

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов.—М.: Радио и связь, 1983.
2. Ryfe D. C., Boorstyn R. R. Single-tone parameter estimation from discrete-time observation // IEEE Trans. Inform. Theory.—1974.—IT-20, N 5.—P. 591.
3. Гетманов В. Г. Об уменьшении времени решения задачи дискретной тригонометрической аппроксимации: // Автометрия.—1988.—№ 6.
4. Градштейн И. С., Рыжик И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений.—М.: Наука, 1971.
5. Введение в цифровую фильтрацию /Под ред. Р. Богнера и А. Константинодиса.—М.: Мир, 1976.

Поступило в редакцию 1 февраля 1991 г.

УДК 612.3

А. Н. Радченко

(Санкт-Петербург)

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИНВАРИАНТНОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО КАНАЛА К ПАРАМЕТРАМ РАЗВЕРТКИ

Введение. При переходе к цифровым телевизионным сигналам и стандартам ТВЧ возрастают требования широкополосности. В работе показано, что методами информационного сжатия можно отделить требования к стандартам развертки от требований к полосе и связать последние исключительно с качеством изображения и его информативностью. В результате автоматически решается проблема совместимости стандартов и сжимается занимаемая полоса частот. Видеопроцессоры для сжатия-восстановления сигналов можно реализовать оптическими и электронными средствами. Простейшим средством сжатия информации может служить растровый объектив. Наибольший интерес представляют процессорные свойства распределенной ассоциативной памяти. Обсуждается один из способов конструирования такой памяти и оценивается ее надежность для двух вариантов технологии — случайной и детерминированной.

Сжатие информации методами минимизации булевых функций. Перечислим элементы изображений (пиксели), составляющие телевизионную передачу, в виде последовательности

$$\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_{M-1}. \quad (1)$$

Преобразуем ее с минимальными информационными потерями в более короткую последовательность

$$\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_{m-1}. \quad (2)$$

Коэффициент сжатия

$$\Theta = M/m. \quad (3)$$

Для построения процессора, сжимающего с минимальными информационными потерями (1) в (2), свяжем их с булевыми функциями (БФ) U и Y в предположении, что φ_i и ψ_j двоичные:

$$U = \bigvee_{i < M} \varphi_i k_i(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (4)$$

$$Y = \bigvee_{j < m} \psi_j l_j(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (5)$$

где x будем называть ассоциированными переменными.

Двоичное ограничение не влияет на общность метода.

Пусть (4) представляет собой совершенную дизъюнктивную нормальную форму (СДНФ), т. е. k_i являются минтермами и $M = 2^n$. Функция (5) формируется из более крупных импликант $\{l_j\}$, каждая из которых моделирует рецептивное поле (РП) волокна зрительного нерва на сетчатке глаза и является дизъюнкцией v минтермов:

$$l_j = k_{j_1} \vee k_{j_2} \vee \dots \vee k_{j_n}. \quad (6)$$

Для минимизации информационных потерь функцию (5) будем формировать как сокращенную форму функции (4) или ее ближайшую импликанту, конкретного содержания телевизионного сигнала. Форму (5) будем называть аппроксимирующей, допуская, что область единичных значений (4) может быть не полностью покрыта единичными значениями (5). Форма (4) задана на точках булева пространства, а аппроксимирующая ее форма (5) — на v -областях, которые квантуют это пространство. Ошибки аппроксимации можно минимизировать, априорно подбирая параметры $\{l_j\}$, в частности величину v . Оставшиеся различия функций (4) и (5) будем оценивать условной вероятностью $p(j/i)$, полагая, что условие содержится в (4), а результат испытания — в (5). Импликантное отношение (7) определяет переходные вероятности следующим образом:

$$p(0/0) = 1, \quad p(0/1) = p, \quad (8)$$

$$p(1/0) = 0, \quad p(1/1) = 1 - p.$$

Эти вероятности оценивают точность обратного преобразования из (2) в (1). Сжатая в форме (5) информация будет восстановлена в виде (1) при переборе всех комбинаций ассоциированных переменных в той же последовательности, что и при задании (4) минтермами.

