

ЗНАНИЕ

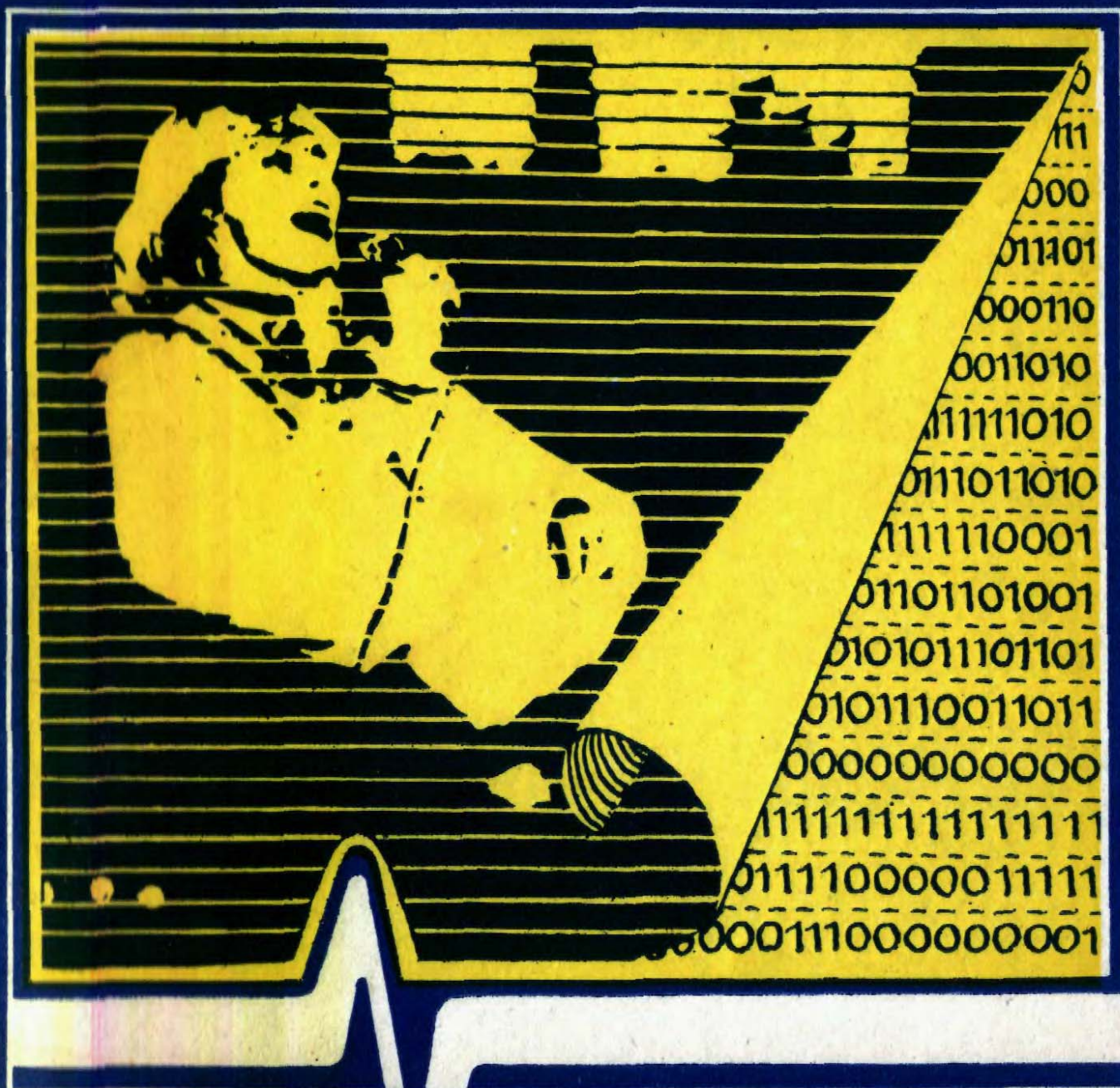
НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ
РАДИО-
ЭЛЕКТРОНИКА
И СВЯЗЬ

Самуил
И.И. Цуккерман

**ПРОБЛЕМЫ
СОВРЕМЕННОГО
ТЕЛЕВИДЕНИЯ**

2'80



**НОВОЕ
В ЖИЗНИ,
НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ**

И. И. Цуккерман,

**доктор физико-математических наук,
профессор**

**Серия
«Радиоэлектроника
и связь»
№ 2, 1980 г.**

**Издается
ежемесячно
с 1966 г.**

**ПРОБЛЕМЫ
СОВРЕМЕННОГО
ТЕЛЕВИДЕНИЯ
(ЦИФРОВОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ)**

**Издательство
«Знание»
Москва
1980**

Цуккерман И. И.

Ц85 Проблемы современного телевидения (цифровое телевидение). М., «Знание», 1980.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Радиоэлектроника и связь», 2. Издается ежемесячно с 1966 г.)

Преобразование, запись, передача и анализ изображений в цифровой форме — главное направление развития современной телевизионной техники. В брошюре дано краткое описание задач, методов и перспектив цифрового телевидения. Наибольшее внимание уделено проблеме сокращения цифрового потока за счет избыточности информации в изображениях, а также цифровым методам обработки и анализа изображений. Приведены необходимые сведения из теории информации, технической кибернетики, техники связи, из психологии и физиологии зрения.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей, интересующихся современными проблемами средств связи и анализа информации, — инженеров, техников, студентов.

30403

65-74-73-101-75-67

76.32

© Издательство «Знание», 1980 г.

Если надо было бы двумя словами определить основное направление развития техники электрической передачи изображений, то по крайней мере на ближайшие 10—15 лет это — цифровое телевидение.

Число работ, относящихся к вопросам преобразования, записи, передачи и анализа изображений в цифровой форме, измеряется уже тысячами. Интерес к цифровому телевидению понятен. Его методы не только позволят улучшить качество и повысить надежность телевизионного вещания, но и будут способствовать автоматизации анализа изображений в физике, астрономии, геологии, медицине, биологии, технологии производства и т. п. Привлекает цифровое телевидение и тем, что здесь используются достижения многих областей науки и техники — теории информации, технической кибернетики, электроники, техники связи, физиологии зрения, психологии.

В брошюре сделана попытка рассказать о сложной научно-технической проблеме цифрового телевидения так, чтобы она стала понятной и неспециалистам. Что же касается тех, кто хотел бы работать в области цифрового телевидения, то для них эта брошюра, по-видимому, могла бы служить введением в рассматриваемую проблему.

Цифровое — значит не аналоговое

Обычный для современного телевидения способ передачи изображений называют аналоговым. Уже сам термин «аналоговое телевидение» поясняет существо этого способа. Видеосигнал, несущий информацию о распределении яркости вдоль строки передаваемого изображения, сходен по форме с этим распределением, представляет собой его электрический аналог.

Поясним это с помощью рис. 1, на котором показан фрагмент телевизионного кадра с изображением театрального занавеса и в соответствующем масштабе — отрезок видеосигнала одной из строк телевизионного разложения (рис. 1, б). Непрерывное изображение передают непрерывным сигналом.

Однако уже в аналоговом телевидении эта непрерывность сохраняется лишь в одном — строчном направлении. В другом, вертикальном направлении изображение становится дискретным. Растр разбивает его на отдельные строки. Наконец, по примеру кинематографии непрерывно изменяющееся во времени изображение заменяют отдельными кадрами. Дискретизация оказалась необходимой, чтобы передавать изображения

последовательным электрическим сигналом по одному каналу связи.

Представим теперь, что и в направлении строчной развертки непрерывный вначале сигнал заменен совокупностью дискретных отсчетов, показанных штрихами на рис. 1, б. Далее, каждый дискретный отсчет проквантован, т. е. «округлен» до ближайшего, например снизу, целого значения (рис. 1, в). И наконец, это целое значение представлено числом — номером того уровня шкалы яркости, который оказался ближе других к действительному значению в исходном сигнале (в данном случае снизу). Полное число уровней, на которые квантуют первоначально непрерывное изображение, в вещательном телевидении достаточно велико, чтобы не были заметны искажения, происходящие от замены исходного непрерывного изображения «ступенчатым», проквантованным.

Итак, каждый отсчет, т. е. каждый элемент изображения, закодирован числом. Телевизионный кадр превращен в большую таблицу чисел, содержащую около полумиллиона ячеек. Число в каждой ячейке обозначает яркость соответствующего элемента изображения, а строка таблицы — строку телевизионного раstra.

Из известных соображений простоты, надежности, помехоустойчивости эти числа особенно удобно представлять не в привычной для нас десятичной, а в двоичной системе счисления.

В примере на рис. 1 сигнал, передающий новую кодовую последовательность двоичных цифр, имеет, по существу, лишь два уровня. Не только исходный сигнал, но и сигнал после квантования (в нашем простом примере — рис. 1, в) оставался аналогом соответствующего распределения яркости. Иначе говоря, пока сигнал своей величиной представлял непосредственно число, выражающее яркость точно или приближенно, он напоминал по форме то распределение, которое передавал. Однако стоило заменить это число цифрами, образующими его, например, в двоичной системе счисления, как это сходство исчезло. По виду двоичного сигнала (рис. 1, г) прямо уже не скажешь, как выглядит передаваемое им распределение яркости. Чтобы судить об этом, понадобилось бы сперва декодировать двоичный сигнал, перейти от двоичных цифр к исходным числам.

Связист, организующий передачу аналогового сиг-

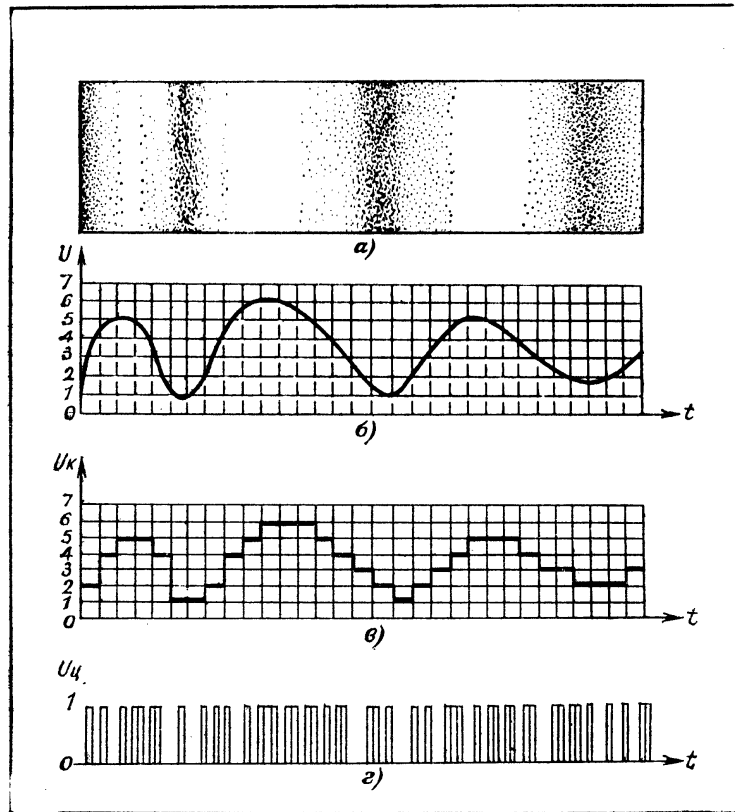


Рис. 1. Фрагмент изображения и основные операции цифрового кодирования:
 а — исходное изображение; б — дискретизации;
 в — квантование; г — двоичное кодирование

нала, придает большое значение возможно более точному сохранению его формы. В самом деле, изменение формы аналогового сигнала приведет к соответствующему изменению формы распределения яркости при воспроизведении изображения на экране приемника. Приходится использовать разного рода корректирующие устройства, чтобы восстановить нужную форму сигнала при приеме. Цифровой сигнал гораздо терпимее к искажениям. Все, что требуется при приеме двоичного сигнала — отличить нуль от единицы. Многочисленные искажения конкретной формы сигнала, если они и возникнут при передаче, не будут иметь значения, пока удастся надежно различить эти две цифры.

До сих пор речь шла о передаче распределения яркости. Но в цифровой форме можно передавать и цвет элементов изображения. Цветность характеризуется значениями двух координат на плоскости цветового треугольника. А всего нужно будет три числовых значения для полного описания каждого элемента цветного изображения. В зависимости от того, какой способ представления цветного изображения принят, эти числа будут характеризовать интенсивность зеленого, красного, синего или яркость и два параметра цветности. Вместо одной таблицы понадобится передавать три таблицы чисел, в цифровой форме описывающие три составляющие цветного изображения.

Цифровое телевидение будет отличаться от нынешнего аналогового тем, что все (или на первом этапе — почти все) операции над изображениями в профессиональных системах, т. е. преобразование, запись, воспроизведение на самих телецентрах, передача между телецентрами, будут производиться в цифровой форме. Но еще долго (по экономическим соображениям) сохранится аналоговый способ передачи от местного телецентра к домашним телевизорам, и сами эти телевизоры пока останутся аналоговыми.

В наше время электроэнергия создается и передается в единых энергетических системах, позволяющих гибко перераспределять энергетические потоки, компенсировать перегрузки, устранять перебои в энергоснабжении. Подобные проблемы возникают и в связи. Только здесь требуется гибко перераспределять потоки информации. Единая система связи может быть эффективна лишь на цифровой основе. Только при этом ус-

ловии органически сочетаются потоки информации от таких разнородных источников, как ЭВМ, телеграф, телевизионные центры, междугородный телефон и т. п. Если для перехода к цифровому телевидению существовала бы только одна причина — создание единой системы связи (а это уже происходит, и в недалеком будущем появится так называемая Единая автоматизированная система связи — ЕАСС), достаточно было бы и ее, чтобы оправдать такой переход. Но есть и другие не менее важные причины.

Для чего понадобилось цифровое телевидение

В самом деле, зачем отказываться от аналоговых принципов преобразования, записи, воспроизведения, передачи сигналов изображения? Казалось бы, они хорошо отвечают самой природе изображений — непрерывных, не квантованных. Аналоговое телевидение достигло высокого уровня технического развития. Оно стало дальновидением в полном смысле этого слова.

Иначе обстоит дело с телеграфом. Телеграфные сообщения — тексты, ряды цифр, — по существу, уже дискретизированы и квантованы, это последовательности дискретных символов, набор которых («алфавит») задан. Очевидно, необходима и цифровая форма передачи этих символов. Не могло быть и речи о том, чтобы передавать, например, буквы сигналами, амплитуды которых пропорциональны порядковому номеру буквы в алфавите.

К чему это привело бы, показано на рис. 2. Если фрагмент текста представить таким сигналом, помехи легко поражали бы его. Достаточно, чтобы постоянная составляющая изменилась на одну ступень квантования (на $1/32$ от полного размаха), и фрагмент текста становится неузнаваемым. А ведь такое искажение постоянной составляющей аналогового сигнала в домашнем телевизоре по сравнению с исходным сигналом осталось бы практически незамеченным. Мы легко примирились бы и со слабой случайной помехой, среднее значение которой было бы порядка 1—2% относительно полного размаха сигнала. Она проявилась бы в виде легкого «снега» на экране телевизора. Но такие же случайные

изменения сигнала при передаче телеграфного текста рассматриваемым гипотетическим способом вызвали бы случайную замену значительного количества букв на ближайшие по алфавитному порядку буквы и недопустимо исказили бы текст в целом.

