиксированных RGB цветов

Таблица 1.2. Значения RGB компонент в палитре фиксированных частот

| Система счисления | Значения RGB компонент |    |     |     |     |     |
|-------------------|------------------------|----|-----|-----|-----|-----|
| Шестнадцатеричная | 0                      | 33 | 66  | 99  | CC  | FF  |
| Десятичная        | 0                      | 51 | 102 | 153 | 204 | 255 |

литру, определяются числами (00 00 00), (33 33 33), (66 66 66), (99 99 99), (CC CC CC),

(FF FF FF). Наиболее яркие красный, зеленый и синий цвета задаются, соответственно, значениями (FF 00 00), (00 FF 00) и (00 00 FF).

Основной закон смешения цветов устанавливает трехмерность цвета и возможность выражения практически всех цветов через смеси только трех линейно независимых цветов. При этом яркость смеси цветов равна сумме яркостей составляющих смеси [1.21–1.23].

Трехмерное цветовое пространство является удобной и наглядной формой геометрического представления множества цветов и действий над ними. В цветовом пространстве можно ввести сколько угодно координатных систем. Началом координат во всех этих системах обычно устанавливается точка нулевого цвета — черного.

## 1.2. Цветовые системы

Цветовая система полностью определяется заданием трех координатных осей, исходящих из начала координат, и соответствующим их масштабированием. В общем случае устанавливаемые по осям масштабы могут быть различными. Основные цвета, положенные в основу цветовой координатной системы, используются для выражения остальных цветов в данной координатной системе. Важным условием выбора основных цветов является их линейная независимость, т. е. ни один из трех основных цветов не должен получаться путем смешения двух других цветов.

В системе координат с заданными основными цветами  $X, Y, Z$  любой цвет  $F$  определяется соотношением

$$F = \alpha_x X + \alpha_y Y + \alpha_z Z. \quad (1.2)$$

Яркость  $F_B$  также является одной из возможных цветковых координат:

$$F_B = \alpha_{Bx} X + \alpha_{By} Y + \alpha_{Bz} Z. \quad (1.3)$$

Коэффициенты  $\alpha_{Bx}, \alpha_{By}, \alpha_{Bz}$  характеризуют вклады каждой из цветковых координат в яркость воспроизводимого цвета и являются яркостными коэффициентами в данной цветовой системе координат. Термин «яркость» обозначает количественную меру интенсивности ахроматического (неокрашенного) света, которая принимает значения в диапазоне от черного до белого с промежуточными серыми оттенками.

Хроматический (окрашенный) свет характеризуется следующими параметрами [1.21, 1.22]:

- электромагнитным спектром, охватывающим диапазон длин волн примерно от 380 до 780 нм (рис. 1.5);
- потоком лучистой энергии, излучаемой в единицу времени и измеряемой в ваттах;
- световым потоком, оцениваемым по зрительному ощущению и измеряемым в люменах;
- светлотой, цветовым тоном и насыщенностью, которые отражают уровень производимого световым потоком зрительного ощущения и определяют цветное восприятие.



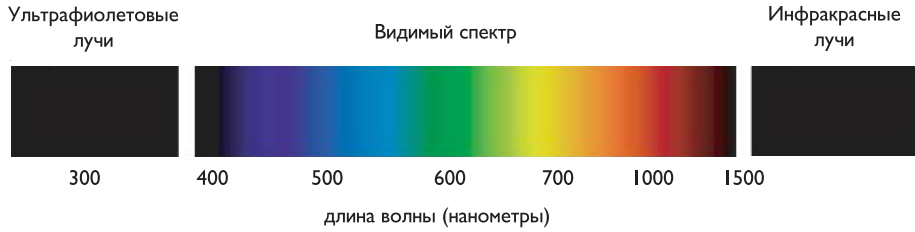


Рис. 1.5. Длины волн видимой части электромагнитного спектра

### Цветовая система RGB

Субъективные измерения цветовых координат смещения трех чистых спектральных цветов (при одинаковой мощности монохроматических излучений с равной энергией) привели к разработке принятого Международной комиссией по освещению (МКО) стандартного набора монохроматических первичных основных цветов: красного (R) с длиной волны 700 нм, зеленого (G) — 546,1 нм и синего (B) — 435,8 нм.