Формирование (1) можно рассматривать как результат M испытаний, причем испытания могут быть независимыми или зависимыми от уже известных φ_i . В последнем случае между значениями $\{\varphi_i\}$ имеются функциональные связи, которые проявляются в поглощениях членов k_i формы (4) импликантами $\{l_j\}$ формы (5). Следовательно, M испытаний могут быть прорежены за счет исключения повторов — обращений к тем l_j , которые уже участвовали в соответствующем, т. е. нулевом или единичном, выборе. Это означает, что оставшиеся μ испытаний независимы относительно заданных импликант и дают те же результаты, что и M испытаний. Число μ характеризует количество информации в (1) относительно фиксированного набора $\{l_j\}$. При прореживании можно оставить любой один символ из множества, попавших в v -область. Следовательно, отбор μ символов из M многоальтернативен и характеризует возможности опознавания (1), т. е. восстановления этого набора по некоторой его части. Опознаются (формируют ту же БФ) также все возможные расширения μ -последовательностей, полученные присоединением к ним ранее вычеркнутых символов (1). Независимость оставшихся μ символов позволяет считать, что матожидания числа единиц α и нулей β одинаковы, т. е.

$$\mu = \bar{\alpha} + \bar{\beta} = 2\bar{\beta}. \quad (9)$$

Допущение (9) позволяет связать информативность μ и формат M входных сигналов с форматом m и погрешностями p выходных сигналов, учитывая при этом влияние v — внутренних параметров процессора. Точность аппрокси-

мации БФ для фиксированного случайного расположения импликант рассчитана в [1]. Она оценивается формулой

$$p = [1 - q(1 - q)^\beta]^m, \quad (10)$$

где $q = v/M$ — относительный размер импликант l_i .

Анализ формулы (10) показывает, что при

$$v = v_{\text{opt}} = M/(\beta + 1) \quad (11)$$

погрешность аппроксимации p проходит через глубокий минимум, достигая значения

$$p = p_{\text{min}} = \exp\left(-\frac{m}{\beta e}\right). \quad (12)$$

Подставляя (11) в (10) и используя (9), перепишем (10) в виде

$$\ln p = -\frac{2m}{\mu} w e^{-w}, \quad (10a)$$

где μ/m — удельная информативность выходных сигналов, $w = v/v_{\text{opt}}$ — относительная оптимальность величины v . Вид этой функции представлен на рис. 1.

Задавая допустимую погрешность аппроксимации, можно определить число m в форме (5):

$$m = \frac{\mu e}{2} \ln p^{-1}. \quad (13)$$

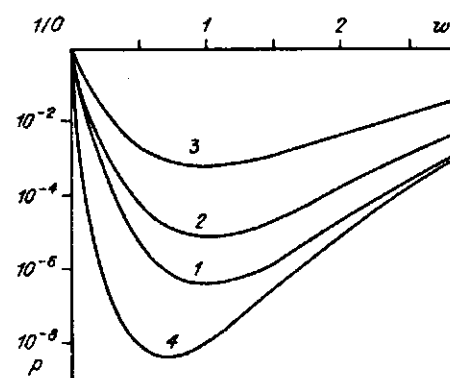
Коэффициент сжатия информации получим, подставляя (13) в (3):

$$\Theta = \frac{2M}{\mu e \ln p^{-1}}. \quad (14)$$

Из (13) следует, что формат сжатого сообщения m не зависит от формата исходного сообщения M , т. е. от развертки и числа ассоциированных переменных, но линейно зависит от информативности исходного сообщения и слабо (логарифмически) — от требований точности. Это открывает возможность сжатия обширных массивов данных с высоким качеством восстановления. Инвариантность (13) к M означает, в частности, что переход на стандарты ТВЧ не требует пропорционального увеличения полосы частот: она зависит только от μ и p . Минимизация в априорной форме (5) позволяет сжимать информацию в реальном масштабе времени.