Имеются глубокие причины такой устойчивости изображения и неустойчивости текста. В изображении сохраняются сильные статистические связи, отражающие

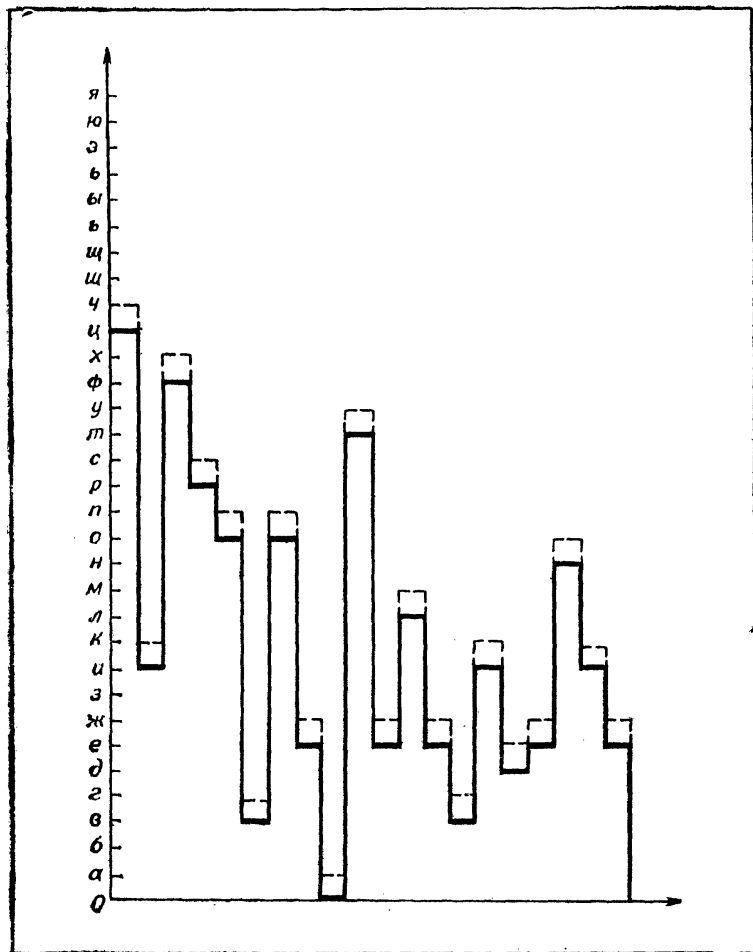


Рис. 2. Передача текста гипотетическим кодом — набором амплитуд, пропорциональных порядковым номерам букв в алфавите (пробелу соответствует нуль). Сплошная линия — сигнал, кодирующий слова «ЦИФРОВОЕ ТЕЛЕВИДЕНИЕ»; штриховая — искажение вследствие небольшого изменения постоянной составляющей — «ЧКХСПГПЖАУЖМЖГКЕЖОКЖ».

взаимосвязь между элементами объектов внешнего мира. Благодаря этим связям, проявляющимся в том, что в теории информации называется статистической избыточностью, зрительной системе удастся как бы «реставрировать» изображение, подвергнутое действию помех. А вот избыточность текстовых сообщений значительно меньше. Текст представляет собой сравнительно экономно закодированное сообщение. А как известно из теории информации, после сокращения избыточности сообщение обычно становится более «хрупким», уязвимым для помех. Иногда достаточно одной-двух ошибок, чтобы совершенно изменить смысл фразы. По этим причинам системы передачи текста должны быть весьма помехоустойчивыми. Особые требования к помехоустойчивости возникают из-за того, что каналы связи — разветвленные, сложные, многозвенные системы. Только помехоустойчивое кодирование позволяет текстам выдержать без искажений многократную ретрансляцию сигналов от звена к звену в таких цепях.

Цифровое кодирование обеспечивает помехоустойчивость при множественной ретрансляции особенно в тех случаях, когда используется система счисления с низким основанием, например двоичная. Передача информации всегда сводится к выбору из некоторых возможностей. При двоичном кодировании этот выбор наиболее прост. Сообщение передают, производя в каждом разряде кода выбор лишь из двух возможностей: нуль или единица.

Конечно, если помехи очень велики, то и этот простой выбор не удастся сделать надежным. Однако достаточно превзойти некоторый порог — и связь становится очень надежной, даже если не принимать специальные меры. Пусть, например, помеха представляет собой распространенный вид шума, имеющего однородный спектр (так называемый «белый шум») и гауссово распределение амплитуд. Эта помеха будет как-то искажать двоичные послышки. Иногда к сигналу, соответствующему цифре «0», добавится такой шумовой выброс, что будет принята цифра «1». Напротив, может случиться и так, что из сигнала, соответствующего «1», будет вследствие помехи вычтена такая величина, что он будет декодирован как «0». Условимся принимать за нуль сигнал, не достигший половины полного размаха, а за единицу — сигнал, превзошедший это зна-

чение. Вероятность ошибки в приеме одной двоичной цифры быстро уменьшается с увеличением отношения сигнал/помеха. Где-то вблизи 20 дБ имеется заметно выраженный порог. Еще при 17,4 дБ искажается в среднем один из десяти тысяч двоичных импульсов. Если учесть, что на каждый элемент изображения приходится несколько двоичных импульсов (как будет видно из дальнейшего, до 7 или 8), это значит, что в каждом кадре окажутся пораженными сотни элементов изображения. Но достаточно увеличить отношение сигнал/помеха до 23 дБ, чтобы в среднем одна ошибка пришлась на триллион! Передача станет практически безошибочной: за несколько часов исказится лишь один элемент в одном из кадров.

Это пороговое свойство цифровых систем имеет перестепенное значение для многозвенных цепей, каналов связи, устройств многократной перезаписи сообщений и т. п. Возникает возможность точной регенерации сигнала после данного звена. Звенья цепи передачи сообщений можно наращивать, количество ретрансляций и перезаписей можно увеличивать, практически избегая накопления ошибок, которое было бы неизбежно в аналоговой системе, где невозможна точная регенерация сигнала.

Основание кода, системы счисления не обязательно должно быть равным двум.

В канале связи известные удобства может представить троичный код. Здесь выбор производится из трех возможностей — отрицательная полярность, нуль, положительная полярность. В природе особое значение приобрел код с основанием 4 — так называемый четверичный код. Именно таков «алфавит» радикалов в длинной цепочке молекулы ДНК — дезоксирибонуклеиновой кислоты, носителя генетической информации. Кодирование с низким основанием кода объясняет поразительную устойчивость наследственных признаков, передаваемых от поколения к поколению. По-видимому, задача регенерации «генетических сообщений» и сохранения структуры биологических видов решена с помощью такого своеобразного и еще малопонятного цифрового кодирования. Дальнейшее изучение этих живых прототипов эффективных кодовых систем может иметь ни с чем не сравнимое значение не только для биологии, но и для технической кибернетики.

Какое отношение эти примеры имеют к технике передачи изображений? Самое прямое. Задача регенерации сигнала изображения без потерь приобрела исключительно важное значение и для современного телевидения.

Прежде чем прийти на вход телевизионного приемника и воссоздать на его экране передаваемое изображение, видеосигнал претерпевает большее или меньшее (а с развитием техники телевизионного вещания все большее) число различных преобразований на телевизионном центре. Каждая ретрансляция, а их множество, когда расстояние достаточно велико, — это преобразование типа регенерации сигнала.

В аналоговой системе нет той возможности точной регенерации сигнала, которая имеется в цифровой системе. В цифровой системе выбор определен жестко. Каков бы ни был конкретный вид кодового сигнала, единица останется единицей, а нуль — нулем, только бы сигналы имели необходимое превышение над порогом при данном уровне помех. А в аналоговой системе — пусть даже при очень высоком отношении сигнал/помеха в каждом звене — любое преобразование будет вносить свои необратимые изменения. Пока этих преобразований немного, суммарные искажения еще не будут заметны. Именно из этого условия исходят, задавая подчас не легко выполнимые требования на отношение сигнал/помеха в телевизионных устройствах и каналах связи. Но с развитием телевидения число преобразований быстро возрастает. Увеличиваются расстояния между передающим и принимающим телецентрами. Увеличиваются номенклатура и количество различных эффектов, разнообразящих передачу, но требующих дополнительного преобразования. Монтаж иных телефильмов может потребовать десятка и более перезаписей. А это уже не удастся осуществить на современных видеоманитофонах без заметных потерь.

И поэтому многое, что хотели бы сделать телевизионные режиссеры, оказывается практически не выполнимым средствами аналогового телевидения. А качество передач заметно зависит от того, сколько звеньев преобразования прошли сигналы изображения. Достаточно вспомнить, как иногда изменяется точность воспроизведения, качество изображения при переходе

от показа диктора местной студии к передаче, например, заокеанского футбольного матча.

Дополнительные требования к точности регенерации предъявляет цветное телевидение. Пока телевидение было монохромным, черно-белым, глаз мирился даже с довольно существенными искажениями, например искажениями передачи градаций яркости. Это не должно вызывать удивления. Глаз человека — не абсолютный фотометр, зрение удовлетворяется довольно приблизительной передачей оттенков серого, для него важны отношения, а не абсолютные величины. Но зато он чутко реагирует на искажения цвета знакомых объектов — листья, ясного неба, лица.

Вот здесь-то и должны проявиться главные преимущества цифровых методов для телевидения. Ведь при цифровой передаче или записи в каждом звене преобразования сигнал изображения возникает как бы заново, без изменений. Числовые таблицы, которые представляют теперь телевизионные кадры, сохраняются на всем пути от источника сообщений до получателя.

Вместе с тем будет решена и важная задача создания надежных телевизионных архивов. В цифровой форме можно будет сохранять записи телевизионных программ неограниченно долго, а при необходимости снова и снова обращаться к этим записям. Кстати, такая возможность интересна и для кинематографии. Многие киноленты прошлого уже пришли в негодность, а другие раньше или позже ожидает такая же участь. Вероятно, единственная возможность сохранить на века шедевры кино — это перезаписать их в двоичном коде. Мало того, что двоичная запись, в какой форме ее ни выполнить, даже в чисто механическом смысле несравненно прочнее обычной многоградационной фотографии на киноленте, она — как и в случае телевидения — допускает точную регенерацию без накопления искажений, характерных для аналогового копировального фото процесса.

Итак, возможность точной регенерации изображений — вот главная причина, требующая перехода от аналоговых к цифровым методам.

О возможности унификации каналов связи в ЕАСС уже было сказано. Еще одно преимущество цифрового телевидения — повышение точности и надежности работы аппаратуры на телецентре. Она станет более техно-

логичной и компактной. Упрощается и становится более гибким управление телевизионными комплексами, в частности, с помощью ЭВМ.

Идея передачи телевизионных изображений цифровыми кодами не нова. Уже более четверти века назад начали систематически обсуждаться в научно-технической литературе вопросы построения цифровых телевизионных систем, возможности применения в телевидении так называемой импульсно-кодовой модуляции (ИКМ). Но что же сдерживало развитие цифрового телевидения?

Возникшие здесь трудности хорошо известны. На каждый элемент изображения должен приходиться по крайней мере один отсчет. Длительность одного элемента при стандартном телевизионном разложении порядка 80 нс. За это время надо успеть проквантовать отсчет и преобразовать его в кодовую группу. До недавнего времени это аналого-цифровое преобразование и обратное ему цифро-аналоговое преобразование на приемной стороне было трудно выполнить в таком темпе. Лишь теперь благодаря значительному повышению быстродействия элементов микроэлектроники, необходимых для реализации соответствующих преобразователей, создание аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) превратилось из исследовательской в промышленную задачу.

Число уровней квантования может иметь порядок сотни и более. Это означает, что на каждый отсчет исходного аналогового телевизионного сигнала придется семь отсчетов двоичного (цифрового) сигнала. А вместе с тем на порядок расширится и без того широкая полоса частот в телевидении. **Задача сокращения полосы частот — а лучше сказать, сокращения цифрового потока — оказывается ключевой задачей цифрового телевидения.**

Сокращение цифрового потока в цифровом телевидении тоже имело бы большое экономическое значение. Более эффективно использовались бы каналы связи. Уменьшился бы расход носителя информации (например, магнитной ленты), упростились бы устройства записи телевизионных программ. Но такое сокращение должно быть выполнено при условии сохранения высокого качества телевизионного изображения.

Про АЦП и ЦАП без схем

Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи — АЦП и ЦАП — неперенные блоки любой цифровой телевизионной системы. Устройства такого рода появились в технике давно. Они широко применяются в телеметрии, в экспериментальной физике, в измерительной технике — повсюду, где надо получать данные измерений непрерывных величин в цифровой форме и, напротив, представлять в виде непрерывных изображений, например, графиков на экране дисплея, результаты цифровых преобразований, например, вычислений в ЭВМ.

По существу, эти же функции выполняются АЦП и ЦАП в цифровом телевидении. И здесь такие устройства преобразуют непрерывное вначале изображение в цифровую форму, представляя в виде кодов измеренные параметры элементов изображения, а затем восстанавливают для непрерывного отображения на телевизионных экранах изображения, заданные кодами. Технические особенности телевизионных АЦП и ЦАП определились в основном тем, что внедрение цифровых методов в телевидение потребовало дальнейшего повышения их быстродействия.

Элементарная база информационных систем в наше время стремительно развивается благодаря успехам электроники и физики твердого тела. Конкретные схемы стареют иногда еще до того, как выходят книги с их описанием. Попробуем поэтому рассказать здесь об АЦП и ЦАП без схем. Ограничимся лишь принципами их действия: эти принципы стареют не так быстро.

Аналого-цифровое преобразование можно сопоставить с измерением высоты предмета линейкой с нанесенными на нее делениями. Прикладывая к предмету шкалу линейки, находят то деление шкалы, которое оказывается ближе всего снизу к его краю.

Этот принцип широко используется в современных твердотельных АЦП. Шкалу в таких АЦП образуют компараторы — пороговые элементы, сравнивающие входящий сигнал с фиксированным уровнем. В так называемых параллельных АЦП каждому уровню квантования соответствует свой компаратор — «сравниватель», если перевести это слово буквально. Все компа-

раторы, уровни фиксации которых превзойдены отсчетом сигнала, переходят в состояние, соответствующее единице, а остальные остаются в «нулевом» состоянии (рис. 3). Эта совокупность единиц — запись отсчета в другом коде, называемом унитарным.

Унитарный код — должно быть, древнейшая система счисления. Первобытные люди, обозначавшие числа зарубками на дереве или камне, применяли — если пользоваться современной терминологией — унитарный код. Он кажется очень расточительным: ведь для записи числа порядка тысячи понадобится именно столько же единиц, тогда как в двоичном коде, т. е. нулями и единицами, такое число записывается десятью цифрами. Но зато он и помехоустойчив. В двоичном коде ошибка в старшем разряде искажает результат на половину шкалы, а в унитарном — только на одно деление. Есть основания полагать, что нервная система животных и человека использует во многих своих каналах унитарный код. Сигналы, посылаемые, например, ней-

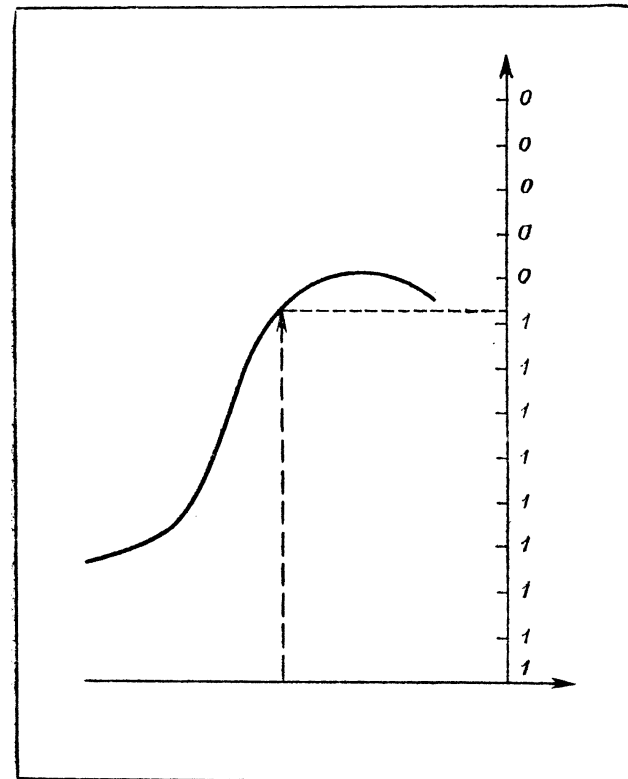


Рис. 3. Измерение сигнала в параллельном АЦП

ронами сетчатки в вышележащие отделы мозга по многочисленным волокнам зрительного нерва, имеют вид пачек хорошо сформированных импульсов одинаковой амплитуды. Нейроны, принимающие эти сигналы, по-видимому, отсчитывают количество пришедших единичных импульсов за определенное время. Это — одна из причин, объясняющих помехоустойчивость «нервных линий связи».