В соответствии с теорией цветового зрения предполагается наличие в сетчатке глаза светочувствительных приемников (колбочек) трех видов: 65% из них воспринимают красный свет, 33% — зеленый свет и 2% — синий свет.

Совокупность реакций каждого из трех приемников на падающее излучение определяет восприятие цвета. Если обозначить спектральные чувствительности трех приемников  $\bar{R}(\lambda)$ ,  $\bar{G}(\lambda)$  и  $\bar{B}(\lambda)$ , то три составляющие светового потока  $R$ ,  $G$  и  $B$  определяются соотношениями:

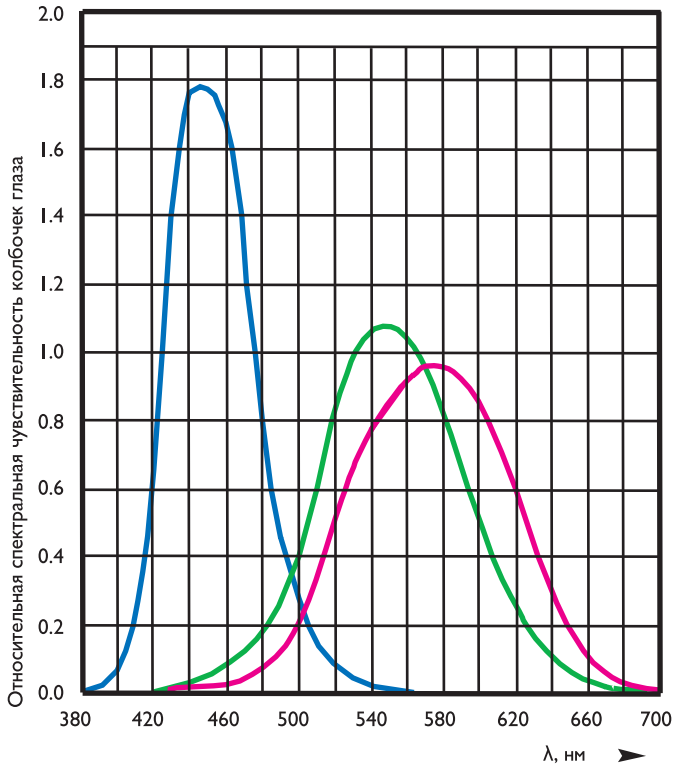
$$R = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi(\lambda) \bar{R}(\lambda) d\lambda, \quad G = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi(\lambda) \bar{G}(\lambda) d\lambda, \quad B = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \varphi(\lambda) \bar{B}(\lambda) d\lambda, \quad (1.4)$$

где  $\varphi(\lambda)$  — спектральная интенсивность лучистого потока на длине волны  $\lambda$ .

На рис. 1.6 представлены относительные кривые спектральной чувствительности трех светочувствительных приемников глаза [1.20]. Эти зависимости восприятия цвета показывают, что никакая монохроматическая составляющая не может характеризовать красный, зеленый или синий цвет. Следовательно, определенный набор монохроматических первичных составляющих не обеспечивает возможность получения всех цветов спектра. Разным цветовым ощущениям в одинаковых условиях наблюдения соответствуют разные спектральные распределения излучения. Однако обратное утверждение неверно, т. е. ощущение одного и того же цвета может возникать при различных спектральных распределениях излучения.

Трехцветное выражение цвета опирается на установленный опытным путем факт, что для большинства встречающихся в природе цветов можно выполнить зрительное уравнивание со смесями взятых в различных пропорциях только трех **основных** цветов. Эта связь взаимно однозначна независимо от спектрального распределения излучения данного цвета [1.23–1.29].

В основе RGB-модели лежит Декартова система координат, цветовое пространство в соответствии с соотношениями (1.1) и рис. 1.3 представляет собой



**Рис. 1.6.** Функции относительной спектральной чувствительности трех видов светочувствительных приемников глаза

куб. Другой способ задания цвета основан на применении двумерной диаграммы цветностей МКО с  $x$  (красной) и  $y$  (зеленой) координатами (рис. 1.7). Третья  $z$  (синяя) координата вычисляется однозначно:  $z = 1 - x - y$ .