Отсчет, записанный в унитарном коде на выходе компараторов АЦП, легко превратить в кодовую группу другой системы счисления. Например, достаточно «свернуть» эту первичную запись, сосчитав с помощью двоичного счетчика количество единиц. На выходном регистре счетчика возникнет совокупность двоичных цифр, выражающих рассматриваемый отсчет. Как уже говорилось и более подробно будет обосновано в дальнейшем, достаточно 7 или 8 разрядов, что соответствует $2^7=128$ или $2^8=256$ уровням квантования.

Достоинство устроенных на этом принципе параллельных АЦП — их быстродействие. Измеряемый отсчет сравнивают сразу со всей шкалой. Однако число элементов схемы оказывается очень большим, поскольку число уровней квантования, а значит, и компараторов измеряется в телевидении сотнями.

В противоположность этому можно обойтись лишь одним компаратором, если для организации АЦП применить принцип, используемый при взвешивании. Пусть имеется набор m гирь весом 1, 2, 4, 8, ..., 2^{m-1} (по одной гире каждого веса). С помощью этого набора можно определить любой из 2^m возможных значений веса, от 0 до 2^m-1 . На одной чашке весов поместим взвешиваемый груз. На другую чашку сперва положим самую большую гирю из набора. Если перетянет груз, запишем 1 и гирю оставим; если же перетянет гиря, запишем 0, а гирю снимем. Затем положим следующую, меньшую гирю. Снова запишем 1 и оставим гирю, если перетянул груз, или же запишем 0 и снимем гирю в противоположном случае. В результате таких последовательных операций мы не только почти (с точностью до единицы квантования) уравновесим груз, но и выразим результат взвешивания в двоичной форме.

Преобразователи такого рода называются АЦП с поразрядным взвешиванием. Они являются устройствами последовательного типа. По существу, здесь можно

обойтись лишь одним компаратором. Порог его срабатывания выбирают равным половине полного динамического диапазона. Подают измеряемый отсчет. Если последний превзошел порог, формируют сигнал «1», в противном случае — «0». Затем ту часть сигнала, которая превысила порог (или весь сигнал, когда порог не был превышен), усиливают вдвое и снова сравнивают с тем же порогом (что соответствует сравнению остатка со вдвое меньшим порогом — как бы установкой на чаше весов следующей, вдвое более легкой гире) и т. д.

В АЦП с поразрядным взвешиванием меньше элементов, чем в параллельном АЦП. Но измерение отсчета сигнала здесь производится не сразу, а последовательными приближениями. Каждое из этих приближений требует времени. Там, где быстродействие не критично, это не имеет значения. Однако для телевизионного сигнала такое увеличение времени оказалось неприемлемым — теперь время, уходящее на преобразование, оказывается, по сравнению с параллельным АЦП по крайней мере в m раз больше (m — число разрядов, двоичный логарифм числа уровней квантования).

Очень распространен параллельно-последовательный вариант АЦП, представляющий собой некий компромисс между этими крайними случаями. Пусть, например, число уровней квантования выбрано равным $2^8=256$. Вначале сравнивают отсчет со шкалой, состоящей из $2^4=16$ компараторов. Четыре двоичных разряда, полученных при этом параллельном сравнении, — старшие разряды кодовой группы. Если теперь произвести обратное цифро-аналоговое преобразование, получим тот уровень шестнадцатиуровневой шкалы квантования, который является приближением снизу к кодируемому отсчету. Разность между истинным отсчетом и этим первым приближением надо усилить в 16 раз и снова подать на 16 компараторов. При этом получатся четыре младших разряда и закончится формирование восьмиразрядной кодовой группы.

В таких параллельно-последовательных АЦП достигается большая экономия элементов. Вместе с тем значительно уменьшается количество приближений (в рассмотренном примере — два, а не восемь, как было бы в случае чисто последовательной системы поразрядного взвешивания). Кодирование здесь напоминает измере-

ния линейками сперва с грубой, а затем с тонкой шкалой. В качестве обеих шкал служит одна и та же система компараторов, используемая дважды, но при соответственно различном усилении сравниваемого сигнала.

Используются и другие «компромиссные» системы, сочетающие те или иные преимущества основных типов АЦП. Своеобразный параллельно-последовательный АЦП получается, если одновременно кодировать группу следующих друг за другом элементов путем поразрядного взвешивания. В то время как один элемент заканчивают кодировать, кодовую группу следующего за ним элемента еще «укомплектовывают» предыдущим разрядом и т. д., а последний элемент подвергают первому взвешиванию. Каждую кодовую группу собирают как бы на конвейере, последовательно. Эти АЦП так и называют конвейерными. Здесь достигается выигрыш в числе компараторов по сравнению с параллельными АЦП, а вместе с тем нет проигрыша во времени.

В связи с работами по микроминиатюризации в радиоэлектронике возрастает значение и чисто параллельных АЦП. К их главному преимуществу — быстрой реакции — добавляется возможность создания нелинейной шкалы квантования. А это, как будет видно из дальнейшего, имеет большое значение для согласования с особенностями зрительного восприятия.

Цифро-аналоговое преобразование выполняется значительно проще, чем аналого-цифровое. В самом общем виде оно сводится к так называемому взвешенному суммированию. Сигнал после ЦАП представляет собой сумму сигналов. При использовании двоичного кодирования и линейной шкалы старший разряд берут с весом, равным половине полного динамического диапазона. Если старший разряд был единицей, на сумматор подают сигнал, равный этой половине (и, разумеется, если старший разряд был нулем, не подают ничего). Следующий разряд берут с весом, вдвое меньшим (т. е. если разряд был единицей, подают на сумматор соответственно сигнал, равный одной четверти полного диапазона), и т. д. Такое суммирование может быть выполнено в схеме, составленной из резисторов.

Аналого-цифровому преобразованию можно подвергать не только распределение яркостей, но и распреде-

ление цветовых параметров — например, преобразовать в АЦП цветоразностные сигналы.

В прикладном телевидении находят применение и такие системы, задача которых сводится к передаче координат редких точек на сравнительно однородном фоне. Так обстоит дело, например, при телевизионном вводе в ЭВМ изображений со следами ядерных частиц в пузырьковых камерах, используемых в физике высоких энергий. Вместо того чтобы перегружать память ЭВМ многочисленными элементами пустого фона, вводят лишь координаты центров пузырьков, образующих трек (след) ядерной частицы. В таких случаях аналого-цифровое преобразование уже совсем точно соответствует измерению по линейке. «Деления шкалы» для отсчета координаты в направлении строчной развертки образуются частыми тактовыми импульсами.

ИКМ в телевидении

Импульсно-кодовой модуляцией в телевидении называют — может быть, не очень удачно — кодирование телевизионного сигнала двоичным кодом. Исследования ИКМ в телевидении проводятся с начала пятидесятых годов, но только недавно этот метод стал широко применяться в вещательном телевидении. Этому способствовали прежде всего успешные разработки АЦП и ЦАП, а затем и быстродействующих цифровых устройств памяти, пригодных для работы в реальном масштабе времени телевизионного вещания.

Передачу телевизионного сигнала двоичным кодом уже используют на некоторых внутренних соединительных линиях телецентров. Это повышает помехоустойчивость передачи изображений с пунктов, расположенных вне телецентра, например из театров или со стадионов, в центральные аппаратные, где формируется программа.

Применение ИКМ оказалось полезным и для международного обмена телевизионными программами. Сейчас, как известно, в мире сосуществуют три системы цветного телевидения — НТСЦ, ПАЛ и СЕКАМ. Непосредственный прием передач по стандарту одного «телевизионного региона» в другом невозможен. Необходимо промежуточное преобразование, как бы пере-

вод с языка одного стандарта на другой. Еще недавно роль такого «переводчика» выполняло аналоговое устройство. Многие обстоятельства затрудняют преобразование. Но особенно затруднен обмен между американской системой НТСЦ и европейскими системами ПАЛ и СЕКАМ: в американской системе и число строк в кадре и число кадров в единицу времени отличаются от того, что принято в европейских системах.

Общая идея преобразования стандартов проста: надо записать изображение, полученное в одном стандарте, в некоей памяти, а затем считать его уже в другом стандарте. Однако реализация этой идеи в аналоговом виде сопряжена с известными трудностями. В качестве памяти аналогового преобразователя может служить накопительная мишень передающей электронно-лучевой трубки. Изображение, созданное, например, на экране кинескопа при приеме сигналов, скажем, НТСЦ, снималось с этого экрана передающей телевизионной камерой, работающей в другом стандарте (ПАЛ или СЕКАМ). Различия в частоте кадров и числе строк порождали побочные явления типа интерференции (биения, вызывающие побочные узоры). Чтобы эти явления были меньше заметны зрителю, следовало поддерживать высокую стабильность растров, часто подстраивать систему.

Посмотрим теперь, как решает эту задачу цифровое телевидение. Ограничимся примером того, как преобразовать монохромный (черно-белый) телевизионный кадр, созданный растром с одним числом строк, в кадр с другим числом строк. Фрагменты этих двух растров, наложенных один на другой, показаны на рис. 4. Пусть принимают изображение в стандарте с меньшим числом строк (сплошные линии на рис. 4), и оно должно быть преобразовано для дальнейшей передачи в стандарте с большим числом строк (штриховые линии на рисунке). На языке цифрового телевидения это значит, что одну таблицу чисел, представляющую распределение яркости элементов кадра, надо преобразовать в другую таблицу с большим числом строк (а вообще говоря, и столбцов, но мы для упрощения не будем на этом останавливаться). Числа этой новой таблицы получаются путем линейной интерполяции значений, заданных первой таблицей. Например, n -й элемент k -й строки новой таблицы (он обозначен на рисунке $b_{n,k}$)

вычисляется как взвешенная сумма значений соответствующих n -х элементов ближайших к нему l -й и $(l+1)$ -й строк исходной таблицы, $a_{n,l}$ и $a_{n,l+1}$, между которыми этот новый элемент находится. Веса определяются расстояниями между интерполируемым элементом новой таблицы и элементами, по которым производится интерполяция.

Техническая реализация такого алгоритма требует АЦП, ЦАП, цифровой памяти на кадр и простого вычислительного устройства. Исходный видеосигнал преобразуют в цифровую форму. Полученные числа — значения элементов первого раstra — записывают в память. Затем производят вычисление взвешенных сумм (с этим легко справляются в реальном масштабе времени современные микропроцессоры). Числа новой таблицы, составленной из этих взвешенных сумм, поступают строка за строкой на вход ЦАП и преобразуются в аналоговый сигнал, но этот сигнал получен уже в новом стандарте с увеличенным числом строк.

Цифровые преобразователи стандартов повсеместно вытесняют аналоговые преобразователи. Значительно улучшилось качество телевизионных изображений, подвергавшихся преобразованию. Исчезли интерференционные помехи. Резко повысилась стабильность системы

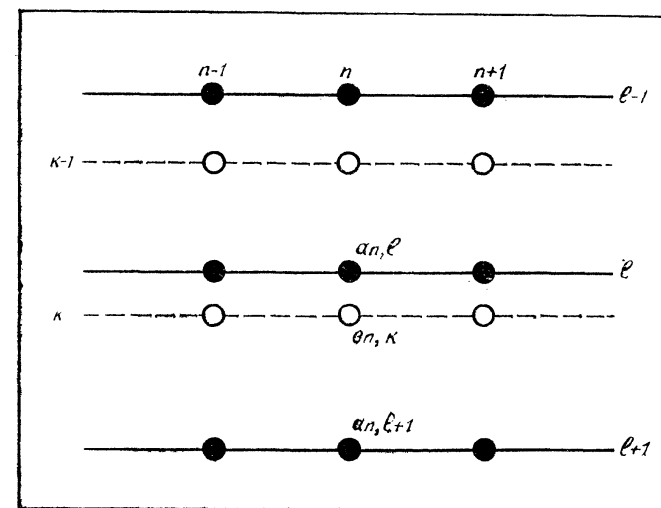


Рис. 4. Расположение интерполируемого и интерполирующих элементов при преобразовании стандартов

преобразования: цифровой преобразователь стандартов работает в бесподстроечном режиме.

Сходным образом решает цифровое телевидение и задачу синхронизации несинхронных источников. В практике современного телевизионного вещания нередко приходится монтировать кадр из изображений, поступающих от далеко отстоящих друг от друга источников видеосигнала. Например, передача со стадиона, находящегося в другом городе, а то и на другом континенте, снабжается на телецентре титрами, замешиваемыми в приходящие кадры. Но эти источники, вообще говоря, несинхронны. Такой монтаж изображений возможен только при условии синхронизации. Иначе одно изображение будет накладываться на другое самым неопределенным образом. А посылать единые синхронизирующие сигналы из одного центра часто не удается.

Цифровая синхронизация несинхронных источников выполняется на том же оборудовании, что и преобразование стандартов, но еще проще. Приходящий на телецентр аналоговый сигнал, полученный от удаленного источника, не синхронизированного сигналами этого телецентра, преобразуется в АЦП в цифровую форму и записывается в цифровой памяти. Считывание записанных кадров производится уже синхронно и синфазно с разверткой на самом телецентре. А затем считанный цифровой сигнал поступает в ЦАП и преобразуется опять в аналоговую форму.

В обоих этих случаях использованы преимущества цифровой памяти — точное соответствие записываемого и воспроизводимого сигнала, надежность, стабильность. Эти же преимущества делают предпочтительнее цифровые методы коррекции временных искажений при видеозаписи на магнитную ленту перед аналоговыми методами.

К сожалению, в цифровом телевидении, по-видимому, не удастся обойтись простым двоичным кодированием, лежащим в основе ИКМ. Ранее уже говорилось о том, как велики цифровые потоки, требующиеся при передаче или записи по методу ИКМ программ вещательного телевидения. Пора уточнить некоторые параметры. Эксперименты показали, что для кодирования полного сигнала СЕКАМ при ИКМ понадобился поток,

равный 114 Мбит/с. Но работать с полным сигналом СЕКАМ на телецентре неудобно. При декодировании, которое требуется для выполнения некоторых операций формирования программы (например, для микширования), ухудшится качество изображения. Большие преимущества в смысле сохранения качества при многочисленных преобразованиях видеосигнала на телецентре имело бы раздельное кодирование яркостного сигнала и двух цветоразностных сигналов. Оценим, какой поток получится при этом.

Полоса частот яркостного сигнала — 6 МГц. Частота отсчетов должна быть по крайней мере вдвое больше. Взяв маленький запас, положим ее равной 12,5 МГц. Число уровней квантования примем за 256. Тогда при использовании метода ИКМ понадобится $\log_2 256 = 8$ разрядов, иными словами, 8 бит на каждый элемент, а всего для передачи 12,5 млн. элементов в секунду понадобится цифровой поток $12,5 \cdot 8 = 100$ Мбит/с. Для каждого из цветоразностных сигналов сохраним то же число уровней квантования. Но поскольку в системе СЕКАМ полоса частот цветоразностного сигнала в 4 раза меньше, чем для яркостного, уменьшится в 4 раза и цифровой поток, приходящийся на один цветоразностный сигнал. Всего же понадобится $100 + 25 + 25 = 150$ Мбит/с для раздельной передачи цветных телевизионных изображений методом ИКМ.

Это приемлемо для внутрителецентровских коммуникаций: кодовые группы можно передавать параллельно, по каналу на каждый разряд, как это принято в вычислительной технике, и тогда требуемая емкость каждого элементарного канала останется в привычных пределах. Но запись таких массивов цифр в единицу времени, например, на цифровом магнитофоне вызывает большие технические трудности. Очень велик цифровой поток при ИКМ, если сравнивать его с цифровыми потоками, требующимися для передачи сообщений другого рода, например, текстов. Один печатный лист (40 тыс. печатных знаков) требует 200 тыс. бит, если ограничиться, как это принято в обычном телеграфном коде, пятью двоичными единицами на знак. Это обозначает, что по тому каналу, который требуется для передачи телевизионных программ методом ИКМ, можно всего лишь за одну секунду передать более чем полтысячи печатных листов текста — скажем, порядка полтора-

ста книжек такого объема, как та, которую держит сейчас в руках читатель.

Даже сравнительно скромный выигрыш в требуемом для передачи телевидения цифровом потоке имел бы большое экономическое значение. Особый интерес представляло бы сокращение цифрового потока до значений порядка 34 Мбит/с или еще более. Это связано с нормами на каналы ЕАСС. Магистраль Единой системы напоминают реки с притоками, в свою очередь, имеющими еще меньшие притоки. Самая большая, так называемая четверичная, магистраль должна пропускать поток порядка 140 Мбит/с. Ее «притоки» (или, напротив, если продолжить сравнение, «рукава») — третичные магистраль — имеют вчетверо меньшую пропускную способность, порядка 34 Мбит/с. Следующие по рангу магистраль еще в 4 раза меньше, порядка 8 Мбит/с, и т. д. При кодировании телевизионных программ методом ИКМ получается поток, занимающий основную часть емкости четверичной магистраль. Хотя изображения справедливо считаются весьма избыточным видом сообщений, пока не видно технических возможностей такого сокращения, чтобы «уложить» цветное телевизионное вещание в 8 Мбит/с. Но третичная магистраль для цветного телевидения — реальная перспектива сокращения. Однако для этого придется вместо простых кодов ИКМ применять более сложные методы кодирования.

Основные пути разработки методов сокращения цифровых потоков кратко рассмотрены далее.

Структура отсчетов

Цифровое кодирование изображений начинается с их дискретизации.

Сразу заметим, что возможность замены непрерывного сообщения дискретными отсчетами определена тем, что изображения ограничены по спектру временных и пространственных частот. Эта возможность самым существенным образом использована в зрительном аппарате человека и животных. Уже на уровне сетчатки глаза поле изображения разбивается на малые участки, внутри которых дальнейшие детали не различаются или различаются лишь грубо. Дискретизируется изображение и во времени. Глаз отчитывается

перед вышележащими отделами мозга не о каждом моменте времени, а за некоторые небольшие, соизмеримые с одной десятой секунды, интервалы, внутри которых временное разрешение практически отсутствует.

Впрочем, иначе и не могло быть. Световая энергия — если даже оставить в стороне квантовую структуру света, — пришедшая на бесконечно малый участок сетчатки за бесконечно малое время, была бы соответственно бесконечно мала. Сигнал не смог бы сформироваться. Нейронам сетчатки приходится суммировать по площади некоторого элементарного, но конечного участка и накапливать за некоторое конечное время энергию, достаточную для формирования зрительного сигнала, который уже можно будет, не боясь помех, отправить выше по волокну зрительного нерва. Такая дискретность первичного акта восприятия не мешает нам видеть предметы непрерывными, а движения — слитными.

Дискретизации должна предшествовать фильтрация — «сглаживание» изображений в пространстве и во времени. В противном случае могут возникнуть искажения типа стробоскопического эффекта. Например, при киносъемке разделение изображения во времени на дискретные кадры производится без должной фильтрации. Если снимают какой-либо периодический процесс, например вращение колеса со спицами, могут возникнуть биения, и мы видим на экране колесо, остановившееся или даже медленно вращающееся в противоположную сторону. А вот в глазу, накапливающем сигнал, как, впрочем, и в телевизионной трубке с накоплением, из-за накопления осуществляется фильтрация, верхние частоты подавляются, стробоскопический эффект не возникает.

Фильтрация нужна и при восстановлении изображения, переданного дискретными посылками. В противном случае в сигнале могут сохраниться побочные частоты, вызванные дискретизацией с помощью периодических отсчетов. На экране возникнут мешающие муары.

Большой объем цифрового потока в телевидении связан прежде всего с тем, что очень велико число отсчетов, а попросту элементов изображения, подлежащих передаче в единицу времени. Нельзя ли сократить это число?

Казалось бы, ответ должен быть отрицательным. Ведь уменьшить число отсчетов — значит уменьшить разрешение и, следовательно, ухудшить заметным для зрителя образом качество изображений. Теория информации указывает граничное значение частоты отсчетов: если, например, видеосигнал имеет спектр шириной 6 МГц, то частота отсчетов должна быть 12 МГц.

Но при этом рассуждении не учтено, что изображение — не одномерный сигнал. Это — функция трех независимых переменных: двух пространственных координат и времени (а цветное изображение — три функции трех переменных). Даже если пока не принимать в рассмотрение дискретизацию во времени, речь должна идти о функции двух переменных. Телевизионные кадры можно представить как случайную двумерную функцию, стационарную в первом приближении, пока мы ограничиваемся одним сюжетом, одним классом изображений. Одномерный сигнал характеризовался своим спектром. Именно спектр надо было знать, чтобы оценить число отсчетов сигнала, по которым можно будет восстановить его после приема дискретной последовательности и ее сглаживания. Такую же роль в теории дискретизации изображений играет спектр пространственных частот.

Границу спектра одномерной функции, например видеосигнала, обозначает одно число — граничная частота на оси частот f . В двумерном случае мы имеем дело уже не с осью, а с плоскостью частот f_x, f_y , и спектр ограничивают на этой частотной плоскости линией.

С помощью пространственных частот можно характеризовать и разрешающую способность зрения. Зрение не изотропно. Разрешающая способность его по различным направлениям различна. На рис. 5 показана приблизительная форма границы пространственно-частотной характеристики зрения, полученная усреднением по многим наблюдениям. Видно, что протяженность ограниченной ею области по вертикали и горизонтали значительно больше, чем в диагональных направлениях, под углом 45° к осям. Иными словами, по вертикали и горизонтали разрешение больше, чем по диагоналям. Можно полагать, что это свойство зрения возникло как следствие приспособления к свойствам реальных изображений: их пространственно-частотные

спектры, как правило, анизотропны и имеют форму, сходную с фигурой на рис. 5.

Поскольку это так, обычная, принятая в ИКМ ортогональная структура расположения отсчетов в узлах прямоугольной решетки невыгодна. В самом деле, рассмотрим эту структуру более подробно (рис. 6). Минимальное расстояние между соседними контурами (например, черной и белой линиями на изображении), расположенными по вертикали или горизонтали (линии 1 и 2 на рис. 6, а) равно шагу дискретизации — расстоянию между соседними отсчетами. А вот если контуры ориентированы по диагонали (линии 3 и 4 на рис. 6, а), минимальное расстояние между ними сокращается в $\sqrt{2}$ раз. При такой дискретизации разрешение по диагонали больше, чем в вертикальном и горизонтальном направлениях. В этом легко убедиться. Достаточно предъявить цифровой телевизионной системе с дискретизацией по типу рис. 6 штриховую миру — решетку с шагом, немного меньшим, чем шаг дискретизации, сперва вертикально, а потом под углом 45° . Когда штрихи ориентированы по вертикали, они не разрешаются, а при повороте на 45° структура миру хорошо различается.

Между тем в том направлении (по диагоналям), где рассматриваемая структура расстановки отсчетов обеспечивает лучшее разрешение, зрительная система разрешает хуже. И напротив, эта структура ухудшает разрешение в наиболее важных для зрения направлениях, по вертикали и горизонтали.

Этот недостаток ортогональной структуры полезно обсудить и на языке пространственно-частотных представлений. При дискретизации двумерных изображений, т. е. замене исходного непрерывного изображения периодическими точечными отсчетами, помимо основного спектра пространственных частот, возникнут по-

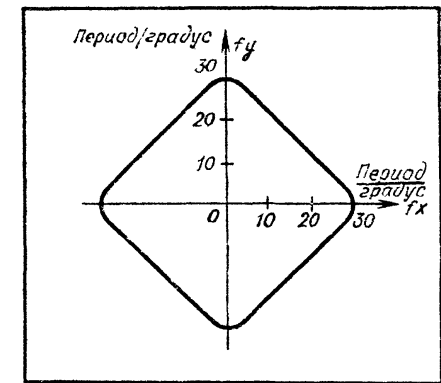


Рис. 5. Форма границы двумерной пространственно-частотной характеристики зрения

бочные спектры. Они повторяют форму исходного спектра, но смещены по плоскости. На рис. 6, а показано расположение побочных спектров при ортогональной дискретизации. Эти побочные спектры не должны перекрываться с исходным, основным спектром. В противном случае при восстановлении изображения по отсчетам не удастся отфильтровать помехи, вызванные

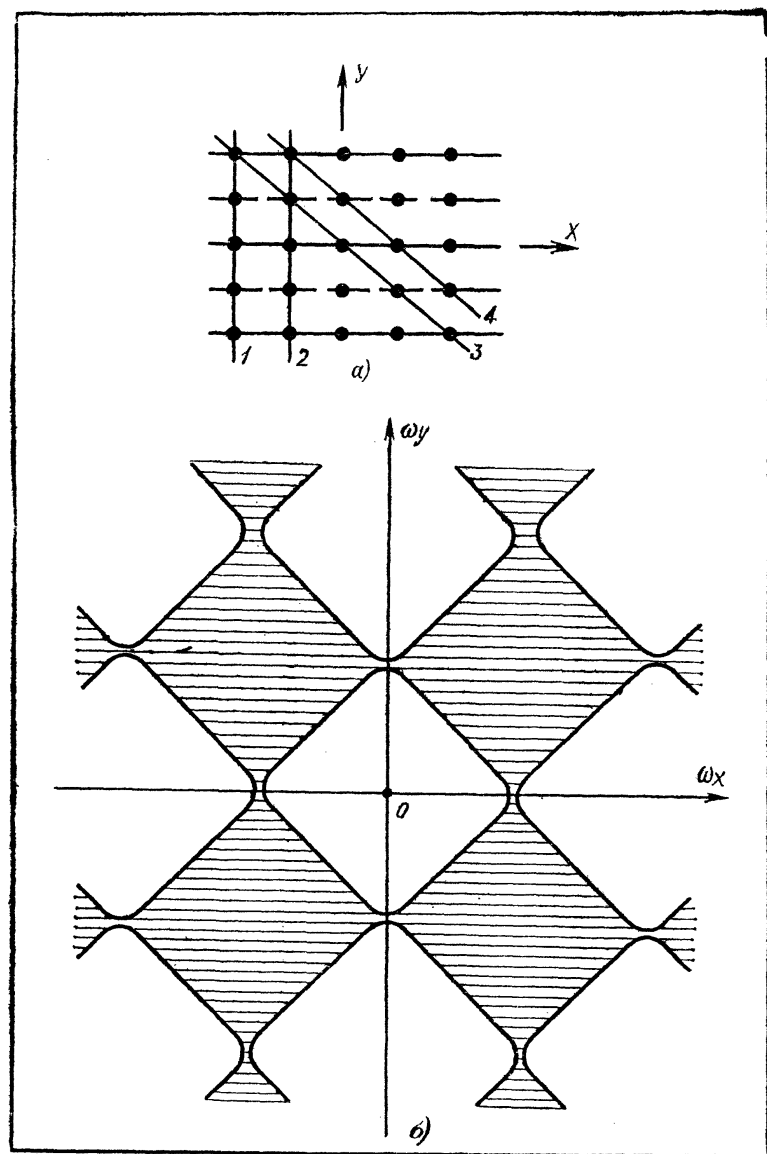


Рис. 6. Ортогональная структура отсчетов: а — расположение отсчетов; б — основной и побочные спектры на плоскости пространственных частот

этим перекрытием спектров, — они будут лежать в области основного спектра. А чтобы должным образом сместить побочные спектры относительно основного, приходится располагать отсчеты достаточно часто и по горизонтали и по вертикали и как следствие этого производить отсчеты видеосигнала во времени с той высокой частотой, о которой говорилось выше.

Несоогласованность между формой пространственно-частотной характеристики зрения, соответствующей форме спектра реальных изображений, и структурой расположения отсчетов при ортогональной дискретизации отображается на рис. 6, б тем, что на частотной плоскости возникают пустоты, показанные штриховкой. В направлениях, в которых зрение хорошо разрешает, побочные спектры вплотную подступают к основному, а в диагональных направлениях, где разрешающая способность зрения хуже, побочные спектры разнесены значительно.

Чтобы дискретизация была эффективнее, надо добиться более компактного расположения основного и побочных спектров, более плотной «упаковки» их на частотной плоскости. Нетрудно сообразить, как надо расставить отсчеты, чтобы плотнее упаковать спектры. Достаточно сместить центры побочных спектров в диагональных направлениях, уложить их так, как показано на рис. 7, б. Этому соответствует структура отсчетов на рис. 7, а. Теперь центры побочных спектров приблизились и по вертикали и по горизонтали к центру основного спектра, а это значит, что соответственно увеличились расстояния между отсчетами на плоскости в обоих направлениях (отсчеты на рис. 7, а расположены реже, чем на рис. 6, а). Между тем перекрытие спектров не возникло.

Теперь структура дискретизации согласована со свойствами зрения. Наибольшее разрешение обеспечивается в нужных направлениях: по вертикали и горизонтали контуры могут располагаться ближе, чем в диагональных направлениях. Растр при такой оптимальной дискретизации имеет как бы диагональную структуру. Это хорошо известный тип раstra. Он применяется в типографской технике.

Число отсчетов может быть сокращено при переходе к диагональной структуре вдвое за счет ограничения разрешающей способности зрения, отражающего стати-

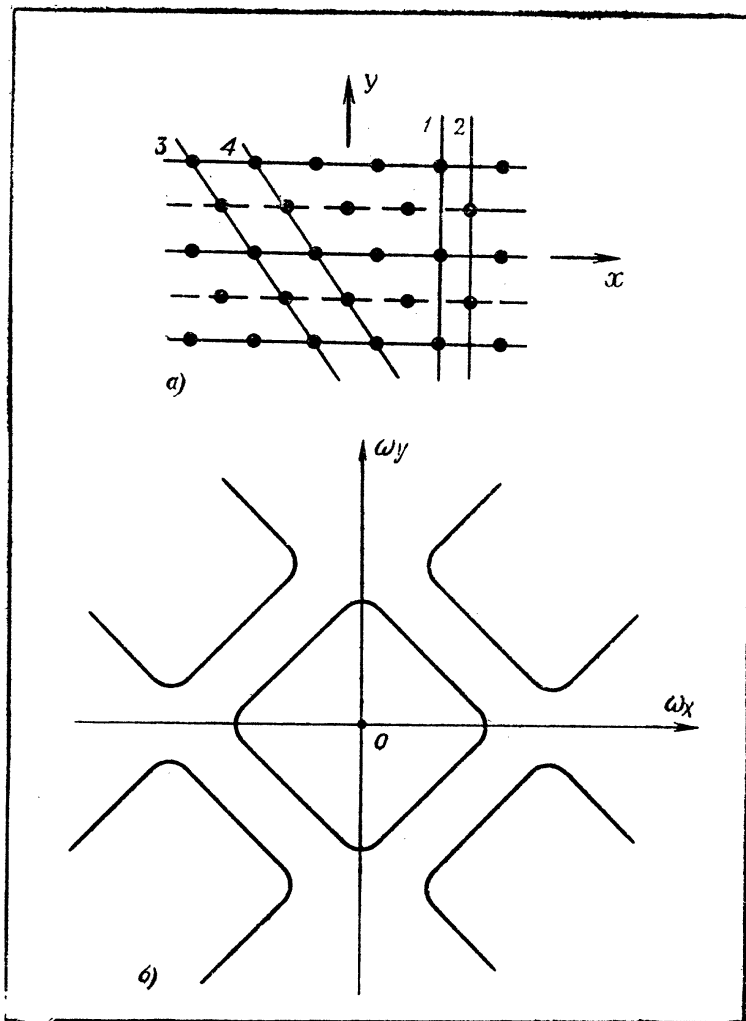


Рис. 7. Диагональная структура отсчетов:
 а — расположение отсчетов; б — основной и побочные спектры на плоскости пространственных частот

стические свойства реальных изображений. Это характерно для современных методов сокращенного кодирования в телевидении — используя то или иное свойство зрительного восприятия, косвенно по крайней мере учитывают статистику изображений.

К сожалению, непосредственно применить диагональную структуру расположения отсчетов в том случае, когда имеют дело не с неподвижным типографским клише, а с телевизионным изображением, так просто не удастся. В действующем сейчас стандарте применя-

ют чересстрочное разложение. Кадры, следующие с частотой, достаточной для слитной передачи движений (25 Гц), разделены на поля четных и нечетных строк, сменяющих друг друга с частотой, близкой к критической частоте слияния мельканий (50 Гц). Если формировать таким образом растр с диагональной структурой, возникнет характерное мерцание на мелких деталях. Эту «мерцающую помеху» можно, вообще говоря, подавить с помощью фильтрации. Но фильтры такого рода включают цифровую кадровую память и уже из-за этого относительно сложны.