На диаграмме цветностей МКО показано положение цветностей чистых спектральных цветов, образующих подковообразную кривую чистых спектральных цветностей. Линия, соединяющая точки чистых спектральных цветностей с длинами волн 380 и 780 нм, называется линией **пурпурных цветов**. На этой же диаграмме приведены точки стандартизованных величин источников света, которые воспроизводят условия освещения: А — искусственного — электрическими лампами накаливания; В — прямого солнечного света; С — рассеянного дневного;  $D_{65}$  — усредненного дневного. Точка Е — точка равной энергии при  $x = y = z = 1/3$ , она соответствует **цветности естественного дневного цвета**.

Источники света характеризуют также цветовой температурой, соответствующей абсолютной температуре идеального излучателя (абсолютно черного тела), цвет которого имеет ту же цветность, что и данное излучение (табл. 1.3) [1.29].

Выбранные на диаграмме МКО точки основных цветов определяют цветовую модель RGB. При этом сочетания двух из основных цветов: зеленый + синий, синий + красный, красный + зеленый — воспроизводятся в виде вторичных цветов — голубого, пурпурного и желтого цветов, как показано на рис. 1.8.

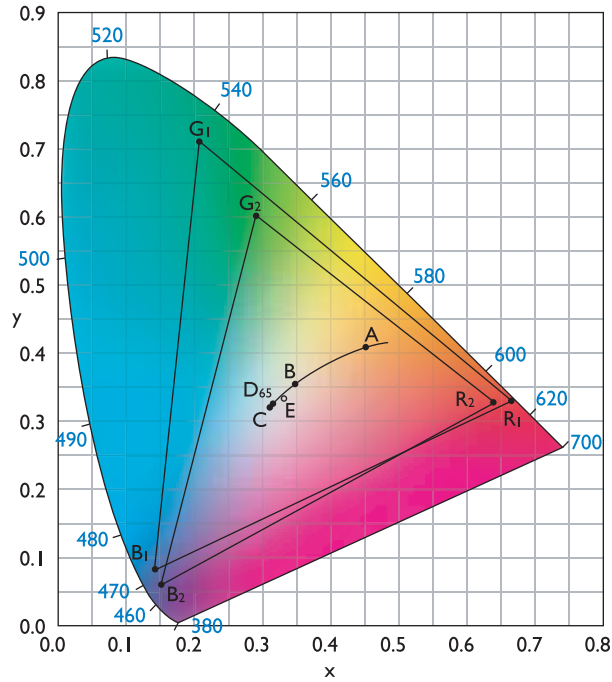


Рис. 1.7. Диаграмма цветностей МКО

Таблица 1.3. Координаты цветности и цветовая температура стандартных источников света

| Источник излучения | Координаты цветности |        | Цветовая температура, К |
|--------------------|----------------------|--------|-------------------------|
|                    | x                    | Y      |                         |
| A                  | 0,4512               | 0,4059 | 2856                    |
| B                  | 0,3498               | 0,3527 | 4874                    |
| C                  | 0,3104               | 0,3191 | 6774                    |
| $D_{65}$           | 0,3138               | 0,3310 | 6504                    |
| E                  | 1/3                  | 1/3    | 5400                    |

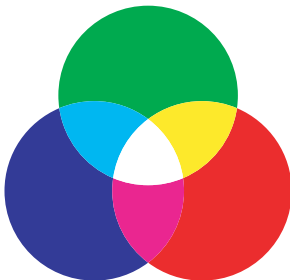


Рис. 1.8. Первичные и вторичные основные цвета световых источников

Таким образом, использование трех основных цветов световых источников — RGB, в которых каждый элемент (пиксел) имеет глубину представления 24 бита (по 8 битов на красную, зеленую и синюю составляющие), позволяет создавать на экране цветного монитора полноцветное (True Color) изображение, как показано на рис. 1.9.

#### Цветовые системы CMY и CMYK

Система CMY используется в цветных принтерах и копировальных устройствах, в которых цветные красители наносятся на бумагу.