Более удобны в этом смысле некоторые другие структуры расположения отсчетов, например, показанная на рис. 8. Здесь использована идея смещения по-

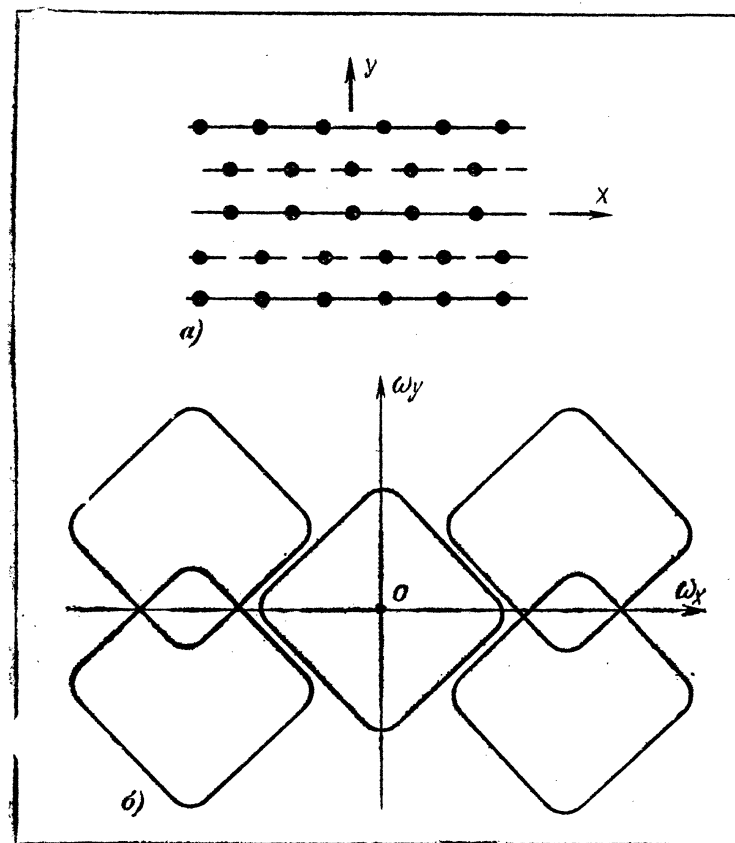


Рис. 8. Структура отсчетов, при которой не возникает мерцающая помеха:
 а — расположение отсчетов; б — основной и побочные спектры на плоскости пространственных частот

бочных спектров в диагональных направлениях. Но из-за соответствующего расположения отсчетов в полях при чересстрочном разложении мерцающая помеха такого рода, как в предыдущем случае, уже не возникает. Качество изображения практически не ухудшалось при сокращении частоты отсчетов в видеосигнале до 8,87 МГц.

Даже само по себе такое расположение отсчетов уменьшает их количество в кадре более чем на четверть и соответственно сокращает цифровой поток. Однако потребуются и другие меры, чтобы телевизионные сигналы в цифровой форме можно было передавать по третичной магистрали и экономно записывать на магнитной ленте.

До сих пор речь шла об отсчетах яркостной составляющей. Только здесь имели значение данные о предельной разрешающей способности глаза. Ведь, как известно, глаз не различает цвета мелких деталей. Это свойство зрения лежит в самой основе современных систем цветного телевидения.

Во всех системах цветного телевидения полоса частот сигналов, несущих информацию о цветности, много уже полосы, отведенной для передачи распределения яркости. Так, например, в системе СЕКАМ соотношение между этими полосами равно 1:4. Это, говоря приблизительно, обозначает, что на каждые четыре отсчета яркости вдоль строки достаточно лишь одного отсчета цветности.

Цветное зрение изотропно. Различение цвета деталей не зависит от их ориентации. Система СЕКАМ использует и это, впрочем, как и система ПАЛ. Цвет детали синтезируется здесь на соседних строках. За время одной строки передают один цветоразностный сигнал, за время следующей строки поля — другой. Цвет как бы размыт по вертикали, а не только по горизонтали.

Физиологи, исследующие цветное зрение, ставили такой опыт. В темной комнате на экране испытуемым предъявляли в случайном порядке небольшие фигуры — квадрат, круг, равносторонний треугольник — с поперечными угловыми размерами порядка нескольких минут. Такие размеры имеют детали телевизионного изображения с поперечными размерами порядка нескольких элементов разложения при расстоянии наилучшего

рассматривания. Экспериментатор регистрировал значения пороговых яркостей, при которых испытуемый: 1) обнаруживал стимул, 2) опознавал его цвет, 3) опознавал его форму. Как правило, порог распознавания цвета лежал значительно выше порога обнаружения. Испытуемый уже видел светящееся пятнышко, но еще не мог сказать, какого оно цвета. Исключение составлял случай красного цвета — здесь одновременно удавалось и обнаружить стимул, и увидеть, что он — красный. Это между прочим еще один довод в пользу выбора запрещающего цвета светофоров. А порог распознавания формы лежал еще выше.

По-видимому, линейные размеры элементарной площадки, внутри которой практически в реальных условиях уже не различаются изменения цвета, а цветовосприятие происходит как бы интегрально, имеют порядок четырех элементов; разрешаемых глазом по яркости. Надо передавать цвет сразу всей элементарной площадки, а не только одного элемента разложения. В этом — важнейший пока резерв сокращения той части цифрового потока, которая приходится на цвет. Следует только позаботиться о надлежащей фильтрации, «сглаживании» границ между этими площадками, чтобы на глаз не обнаруживалась столь грубая дискретизация, т. е. чтобы не возникало впечатление мозаики на плавных, в действительности, цветовых переходах. И, конечно же, отсчеты цветности должны быть жестко фиксированы относительно более частых отсчетов яркости.

Значительные резервы сокращения цифрового потока в телевидении связаны и с дискретизацией изображений во времени. Стандартная частота кадров 25 Гц выбрана исходя из уже стандартизованной ранее частоты смены кадров в кино, обеспечивающей слитность движений. Только вместо принятых в кино 24 кадров в секунду использовали частоту, кратную частоте переменного тока.

Но, как и всегда при выборе частоты отсчетов, следует выяснить, соответствует ли она реально воспринимаемому спектру частот, теперь уже не пространственных, а временных. Этот вопрос имеет практическое значение. Например, при передаче по программе «Аполлон—Союз» было учтено, что космонавты в условиях невесомости избегают резких, быстрых движений, а,

следовательно, спектр временных частот здесь смещен в низкочастотную область. Благодаря этому при передаче частоту смены кадров можно было снизить втрое и в той же полосе частот, что и в обычном вещании, последовательно передавать три цветовых составляющих кадра за втрое большее время. На Земле каждые три кадра собирались с помощью запоминающего устройства в один и передавались уже в обычном стандарте, но каждый «космический» кадр приходилось повторять трижды. А возможность последовательной передачи значительно упростила цветную передающую камеру на борту космического корабля.

В цифровом телевидении появляется возможность уменьшить частоту смены кадров. Искажения при некотором снижении частоты кадров все еще будут незаметными, если прибегнуть к фильтрации, сглаживанию изменений во времени. Правда, при этом несколько пострадает разрешение быстро движущихся объектов. Но оно и без того уменьшается из-за инерционности зрения.

Уровни квантования

О числе уровней квантования в цифровом телевидении уже было кое-что сказано. Рассмотрим несколько подробнее, не обнаружатся ли и здесь резервы для экономного представления изображений в цифровой форме.

Возможность квантования без приметного для глаза искажения изображений основана на существовании зрительных порогов. Конечно, если число уровней квантования будет недостаточно, станут видны ступенчатые перепады, возникшие на месте плавных переходов подобно границам между обозначенными на географической карте оттенками синего — различным глубинам океана. На изображении появятся ложные контуры. Особенно сильно искажают они кадры такого типа, как лицо крупным планом.

Число уровней квантования, достаточное для того, чтобы не было заметно, что изображение проквантовано, нетрудно оценить. Пороговый контраст — отношение минимальной, еще замечаемой глазом разности между яркостью тестового пятна и яркостью фона к последней, остается практически постоянным в диапазоне

изменения яркости на обычных телевизионных экранах. Это частный случай общего психофизического закона Вебера-Фехнера. Для больших размеров тестового пятна пороговый контраст имеет порядок 0,02. Если отношение максимальной яркости на экране к минимальной составляет 100, что близко к реальным значениям, то достаточно $2^8=256$ уровней квантования, чтобы нигде интервал между уровнями не превысил порогового значения.

Это количество числа уровней — оценка сверху. Она сделана в предположении, что глаз длительно адаптировался к освещенности фона, а само изображение представляет собой однородный фон и слегка отличающийся от него однородный объект (тестовое пятно) больших размеров. В действительности, т. е. в реальных условиях наблюдения реальных телевизионных изображений, это число может быть уменьшено по крайней мере до $2^7=128$ уровней. Так что обычно используемое число уровней квантования — 256 — выбрано как бы с некоторым запасом.

Когда изображение сложное, детальное, число уровней может быть значительно меньшим. Дело в том, что значение порогового контраста существенно зависит от размера объекта на фоне. Для объектов, угловые размеры которых порядка нескольких минут, пороговый контраст приближается к единице: маленькое пятно становится заметным, лишь когда его яркость превышает фон на величину, сравнимую с яркостью самого фона. И чем больше яркость фона, тем больше должно быть это превышение, чтобы можно было заметить различие. Небольшие детали, контурные линии, места резких перепадов можно квантовать на меньшее (и даже значительно меньшее) число уровней, чем большие участки с плавными перепадами. Правда, в ИКМ число уровней квантования приходится все равно выбирать большим в расчете на те случаи, когда квантование более заметно. Однако имеются способы кодирования изображений, где существенно используется различие в необходимом числе уровней квантования для деталей различных размеров. К этому мы еще вернемся.

Одним из следствий закона Вебера-Фехнера является то, что для сохранения порогового контраста по всей шкале квантования уровни следует располагать по логарифмическому закону — чаще в более темных обла-

стях, реже в более светлых. Считается, что при нелинейной (логарифмической) шкале понадобится вдвое меньше уровней, чем при равномерной шкале, т. е. на один двоичный разряд меньше. Однако логарифмическая шкала, достаточно просто реализуемая при параллельном способе аналого-цифрового преобразования, неудобна, например, при применении параллельно-последовательных АЦП.

До сих пор, говоря о неприемлемости квантования изображений на малое число уровней, мы отмечали лишь то, что это приводит к появлению ложных контуров. Однако при грубом квантовании изображений возникает еще один существенный дефект: подчеркиваются флуктуационные помехи. Некоторые из шумовых выбросов как бы подтягиваются к соответствующему уровню квантования. Изображение в целом начинает казаться более зашумленным.

Неправильный выбор числа уровней квантования особенно неприятно сказывается на цветных изображениях. Из-за так называемых шумов квантования возникают ложные цветные узоры, наиболее заметные на таких сюжетах, как лицо крупным планом. На плавных перепадах яркости появляется цветная окантовка.

Все это вынуждает выбирать в системе ИКМ число уровней квантования порядка 128—256. Только для передачи информации о яркости расходуется при этом 7—8 бит на элемент. А если добавить сюда то, что приходится на цветность, потребуется более 10 бит/элемент, и это даже при учете тех ограничений цветового зрения, о которых говорилось выше.

Но действительно ли столько двоичных единиц информации содержится в каждом элементе изображения? Простые рассуждения показывают, что это далеко не так и что имеются значительные резервы для сокращения цифрового потока.

Кодирование с предсказанием

В цифровой телевизионной системе типа простой ИКМ каждый отсчет (элемент изображения) кодируется независимо от других отсчетов. В этом — главная причина того, что на кодирование каждого элемента расходуется так много двоичных цифр.

В прикладном телевидении встречаются ситуации,

когда возникает резкое различие между вероятностями тех или иных значений яркости, например, в уже упоминавшемся случае приложения телевизионных методов для анализа снимков со следами ядерных частиц. Здесь вероятность элементов фона во много раз превышает вероятность, с которой встречаются на этом фоне пузырьки, образующие исследуемый трек ядерной частицы. И этим, как уже было отмечено, удастся воспользоваться для существенного сокращения цифрового потока, поступающего в ЭВМ. В цифровой форме передают координаты центров пузырьков, а элементы-фона не передают вообще. Пусть вероятность «ненулевых» элементов на фоне имеет порядок 10^{-3} . Например, на 10 млн. точек фона приходится 10 тыс. пузырьков. Их положение передают, кодируя координаты центра пузырька двоичным кодом. Для указания координат понадобится число двоичных единиц, равное двоичному логарифму общего количества элементов в кадре, точнее, равное ближайшему к этому логарифму большему целому числу. Ближайшее сверху целое число для двоичного логарифма от 10 млн. равно 24. Понадобится 240 тыс. двоичных цифр, чтобы полностью описать интересующую нас информацию. А вот если бы использовали обычную ИКМ и каждый элемент передавали нулем или единицей, нужно было бы 10 млн. таких цифр — примерно в 40 раз больше.

Но в вещательном телевидении нет ничего похожего на такие возможности. Вероятности различных градаций распределены здесь по динамическому диапазону, вообще говоря, значительно более равномерно, чем, например, вероятности букв в тексте. К тому же эти распределения изменяются от сюжета к сюжету столь значительно, что код, дающий выигрыш в сюжетах одного класса, привел бы к проигрышу в других сюжетах.

Положение существенно изменяется, если при кодировании данного элемента учитывать хотя бы один из соседних. Зная один элемент, удастся в большинстве случаев достаточно верно предсказать другой. Наиболее простой метод предсказания сводится к тому, что предполагают яркость последующего элемента такой же, как и у предыдущего. Так, например, предсказывают, что яркость последующего элемента на строке равна яркости предыдущего или в другом случае, что яркость элемента в данном кадре такая же, как яркость соот-

ветственно расположенного элемента в предыдущем кадре. Успешность такого предсказания есть следствие статистической избыточности изображений.

Предсказание можно производить не только по одному, но и по двум, трем, четырем и более элементам изображения. Однако знание еще одного элемента, предшествующего по строке или расположенного на соседней строке или расположенного соответственно еще в одном предшествующем кадре, уже не так сильно изменяет качество предсказания, как знание одного предшествующего элемента, — по сравнению со случаем, когда элемент пытаются угадать, ничего не зная о его окружении.

Это значит, что когда уже известен соседний элемент (или элементы) изображения, предсказываемый элемент содержит уже относительно меньше информации, чем было бы при независимом кодировании элементов. А раз это так, следует ожидать уменьшения числа двоичных цифр на элемент при кодировании с предсказанием.

Чтобы реализовать эту возможность, надо передавать вместо исходного изображения разностный сигнал или ошибку предсказания. Там, где предсказание оказалось верным и разность не превзошла некоторого порога (например, ступени квантования), сигнал принимает нулевое значение. Там же, где предсказание было ошибочным, передают ошибку предсказания — разность между предыдущим и последующим значениями, а в более общем случае между предсказанным и истинным значениями. В этом и состоит общая идея так называемой дифференциальной импульсно-кодовой модуляции (ДИКМ).

Межэлементная, а особенно межкадровая разность принимает вид нулевого фона с относительно редкими нулевыми значениями. Но все же они оказались не такими редкими, чтобы получить заметный выигрыш. Теоретическое рассмотрение этого выигрыша, основанное на изучении статистики межэлементных и межкадровых переходов, привело к оценке его порядка 2—3. Самое же главное затруднение возникло опять из-за различий между сюжетами. Телевизионные изображения в вещательных программах не образуют стационарного ансамбля. «Кодовую книгу» пришлось бы менять от сюжета к сюжету. То и дело возникали бы перегрузки —

например, ошибка предсказания по кадру резко возрастает при различных движениях, смене сюжета и т. п.

И все же связи между близкими элементами телевизионного изображения удалось использовать на практике. Кодирование с предсказанием — один из нашедших уже теперь практическое применение видов кодирования телевизионных изображений. Однако непосредственно это кодирование основано на ограничениях зрительного восприятия. Оно учитывает статистические свойства изображений не непосредственно, а опосредованно, через особенности зрения, согласованные, в свою очередь, со статистикой изображений.

В зрительной системе человека и животных для экономного представления информации об изображениях используются их статистические свойства. В частности, здесь обнаружено и кодирование с предсказанием. Уже на уровне сетчатки глаза формируются сигналы, напоминающие разностные, выделяются и подчеркиваются контуры объектов. Операции такого рода, связанные с тем, что физиологи называют латеральным торможением (боковым торможением), играют важную роль в процессе адаптации зрения к условиям наблюдения, заметно подавляя фон, что приводит к лучшему использованию динамического диапазона зрительной системы. Есть в зрении и процессы, прямо напоминающие формирование межкадровых разностей. Нейроны сетчатки передают в вышележащие отделы мозга сигналы лишь об изменениях освещенности на связанных с ними фоторецепторах. Если «межкадровая разность» отсутствует, то сигналы не возникают. Мы не замечаем этого потому, что наши глаза находятся в непрерывном движении. Но если остановить изображение на сетчатке — например, компенсировать его смещение оптическим путем или просто проектировать изображение с помощью маленького проектора, укрепленного на глазном яблоке и, следовательно, неподвижного относительно сетчатки, изображение исчезнет, превратившись в некий серый фон, «пустое поле».

Кодирование с предсказанием повышает эффективность информационных систем зрения. Сокращаются затраты на то, что не содержит нового, не изменяется, не отличается от окружающего. И напротив, усиливаются, подчеркиваются, чтобы противостоять возможным помехам, те информативные элементы, которые имеют-

ся в изображении. При этом может возникнуть даже некое предсказание изображений. Оно заметно, например, при рассматривании ступенчатой шкалы серого. На границе между двумя площадками разной яркости появляется своего рода выброс, уходящий в сторону черного там, где яркость меньше, и в сторону белого там, где яркость больше.

Таким образом, зрительная система, кодируя изображение с использованием корреляционных связей между элементами его в пространстве и во времени, вместе с тем как бы нарочито искажает сигнал ошибки предсказания. Эти искажения тем больше, чем больше сама ошибка, или, проще, соответствующая разность между данным и соседними элементами на плоскости и во времени. Естественно, что и в телевизионной системе должны учитываться эти искажения. В методе ДИКМ ошибку предсказания грубо квантуют — на значительно меньшее число уровней, чем должен быть проквантован сигнал в обычной ИКМ. И хотя ошибка предсказания имеет, казалось бы, вдвое больший диапазон, чем исходный сигнал (ведь она может принимать и отрицательные и положительные значения), число уровней квантования ошибки настолько меньше исходного числа уровней, что достигается заметный выигрыш за счет этого грубого квантования.

Учитывая особенности зрительных порогов, шкалу квантования ошибки предсказания выбирают существенно нелинейной. Более того, ее делают несимметричной относительно нуля: уровни квантования расположены по-разному, а зависимости от того, какой знак имеет ошибка предсказания.

Многочисленные экспериментальные исследования метода ДИКМ показали, что кодирование с предсказанием «внутри кадра», например в направлении строчной развертки, сокращает число двоичных единиц, входящих на информацию о яркости одного элемента, до 4 или даже до 3. Межкадровое кодирование с предсказанием требует наличия памяти на кадр и до последнего времени было изучено не столь тщательно, как внутрикадровое.

Статистические связи между близкими элементами изображения делают этот вид сообщений особенно помехоустойчивым. Даже многочисленные ошибки в передаче элементов изображения не в состоянии раз-

рушить зрительные образы. Восстановление этих образов «по контексту» изображения удается, как правило, лучше, чем восстановление текстов, пораженных таким же количеством ошибок.

Однако при кодировании с предсказанием помехоустойчивость телевизионной системы, вообще говоря, уменьшается. В результате кодирования происходит частичная декорреляция изображения, ослабевают некоторые существенные связи, изображение становится более «хрупким», уязвимым для помех. Помеха, поразившая один из элементов изображения, после восстановления изображения на приемной стороне станет причиной искажения всех последующих элементов. Ведь каждый последующий элемент восстанавливается путем прибавления переданной разности к предыдущему элементу. И если какой-либо из элементов будет декодирован с ошибкой, то ошибочное значение примет и следующий — теперь к разности, соответствующей этому элементу, будет прибавлено значение предыдущего элемента, содержащее ошибку. Возникнет то, что называется следом, или треком ошибки. Этот трек ошибки прервется, лишь когда какой-либо из последующих элементов будет передан не разностным сигналом, а непосредственно. Так, обновление сигнала может происходить на каждой строке. Первый элемент строки при этом должен передаваться, как в ИКМ. Если ошибки не слишком редки — например, если встретится хотя бы одна ошибка в кадре (в пересчете на коды это обозначает, что вероятность ошибки порядка 10^{-6}), то искажения будут уже заметны зрителю. Приблизительно на одной из строк возникнет трек ошибки. Средняя длина трека будет порядка половины строки. Зрительная система легко обнаруживает такие конфигурации. В отличие от случайных ошибок типа так называемого «снега», при достаточно высоком отношении сигнал/помеха не оказывающих влияния на качество воспроизведения, треки ошибок — своего рода оструктуренные ошибки — уже существенно снижают это качество.

Кодирование с предсказанием чувствительно и к шумам квантования. Каждое искажение, вызванное «подтягиванием» ошибки предсказания к соответствующему уровню квантования, не останется локализованным только на данном элементе, как это происходило бы в обычной системе ИКМ, но оставит свой след и далее.

Шумы квантования будут накапливаться и снижать качество изображения.

Однако с шумами квантования при кодировании с предсказанием все же удается успешно бороться. Ведь на передающей стороне известно и истинное значение сигнала. Производя декодирование на передающей стороне, используя обратную связь и сравнивая исходный сигнал с декодированным, можно учесть и скорректировать шумы квантования, ограничить распространение вызванных ими искажений.

Сложнее обстоит дело с помехами в канале связи. Одна из возможностей уменьшения распространения ошибок при декодировании состоит в том, чтобы уменьшить вес вклада предшествующего элемента при кодировании. Можно, например, кодировать, предсказывая последующий элемент не по одному, а по двум предшествующим, один из которых расположен на той же строке, а другой — на предшествующей строке поля, над предсказываемым элементом. При этом новый элемент предсказывают как взвешенную сумму предшествующих. Если даже веса равны, ошибка быстро сойдет на нет — ведь один из элементов передается правильно.

В этом случае (двухмерного кодирования с предсказанием) ошибка, как правило, не так заметна, как при одномерном кодировании. Она проявляется теперь в виде малоконтрастного пятнышка с нечеткими очертаниями, тогда как в одномерном случае помеха приводила к резко заметному выпадению большей или меньшей части строки. И все же преимущества двухмерного кодирования с предсказанием оказались не такими уж бесспорными. Выпавшую строку нетрудно заменить, повторив предыдущую или, что еще лучше и становится легко осуществимым благодаря цифровой памяти, усреднив предыдущую и последующую строки. Операция замены выпавшей строки еще ранее нашла применение в телевидении. Так устраняют аналогичную погрешность магнитной видеозаписи. Следует однако иметь в виду, что при этом возникает местное ухудшение четкости. Поэтому такая замена выпавшей строки или ее части менее заметна, когда кодирование с предсказанием применяют лишь для передачи сигналов цветности.

Другая возможность борьбы с распространением

ошибки при кодировании изображений с предсказанием сводится к более частой, чем один раз за строку, передаче значений самих элементов, а не разностного сигнала. Тогда помеха локализуется, трек ее обрывается с приходом нового «опорного» значения.

Чем чаще расставлены эти опорные значения, тем менее заметны помехи. Но для передачи каждого из них приходится затрачивать гораздо больше двоичных единиц, чем для передачи элементов разностного сигнала, — по существу, столько же, сколько двоичных единиц приходилось на элемент в системе ИКМ. А это значит, что уменьшается общий выигрыш в числе двоичных цифр. Существует, по-видимому, некое оптимальное расстояние между последовательным и опорными отсчетами. Оно составляет лишь несколько элементов изображения, например четыре. Трек ошибки становится в среднем порядка двух элементов. Это уже не групповая помеха, нарушающая заметным образом структуру изображения, а лишь маленькое быстро промелькнувшее пятнышко. По видности помехи этот метод уже практически незначительно отличается от ИКМ.

Казалось бы, цифровой поток при этом приближается к тому значению, которого он достигал в случае ИКМ. Однако это не так. Кодирование в рассматриваемом случае можно представить как предсказание в обе стороны от опорного отсчета. Зная на передающей стороне и два предыдущих, и два последующих элемента, удается адаптироваться к содержанию этой маленькой группы, применять не одну единственную шкалу, а выбирать, например, одну из двух возможных шкал квантования и в среднем снижать требуемое число двоичных цифр на передачу ошибки предсказания.

По существу, такой метод является уже переходом к обобщенному квантованию, к кодированию одновременно целой группы элементов. Обычно же при ДИКМ предсказывается не группа, а лишь одно значение. Если даже квантовать ошибку предсказания всего на три уровня — нуль, $+1$ и -1 , понадобится приблизительно полторы двоичных единицы на элемент (точнее, двоичный логарифм трех). На самом деле, чтобы и при сокращении потока качество изображения оставалось приемлемым, приходится затрачивать в 2—3 раза больше. Именно такие значения характерны для методов ДИКМ.

Кодирование групп элементов

То, что наиболее эффективная система передачи сообщений требует не по-элементного, а группового кодирования, является одним из общих выводов теории информации. Чтобы лучше учесть связи между элементами изображений, следует одновременно кодировать группу элементов. Это — одно из основных направлений развития техники эффективного кодирования телевизионных сообщений.

Разобьем кадр телевизионного изображения на группы элементов, например, на небольшие квадраты. В дальнейшем мы специально обсудим, какой размер одновременно кодируемой группы следует выбрать. В цифровом телевидении эти группы — участки изображения сперва кодируют таблицей чисел — матрицей, каждый элемент которой выражает яркость соответственно расположенного элемента изображения.

Это — не единственный способ представления такого фрагмента числовой таблицей. Уже кодирование по методу ДИКМ приводит к новым таблицам, выражающим в другой форме то же распределение яркости.

Однако и в этом виде сохраняется принцип поэлементного кодирования. Но нельзя ли закодировать одновременно весь участок, всю группу чисел, заменить исходную таблицу другой, каждая ячейка которой определялась бы уже не одним элементом кодируемого изображения, а сразу всеми элементами рассматриваемого участка?

Оказывается, это можно сделать множеством различных способов. Например, можно разложить каждый участок в ряд Фурье и составить новую числовую таблицу, новую матрицу из всех коэффициентов этого ряда. Двухмерный участок изображения пришлось бы раскладывать в двухмерный ряд Фурье.

В новом представлении числа, определяющие участок изображения, — уже не значения яркости его элемента, а значения коэффициентов ряда Фурье. Количество этих новых элементов матрицы не изменилось. Из теории дискретизации изображений известно, что поскольку спектр пространственных частот ограничен, понадобится столько же коэффициентов, сколько было отсчетов в исходном участке изображения.

Но что же дает такое представление участка изо-

бражения? Преимущества этого нового представления возникают из того основного факта, что теперь каждый элемент матрицы вносит свой вклад в описание всех элементов исходного участка изображения, а не только одного элемента, как это было при предыдущих поэлементных описаниях изображения. Можно, например, сократить новую матрицу вдвое, оставив только те члены ее, которые находятся левее вертикальной черты, делящей матрицу пополам. Это будет означать лишь то, что мы вдвое сузили полосу частот. И здесь сказывается статистическая избыточность изображений. Хотя качество изображения несколько ухудшится, как будто произошла некоторая дефокусировка, главные связи между элементами, выражающиеся низкочастотной частью спектра, сохранятся, и если нас не интересуют исключительно только мельчайшие детали изображения, ухудшение будет не столь уж катастрофическим.

Но вот если бы подвергнуть такому же «усечению» исходную матрицу, искажения были бы недопустимыми. В самом деле, передавалась бы только левая половина каждого участка, а все правые половины были бы опущены. На изображении возникли бы зияющие пустоты. Итак, одно и то же сокращение элементов матрицы дает совершенно различные результаты в зависимости от способа представления изображения. Еще раз подчеркнем, что это — следствие статистической избыточности изображений, особенностей их спектра пространственных частот. Можно представить себе изображения, где спектр пространственных частот однороден, что-либо вроде изображения груды песчинок различных размеров. Теперь уже усечение может привести к потере целой фракции наиболее мелких песчинок — и, возможно, геолог или почвовед предпочтут, чтобы передавали половины фрагментов изображений, но зато без таких потерь.

Впрочем, и в других случаях, хотя потери от усечения преобразованной матрицы не так велики, как это было бы при усечении исходной группы элементов, возникают нежелательные эффекты — ухудшение передачи мелких деталей, границ и т. п. Однако можно добиться сокращения цифрового потока с помощью рассматриваемого преобразования, не исключая полностью те или иные члены преобразованной матрицы, а лишь уменьшая число уровней квантования тех членов ее,

которые соответствуют наиболее высоким частотам. По существу, это обозначает, что спектральные компоненты сигнала квантуются раздельно и по-разному: высокие частоты — на меньшее число уровней, чем низкие. Этот прием может быть обоснован статистикой изображений (энергия, приходящаяся на верхние частоты реальных телевизионных изображений, существенно меньше, чем на нижние) и соответствующими свойствами зрительного восприятия (чем мельче детали или резче переходы, тем меньше необходимо уровней квантования).

Другой тип преобразования, получивший большое распространение в исследованиях методов сокращенного кодирования изображений, — преобразование Адамара. Как и при преобразовании Фурье, исходный фрагмент раскладывают по ортогональным базисным функциям. Но сами эти функции имеют гораздо более простой и удобный для вычислительных операций вид. Они состоят из комбинаций $+1$ и -1 и правильным чередованием отрицательных и положительных «полуволн» напоминают усиленные и ограниченные синусоиды и косинусоиды. Складывая с теми или иными весовыми коэффициентами эти функции, получают изображение фрагмента.

Новая матрица состоит из этих коэффициентов. Количество их, вообще говоря, должно быть таким же, как и количество исходных элементов. Но, как и в случае преобразования Фурье, при этом родственном ему преобразовании число уровней квантования коэффициентов при «высокочастотных» базисных функциях, ответственных за передачу мелких деталей и резких переходов, может быть сокращено. За этот счет сокращается и общее количество двоичных цифр, приходящихся на кодируемый фрагмент. Но полное отбрасывание даже некоторых высокочастотных функций, входящих в набор, который определяется числом отсчетов на исходном фрагменте изображения, нежелательно. В частности, это отразится на передаче титров и других мелких надписей в телевизионном кадре.

Вообще говоря, задача сокращенного представления фрагментов реальных изображений, характеризующихся сильными статистическими связями между элементами, оказалась принципиально сходной с гораздо более общей задачей анализа совокупности данных, учитывающей корреляцию между ними. Такие задачи по-

стоянно встречаются в экономике, биологии, почвоведении и т. п. Уже давно разработаны методы преобразования исходных таблиц данных к более экономному виду путем выделения так называемых главных компонент. Применение таких методов к преобразованию фрагментов изображений позволяет представить их еще более экономно, чем при преобразованиях Фурье или Адамара. К сожалению, однако, при этом резко возрастают вычислительные трудности.

Вместе с тем, как уже было отмечено, наиболее сильны статистические связи между ближайшими элементами. Увеличение размеров фрагментов более чем на 8×8 или даже 4×4 элементов изображения уже не дает столь заметного выигрыша, который оправдывал бы рост вычислительных и технических трудностей кодирования с преобразованием.

Различные варианты кодирования с преобразованием, в том числе и те, которые удается осуществить в реальном масштабе времени, в темпе телевизионной развертки, дают больший выигрыш, чем методы поэлементного кодирования с предсказанием. На один элемент черно-белого изображения оказывается достаточно затратить около 2 бит.

Разложение по ортогональным базисным функциям оказалось не единственным, а возможно, и не оптимальным способом представления одновременно группы элементов изображения. Другой подход к групповому кодированию в телевидении можно было бы назвать бионическим, поскольку в этом случае делается попытка моделировать некоторые этапы зрительного процесса.

Кое-что об этом процессе уже известно из данных психологии и физиологии зрения. Казалось бы, сама зрительная система использует для представления изображений нечто вроде группового кодирования. Сигнал, идущий из сетчатки по каждому из сотен тысяч волокон зрительного нерва в вышележащие отделы мозга, сформирован из сигналов группы фоторецепторов. Каждая такая взаимодействующая группа фоторецепторов составляет так называемое рецептивное поле. Все большее поле зрения как бы разбито на огромное количество участков с помощью таких рецептивных полей.

Размеры рецептивных полей различны: чем дальше от центра, тем они больше. Это соответствует сниже-

нию разрешающей способности глаза от середины к краям поля зрения. Поперечные размеры рецептивных полей дневного зрения в центральной части сетчатки имеют порядок нескольких угловых минут. На каждый фоторецептор дневного зрения, т. е. колбочку, приходится около одной минуты. Угловая разрешающая способность нормального зрения того же порядка. И угловой размер элемента телевизионного разложения при нормальном расстоянии от наблюдателя до экрана составляет одну минуту. Можно считать, что группа элементов телевизионного разложения, перекрываемая одним рецептивным полем сетчатки, близка по размерам к не раз упоминавшемуся выше удобному размеру группы 4×4 элемента.

Это вряд ли простое совпадение. По-видимому, рецептивные поля зрения сформировались с учетом статистических связей в реальных изображениях. Указанные порядки величин — хороший компромисс между быстро увеличивающейся сложностью одновременной обработки с ростом группы и медленно возрастающим при этом выигрышем, определяющимся учетом статистических связей между все большим числом элементов в группе.

Изучение того, как изменяется пространственно-частотная характеристика зрения в ходе рассматривания изображения, позволяет предположить существование своего рода последовательных приближений. Сперва зрительный аппарат работает как фильтр нижних пространственных частот. Каждое рецептивное поле усредняет сигналы по своей группе рецепторов. Лишь затем возникают подробности, проявляются мелкие детали, выделяется разность между первым приближением — усредненным по полю значением — и действительным распределением сигналов между рецепторами данного поля. Эта разность носит характер контурного изображения. В высших отделах зрительной системы животных обнаружено множество нейронов, отвечающих сигналами не на отдельные элементы, а на контурные отрезки. Между элементами данного отрезка контура различия в таких нейронах не регистрируются — рассматривается как бы усредненный отрезок.

Была исследована телевизионная модель такого группового кодирования изображений. Исходное изображение разбивают на группы элементов 4×4 и ус-

редняют яркость по каждой из групп. Разность между исходным изображением и этим приближением квантуют, усредняя отдельно положительные и отрицательные значения ее внутри каждой из групп. Кодовое слово, описывающее все 16 элементов группы, состоит из частей, определяющих среднюю яркость по группе, распределение знаков разности между исходным и усредненным изображением и усредненное по группе значение модуля разности. Чтобы передать изображение, понадобится 28 бит. Разделив это число на 16, получим 1,75 бит/элемент.

Цветность можно характеризовать в целом для всей группы двумя не более чем восьмиразрядными числами. На представление ее потребуется 1 бит/элемент или даже немного меньше.

Для создания компактных групп 4×4 элемента при чересстрочном разложении нужна кадровая память. Наличие памяти на кадр создает вместе с тем дополнительные возможности дальнейшего сокращения цифрового потока за счет более экономной дискретизации во времени.

Сокращение цифрового потока посредством группового кодирования изображений делает их менее помехоустойчивым, чем при обычной ИКМ. Каждая ошибка в двоичном знаке поражает уже не один элемент изображения, а, вообще говоря, всю группу. В зависимости от того, в какой части кодового слова произошла ошибка, она проявится по-разному. При поражении одного из старших разрядов той части слова, которая представляет среднюю яркость группы, возникнет заметный «посторонний» квадратик. Если поражена часть слова, описывающая цветность, появится такой же формы цветное пятнышко. При кодировании с разложением по ортогональным базисным функциям ошибка может проявиться в появлении на телевизионном изображении участка с распределением яркости, напоминающим одну из базисных функций.

В среднем ошибки при групповом кодировании даже при большем сжатии, чем это достижимо в ДИКМ, поражают изображение не так сильно. Однако может потребоваться введение дополнительных двоичных знаков, исправляющих, например, одиночную ошибку внутри кодового слова.

Цифровая обработка изображений

До сих пор речь шла о применении цифровых методов для обеспечения преобразования изображения без потерь, для сохранения качества его в условиях множественных перезаписей, ретрансляции и т. п. Однако цифровые методы помогут не только сохранить неизменным, но и улучшить качество изображения. Имеются в виду разнообразие виды коррекции изображения, реализуемые с помощью цифровых методов точнее и надежнее, чем это было в аналоговом телевидении.

Рассмотрим, например, апертурную коррекцию. Она предназначена для компенсации того ослабления верхних пространственных частот спектра изображения, которое возникает из-за ограничения разрешающей способности оптических и электронно-оптических систем при преобразовании свет—сигнал, в частности из-за конечных размеров апертуры считывающего электронного пучка в передающей трубке. Простой способ коррекции состоит в том, чтобы вычесть сумму сигналов окрестных элементов, взятых с определенным весом, из сигнала данного элемента и полученный сигнал сложить с исходным. Для этого нужно прежде всего иметь одновременно с сигналом корректируемого элемента и сигналы окрестных элементов, а значит, ввести соответствующие задержки, в том числе и строчные. Преимущества цифрового метода для реализации этого очевидны. Отпадает необходимость особо заботиться о поддержании стабильной работы строчных задержек сигнала — положение отсчетов на разных строках точно определено. Использование кадровой памяти позволяет производить коррекцию действительно по соседним строкам, несмотря на чересстрочное разложение. Упрощается реализация устройства, производящего коррекцию не только по ближайшим окрестным, но и по несколько далее отстоящим элементам.

Несколько идеализированно полагая апертурные искажения линейными, удовлетворяющими принципу суперпозиции (т. е. считая их суммой тех элементарных искажений, которым подвергается каждая точка исходного изображения), легко вычислить, каким будет искаженное изображение. Для этого надо знать, как искажается точка, рассеиваясь, расплываясь в пятно с

распределенной плотностью, из-за оптических и электронно-оптических aberrаций, растекания зарядов и других процессов на мишени передающей трубки, рассеяния света на экране, наконец, из-за переходных процессов в электрических цепях. Можно решить и обратную задачу: зная закон рассеивания точки, вычислить исходное изображение по заданному искаженному. Обычная апертурная коррекция — первое приближение к решению задач такого рода. Цифровые методы дают возможность решать их точнее. В частности, удастся дополнительно учесть изменение закона рассеяния точки по полю изображения. Ведь в отличие от искажений в электрических цепях, искажения, связанные с aberrациями, зависят, вообще говоря, от положения передаваемой точки относительно оси оптической или электронно-оптической системы.

В некоторых случаях удастся предупредить искажения, скорректировать до того, как они проявятся. Так обстоит дело с апертурными искажениями при отклонении электронного пучка. Главное из этих искажений — так называемый астигматизм первого порядка — возникает из-за того, что вследствие асимметрии сил, действующих на пучок, его сечение как бы растягивается в одном направлении и сминается в другом. Корректирующая система — стигматор типа четырехполюсной линзы — должна воздействовать на пучок противоположным образом. Управляет выполнением этой обратной операции ЦАП, соединенный с цифровым устройством, задающим закон коррекции. При этом удастся исправить астигматизм, а вместе с тем и практически выравнять разрешающую способность по всему полю изображения.

Когда количественно определено искажающее влияние, обычно может быть рассчитано обратное преобразование, восстанавливающее с той или иной степенью точности исходное изображение. Обычно, но, к сожалению, не всегда. Эта задача относится к так называемым некорректно поставленным задачам. Как правило, полученные решения неустойчивы в том смысле, что даже небольшие ошибки в задании искажающего преобразования или искаженного изображения ведут к большим ошибкам при восстановлении, к появлению ложных узоров на изображении и т. п. А такие небольшие ошибки неизбежны. Даже если пренебречь флуктуационными

помехами в устройствах преобразования сигнала, остаются неточности квантования.

По этим причинам коррекция изображений методами обратных преобразований лучше удается в прикладных задачах, когда нет ограничений, вызванных быстрым темпом смены изображений, который характерен для вещательного телевидения.

Как известно, нечто вроде апертурной коррекции осуществляет и зрительная система. Механизм этой коррекции служит латеральное (боковое) торможение. Из сигнала данного рецептора сетчатки как бы вычитаются сигналы окрестных рецепторов. Это делается не только для коррекции, но и в интересах адаптации к фону. По-видимому, веса, с которыми учитываются сигналы окрестных рецепторов, могут регулироваться в зависимости от ситуации. Более того, эти веса могут изменить знак. Когда отношение сигнал/помеха мало, вместо латерального торможения (которое теперь лишь подчеркивало бы шумы) возникает пространственная суммация. Благодаря этому сглаживаются флуктуации фона, выявляются основные очертания за счет потери наиболее мелких деталей.

В цифровом телевидении могут быть осуществлены перестраиваемые фильтры такого рода. Перестройка может понадобиться и при неизменном отношении сигнал/помеха. Например, бывает целесообразно не только восстановить, но и усилить мелкие детали при передаче общего плана. Однако при переходе на крупный план обычно это делать не к чему, если только оператор не хочет специально показать морщины и мелкие изъяны лица. Цифровые фильтры дадут телевизионному режиссеру и оператору новое художественное средство, позволят создать гибко управляемую электронную ретушь.

В цифровой форме более точна, нежели в аналоговой, коррекция градиционных искажений. Этот вид коррекции имеет большое значение не только для вещательного, но и для прикладного телевидения. Располагая по-разному уровни квантования при передаче или воспроизведении изображений, можно растянуть одни и сжать другие участки шкалы яркости. Это позволяет лучше использовать динамический диапазон системы передачи и воспроизведения изображений для выделения более информативных деталей и, напротив, не тра-

тить много энергии на передачу «пустых», не содержащих полезной информации участков шкалы.

Стремясь разнообразить передачи, в телевизионном вещании прибегают к разного рода эффектам, суть которых сводится к врезанию одного фрагмента изображения в другое или к вытеснению одного изображения другим. Показывают диктора местной студии на фоне пейзажа далекой страны. На изображение накладывают титры. Один сюжет наплывом сменяется другим. Все это и еще многое другое реализуется и в аналоговом телевидении. Однако переход к цифровой форме повысит качество воспроизведения таких эффектов. Можно точно указать, какие участки одного кадра надо будет заменить другими. Можно точно дозировать скорость замены одного сюжета другим при наплывах.

Цифровая обработка изображений — эффективное средство борьбы с помехами. К сожалению, не всегда удается обеспечить нужное отношение сигнал/помеха уже на входе телевизионной системы. Так, телевизионные репортажи или передачи из театров приходится вести и в таких условиях, когда не хватает освещенности. Изображения при этом в той или иной мере искажаются флуктуационными помехами — «снегом» на экране, знакомым каждому телезрителю. Удастся в значительной степени подавить эти помехи, воспользовавшись корреляцией между кадрами. Неподвижный фон, где особенно заметны помехи, остается неизменным иной раз в течение не только десятков, но и сотен кадров. Если подавать видеосигнал не непосредственно в канал передачи, а в цифровую кадровую память, можно осуществить фильтрацию, ослабляющую флуктуационные помехи по сравнению с повторяющимся от кадра к кадру полезным сигналом.

Цифровая фильтрация такого рода может производиться не только во времени, но и по площади кадра. Если отношение сигнал/помеха мало, принципиальные ограничения на возможности передачи информации становятся особенно заметными. Хороший пример того, как поступать в подобных ситуациях, показывает зрительная система. В сумерках уже на уровне сетчатки глаза осуществляется низкочастотная фильтрация. Рецепторы сумеречного зрения — палочки — объединяются в относительно большие по угловым размерам рецептивные поля. В отличие от колбочковых «дневных»

полей здесь рецептивные поля насчитывают тысячи рецепторов. Внутри каждого поля производится суммация сигналов от отдельных палочек. При этом перестают различаться мелкие детали, но зато надежно передаются основные очертания более или менее крупных объектов.

Подобный механизм доступен моделированию и в технике цифрового телевидения. Сочетание временной и пространственной фильтрации, создание цифровых фильтров, наилучшим образом согласованных с пространственно-временными свойствами исследуемых объектов, — например, дефектов, обнаруживаемых рентгено-телевизионной установкой, — позволит достичь теоретически возможных пределов контрастной чувствительности.

Цифровые методы нужны и для получения предельной абсолютной светочувствительности. В качестве примера назовем одну из задач экспериментальной астрофизики — регистрацию сверхслабых излучений. Здесь уже не приходится говорить об освещенности на фоточувствительной поверхности преобразователя свет—сигнал в обычном смысле. Надо считать отдельные кванты. Это и делает цифровая телевизионная система, соединенная с вычислительной машиной и работающая в режиме регистрации так называемых одноэлектронных событий.

«От света до решения»

Современное телевидение — не только передача изображений «от света до света», т. е. от преобразования свет—сигнал до воспроизведения изображений на обратном преобразователе, например, кинескопе. В прикладном телевидении все чаще интерес представляет не само изображение, а информация, там содержащаяся. Не все, что попало на снимок с пузырьковой камеры, сканируемый телевизионной системой с бегущим лучом, а лишь координаты центров пузырьков, образующих изучаемые следы ядерных частиц. Не вид мазка крови под телевизионным микроскопом, а количество лейкоцитов того или иного типа. Не все предметы, попавшие в поле зрения телевизионной системы, обслуживающей робот-манипулятор, а лишь один из них, который должен быть перемещен манипулятором,

и даже не сам этот предмет, а только положение его в пространстве относительно схвата манипулятора. На выходе телевизионной системы в этих и подобных им случаях должно быть получено не просто изображение, но решение в виде координат, номера класса, к которому отнесен объект, параметров фигур и пр.

По существу, телевизионная система начинает играть роль зрения автомата. Еще недавно полагали, что телевизионная система в таких случаях должна лишь передавать изображение в ЭВМ. Она превращала изображение в цифровой поток, а все остальное поручалось вычислительной машине. Вводное устройство наминало, скорее, фототелеграфный аппарат, снабженный АЦП. Однако такое устройство не обладает достаточной гибкостью и быстродействием. Его целесообразно применять для моделирования операций над изображениями или для анализа каких-либо уникальных изображений. Между тем автоматический анализ изображений во многих областях должен быть массовым. Назовем, например, задачи анализа рентгеновских изображений, мазков крови, колоний бактерий, изображений глазного дна в медицине; анализ снимков со следами ядерных частиц, рентгенограмм, спектров, участков звездного неба в физике и астрономии; дефектоскопию, контроль формы и размеров, экспресс-анализ шлифов, текстур и т. п. в технологии производства и материаловедении и т. д.

Теперь снова уместно обратиться к живым прототипам. Зрительная система принципиально отличается от примитивной технической системы «вводное устройство—ЭВМ» уже основами своей структуры. Здесь изображение не просто переносится из одного места в другое, но фильтруется, «сжимается», сокращенно описывается совокупностью признаков зрительных образов. При всех этих процессах широко используются обратные связи от высших отделов мозга к периферии.

Развитие цифрового телевидения создает основу для моделирования такой функциональной структуры. Между преобразователем свет—сигнал и ЭВМ, принимающей окончательные решения, помещают телевизионно-логический комплекс, производящий предварительный анализ и обработку изображений. Здесь отбирается и направляется выше только та информация, которую не удастся окончательно исследовать вне ЭВМ. От

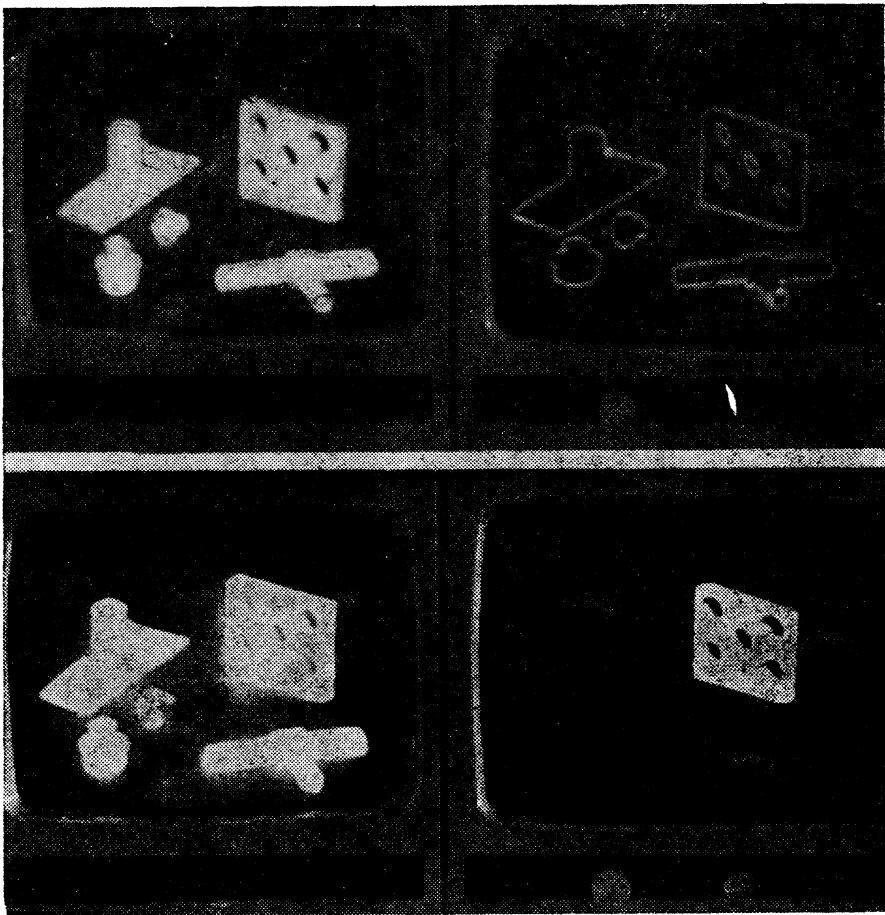


Рис. 9. Селекция объектов на поле телевизионного изображения

остальной, большей частью рутинной работы такой промежуточный комплекс ЭВМ освобождает.

Вот лишь некоторые из операций и функций таких промежуточных комплексов. Они могут выделить контуры объектов, отличить элементы контура, даже распавшегося из-за помех, от случайных одиночных выбросов и подавить последние; обнаружить и выделить участки, достаточно однородные по яркости, цвету, более сложным текстурным признакам. Строка развертки нередко пересекает не один, а несколько объектов. Но с помощью цифровых методов могут быть подавлены сигналы, не относящиеся к выбранному объекту, так что для дальнейшего анализа будет выделен только сигнал

от этого объекта. Пример такого рода показан на рис. 9. Здесь приведены фотографии, снятые с экрана телевизора. В поле зрения передающей трубки находится ряд предметов. Обычная система ввода направила бы цифровой поток, описывающий поле зрения, в ЭВМ и предоставила бы машине разобраться в остальном. Здесь же часть работы взяла на себя цифровая телевизионная система. Она, например, выделила контуры объектов. Затем она выполнила и более сложные операции: выделила один из объектов, подавив сигналы остальных. Но даже и теперь может не быть необходимости в отправке информации в ЭВМ. В зависимости от решаемой задачи информация может быть представлена в той или иной еще более сжатой форме. Например, вместо передачи поочередно изображений выделенных объектов телевизионно-логический комплекс может определить координаты нужных точек и те или иные геометрические параметры фигур (площадь, периметр, проекции на координатные оси и т. п.) и лишь только эти числа отправить для дальнейшего анализа и принятия решения в ЭВМ. Ясно, что при такой предварительной обработке скорость анализа уже не столь существенно ограничивается пропускной способностью самой ЭВМ: туда поступает информация в сжатой форме. Это уже не поэлементное описание изображения, не первичная таблица чисел, представляющих его, а набор признаков зрительных образов в виде некоей совокупности чисел, которая только и нужна для принятия решения, — например, о принадлежности выделенного объекта к определенному классу или о положении участка, где следует более тщательно произвести измерения, и т. п.

В цифровых системах осуществляется и обратная связь от анализатора к периферийным телевизионным устройствам. Пусть, например, на большом поле изображения указан участок, содержащий нужную информацию (скажем, участок, где проходит исследуемый трек ядерной частицы). В дальнейшем вместо сканирования всего поля считывается малыми цифровыми растрами, перестраиваемыми по команде ЭВМ (например, при прослеживании выбранного трека), только нужная его часть. При этом существенно экономится информационная емкость системы анализа. Кстати, и этому механизму можно найти прототип в природе. Это — глаз

ные движения, благодаря которым мозг «наводит» зрительную ось, а вместе с тем и тот относительно небольшой участок сетчатки, который характеризуется высоким разрешением, на то, что надо увидеть с наибольшими подробностями, пренебрегая той частью поля зрения, где нет полезной в данный момент информации.

Но современная прикладная телевизионная система не только принимает решения (или передает в ЭВМ необходимые данные для принятия решения). Она вместе с тем остается телевизионной системой и в обычном смысле этого слова: изображения передаются и воспроизводятся и здесь. Наивному противопоставлению: «человек или автомат» пришла на смену реальная концепция «человек и автомат». За исключением разве что самых примитивных задач, автоматический анализ изображений производится при активном участии человека-оператора. Цифровой телевизионно-логический комплекс, ЭВМ и пульт оператора расположены как бы в вершинах треугольника, соединенных прямыми и обратными связями.

Главное направление развития телевизионной техники

Итак, переход от аналоговой к цифровой форме преобразования, записи, передачи, анализа изображений открывает новые пути повышения качества изображений, расширения технических возможностей вещательного и прикладного телевидения. В наше время трудно делать прогнозы в технике. И все же есть достаточно оснований, чтобы уверенно повторить то, о чем было сказано в первой фразе этой книжки: главным направлением развития телевизионной техники на ближайшие два-три пятилетия будет цифровое телевидение.

Этот переход более просто осуществить в прикладном телевидении. Здесь действуют системы замкнутого типа, здесь нет ограничений, устанавливаемых телевизионным стандартом. К тому же зачастую цифровые методы для решения той или иной задачи прикладного телевидения являются единственно возможными.

Иначе обстоит дело с вещательным телевидением. Только во второй половине семидесятых годов началось

интенсивное внедрение телевизионной аппаратуры третьего поколения.

Но это третье поколение — аналоговое. Параметры телевизионной системы, не говоря уж о самом принципе ее работы, жестко определены. Даже решив сложные технические задачи цифрового телевидения, будет нелегко решить организационную задачу — переход к принципиально новой аппаратуре четвертого поколения.

Наметились два направления такого перехода. С одной стороны, понемногу происходит внедрение цифровых устройств частного применения в современную действующую аналоговую систему. Это уже упоминавшиеся выше преобразователи стандартов, на вход которых подаются и с выхода которых получают аналоговые сигналы; синхронизаторы несинхронных источников, тоже использующие промежуточные цифровые преобразования; цифровые корректоры временных искажений при видеозаписи в аналоговом магнитофоне; фильтры-шумоподавители на основе кадровой цифровой памяти. Не разрушая аналоговую, в целом, систему, эти устройства заметно улучшают качество телевизионных изображений.

С другой стороны, начата системная разработка крупных цифровых комплексов. Разрабатываются цифровые каналы связи для передачи программ телевизионного вещания — радиорелейные, кабельные, спутниковые. Создаются структуры аппаратно-студийных комплексов — прообразы телевизионных систем четвертого поколения, построенных на цифровой основе.

Собственно, цифровые каналы связи не так уж сильно зависят от той формы, которую примет телевизионное сообщение. В идеале — это стандартизованные линии ЕАСС. Все то, что изменится при переходе к цифровому телевидению, отразится прежде всего на том, как будет закодирован сигнал на выходе самого телецентра.

Особенно большие перемены произойдут в аппаратных телецентрах. Сигналы изображения будут циркулировать по всем звеньям в цифровой форме. Правда, сами преобразователи свет—сигнал, возможно, еще длительное время останутся аналоговыми. Даже в приборах с зарядовой связью (ПЗС) изображение лишь дискретизируется, но сигналы еще сохраняются аналоговыми.

ми. Небезынтересно отметить, что и в сетчатке глаза переход к кодам происходит не сразу. Два первых слоя сетчатки выдают информацию, по-видимому, еще в аналоговой форме и только на выходе сетчатки, в ее третьем слое сигналы приобретают форму, напоминающую унитарный код. Подобным образом, используя преимущества непрерывного, аналогового накопления, передающие трубки и ПЗС будут вначале преобразовывать исходные оптические изображения в аналоговые распределения, например распределение зарядов, и лишь при считывании сообщению будет придаваться цифровая форма.

Большое значение будет иметь переход к цифровой видеозаписи. Уже в современном вещании подавляющее большинство программ идет с видеомэгнитофонов. Цифровая видеозапись (которая, кстати, не обязательно должна быть магнитной — имеются и другие возможности, связанные с простой формой двоичного кода) значительно сократит потери качества, расширит режиссерские возможности.

Эти преимущества будут реализовываться и в других звеньях цепей преобразования изображений. Цифровые коммутаторы, микшеры, новые устройства для получения различных эффектов, разнообразящих передачу, сохраняют исходное качество изображения, а различные цифровые фильтры будут способствовать улучшению его. Вместе с тем станет более надежной аппаратура. Упростится ее обслуживание. Информация о состоянии системы будет подаваться из управляющей ЭВМ, а туда в цифровой форме будут поступать сигналы со всех контролируемых точек. Управляющая ЭВМ сможет сама вырабатывать испытательные сигналы, анализировать реакцию системы на них и не только сообщать о тех или иных отклонениях от нормального режима, но и принимать решения.

Можно предположить, что изменится даже принцип разложения изображения на телецентре. Сейчас, как известно, используют чересстрочную развертку. Это дает возможность, не повышая частоту смены кадров, избежать мельканий. Но чересстрочная развертка вряд ли сохранится на цифровом телецентре. Только на видеоконтрольных устройствах останется этот способ разложения и, разумеется, при нынешнем парке приемников, на самом выходе телецентра. Внутри же телецентра бо-

лее рационально разворачивать изображение последовательно, строка за строкой, сохранив стандартное число кадров в единицу времени и стандартное число строк в кадре, но не подразделяя кадры на поля нечетных и четных строк. Это повысит качество изображений и значительно упростит аппаратуру обработки видеосигнала. Станет однороднее сигнал по площади кадра. Исчезнут нежелательные эффекты, связанные с тем, что цветовые составляющие передаются с существенным разнесением во времени, что приводит к цветовым окантовкам при движениях по вертикали. Станет независимой от направления апертурная коррекция: теперь она будет производиться одинаково и по вертикали и по горизонтали, тогда как сейчас при задержке на строку в действительности корректируют данный элемент не по соседней строке кадра, а по соседней строке поля, отстоящей от него на вдвое большее расстояние. Вообще улучшатся возможности пространственной фильтрации. Станет проще система группового кодирования. Теперь уже не будет необходима память на кадр для одновременной обработки большой группы соседних элементов в пространственном фильтре или для одновременного их кодирования — будет достаточно лишь нескольких цифровых линий строчной задержки.

Цифровые потоки, полученные при построчной развертке, будут записываться в кадровой памяти. И уже оттуда их надо будет считывать в последовательности, принятой при чересстрочном разложении, по полям нечетных и четных строк. В этой уже обычной последовательности цифровые сигналы будут поступать на декодирующие устройства мониторов телецентра и на выход для дальнейшей передачи на домашние приемники.

Изображения, воспроизводимые на домашних приемниках, перестанут практически зависеть от того, какой путь прошел видеосигнал от своего зарождения до входа приемника. Если теперь различия в качестве изображения бывают еще очень значительными — чем больше регенераций в пути, тем хуже изображение, — то при переходе к цифровому телевидению эти различия исчезнут.

Длительное время, пока будут происходить сложные процессы «цифровой реформы» в телевизионной технике, она будет относиться лишь к профессиональным си-

«стемам телевизионного вещания — аппаратуре телецентров и линиям дальней связи. Однако чем дальше, тем больше эти процессы будут затрагивать и телевизионные приемники. С появлением цифровых каналов для разведения телевизионных сигналов абонентам, например, по кабелю понадобится снабдить телевизионные приемники приставкой в виде ЦАП, который даст возможность воспроизводить изображение на экране обычного приемника и в этом случае. Появятся и цифровые устройства — модули для обработки сигнала — внутри самого приемника. Такая практика встраивания цифровых устройств в аналоговый прибор для обработки сигналов уже показала свои преимущества на примере высококачественной звуковоспроизводящей аппаратуры.

Трудно переоценить значение, которое будет иметь использование запоминающих устройств в сочетании с домашними приемниками. Пока объем памяти небольшой, это позволит принимать дополнительную текстовую информацию. Она может поступать за время обратного хода развертки в кодовом цифровом виде, а затем воспроизводиться из памяти на экране в виде страниц текста. Благодаря памяти можно будет значительно разнообразить набор так называемых телеигр, хотя современному малоподвижному человеку, наверное, полезнее участвовать в спортивных состязаниях по-настоящему, а не на домашнем телевизионном имитаторе.

По мере развития электронной технологии следует ожидать, что станет доступной и домашняя цифровая память больших объемов. Это не только позволит задержать понравившийся кадр. Сделается — при условии развития кабельного телевидения — реальностью и обратная связь: от зрителя к источникам информации. Возникнет новый тип справочной службы. Появится возможность обращения зрителей к цифровым телевизионным архивам, существенно дополняющим современные библиотеки.

Цифровая память создаст предпосылки и для решения давно поставленной задачи построения «плоских» телевизионных приемников. До сих пор не удается заменить тот большой ящик, который занимает так много места в комнате, чем-нибудь вроде настенного экрана. Сказывается требование к быстрдействию электролю-

минесцентных элементов, которые надо «поджигать» со скоростью следования отсчетов телевизионного изображения. А запоминание сигналов в цифровой памяти даст принципиальную возможность обменять быстродействие на число одновременно воспроизводимых элементов.

И уж поистине необозримы перспективы, открывающиеся для обработки информации, с внедрением цифровых методов в прикладное телевидение. Недаром предполагают, что телевизионное «зрение» роботов и других автоматов приведет к новой фазе научно-технической революции.

В общем, цифровое телевидение заслуживает того, чтобы интенсивно развивать его. В этом, применительно к телевизионной технике, находит отражение последовательное решение большой задачи — повышение эффективности и качества.

Литература

Глезер В. Д., Цуккерман И. И. Информация и зрение. М.—Л., Изд-во АН СССР, 1961.

Епанечников К. В., Цуккерман И. И. Цифровое телевидение: некоторые проблемы и перспективы. — «Радио и телевидение», ОИРТ, 1977, № 1, с. 22—29.

Иконика. Сборник. М., «Наука», 1975.

Лебедев Д. С., Цуккерман И. И. Телевидение и теория информации. М.—Л., «Энергия», 1965.

Обработка изображений и цифровая фильтрация. Под ред. Т. Хуанга. М., «Мир», 1979.

Обработка изображений с помощью цифровых вычислительных машин. Под ред. Г. Эндрюса, Л. Инло. М., «Мир», 1978.

Овчинников Е. К. и др. Цифровое кодирование телевизионных изображений и перспективы использования его на телецентрах. — «Техника средств связи», сер. «Техника телевидения», 1976, вып. 4, с. 20—31.

Птачек М. Цифровые системы передачи телевидения. — «Радио и телевидение», ОИРТ, 1977, № 2, с. 27—39.

Теория информации и ее приложения. Под ред. А. А. Харкевича. М., Физматгиз, 1959.

СОДЕРЖАНИЕ

Цифровое — значит не аналоговое	3
Для чего понадобилось цифровое телевидение	7
Про АЦП и ЦАП без схем	14
ИКМ в телевидении	19
Структура отсчетов	24
Уровни квантования	34
Кодирование с предсказанием	36
Кодирование групп элементов	44
Цифровая обработка изображений	50
«От света до решения»	54
Главное направление развития телевизионной техники	58
Литература	63

Илья Иоаннович Цуккерман

ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ (цифровое телевидение)

Главный отраслевой редактор *В. П. Демьянов*

Редактор *Б. М. Васильев*

Мл. редактор *Н. И. Козлова*

Обложка художника *А. Е. Григорьева*

Худож. редактор *Т. С. Егорова*

Техн. редактор *С. А. Птицына*

Корректор *В. В. Каночкина*

ИБ № 2863

Т 01226. Индекс заказа 804602. Сдано в набор 27.11.79. Подписано к печати 14.01.80. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,0. Печ. л. 2,0. Усл. печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,42. Тираж 38 080 экз. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Заказ 2245. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 11 коп.