Эффект сжатия резко выражен для сигналов с большой избыточностью, ими являются телевизионные сигналы, в особенности ТВЧ. Полагая $\Theta > 1$, из (14) и (13) можно получить границы удельных информативностей входных и выходных сигналов процессора:

$$\frac{\mu}{M} < \frac{\mu}{m} < \frac{2}{e \ln p^{-1}}. \quad (15)$$



Отсюда следует, что полное сжатие информации, $m = \mu$, нецелесообразно из-за больших информационных потерь: $p = e^{-2/e} = 0,48$. График на рис. 1 демонстрирует резкий контраст с этим результатом

Рис. 1. Влияние размеров импликант на точность аппроксимации изображений:

1 — 3 соответствуют удельной информативности 5, 6, 2 и 10 % при случайном расположении импликант; 4 — информативность 5 % при частично упорядоченном расположении импликант

при $m > \mu$. Заметим, однако, что наши формулы выведены для неупорядоченного расположения l_j , форма которых не регламентирована, требуется только выполнение (11). Упорядочивая расположение $\{l_j\}$ и подбирая их форму, можно дополнительно улучшить полученные оценки. Более плотное сжатие возможно при иерархическом построении процессора [2].

Обращаясь к формуле (11), отметим, что один квант сигнального пространства l_j содержит v пикселов. Их различие оказывается возможным благодаря многократным пересечениям l_j и формированию «мини-квантов» как областей пересечения. Аналогичный «парадокс» наблюдается на сетчатке глаза. У человека рецептивные поля сетчатки имеют угловые размеры порядка $65'$, а разрешение достигает $1,0-0,5'$, т. е. каждое РП вмещает $2500-10000$ пикселов [3]. Критерий пересекаемости РП s определяется отношением суммарной площади РП к числу разрешаемых пикселов:

$$s = \frac{mv}{M}. \quad (16)$$

Линейная связь s и v позволяет по графику на рис. 1 определить влияние s на погрешности аппроксимации, полагая $w = s/s_{opt}$. Подставляя в (16) $v = v_{opt}$ (11), получим

$$s_{opt} = 2m/\mu. \quad (17)$$

Сравнивая это условие с (15), легко убедиться, что $s_{opt} > 1$, и переписать формулу (10а) в виде

$$\ln p = -sc^{-s/s_{opt}}. \quad (10б)$$

Сжатие при малых p , т. е. когда практически нет информационных потерь, не разрушает статистических связей в исходном массиве, хотя видоизменяет (обобщает) их. Поэтому облегчается использование и статистических методов сжатия информации (кодирование по Шеннону — Фано, прогнозирующие фильтры и др.). Их можно применить для дополнительного сжатия или улучшения оценки (12). Ее также удобно переписать в виде

$$p_{min} = \exp(-s/e). \quad (12а)$$

Реализация процессорных функций. Перспективы коренных улучшений в технике связи и хранения информации, особенно в таких отраслях, как телевидение и видеозапись, существенно зависят от возможности создания эффективного процессора, работающего согласно изложенной схеме. Его можно построить на нейроплате [4] к персональной ЭВМ по аналогии с РП сетчатки, но сложность конструкции при одинаковой цене входных, выходных и промежуточных элементов оценивается величиной

$$M + m + mv, \quad (18)$$

где последний член определяется числом межсоединений. Из-за первого и последнего членов сложность такого нейропроцессора выглядит удручающей.

Для визуальной информации более привлекательна реализация формы (5) с использованием линзового раstra, когда суперпозиция РП как бы выносится в предметную плоскость и образует s -кратное пересечение множества полей зрения — аналог $\{l_j\}$. Большую глубину резкости может обеспечить применение короткофокусных линз. Широкоугольность таких линз вступит в противоречие с требованием оптимальной величины v в зоне предмета. Однако $v = v_{opt}$ можно получить диафрагмированием полей зрения. Диафрагмирование обеспечивает также резкие границы областей l_j . Подобные линзовые растры весьма технологичны и широко используются, например, в стереофотографии [5].

Короткофокусный линзовый растр с узкоугольным диафрагмированием аналогичен фасеточному глазу насекомых.

Используя (12а), можно определить, что для восприятия с точностью не хуже $p = 10^{-3}$ необходимо, чтобы каждая точка изображения попадала бы не

менее чем в $s = 19$ полей зрения. Эта оценка справедлива для неупорядоченного расположения линз. Для упорядоченного расположения больше подходит оценка, выведенная в приложении. Интересно отметить, что при фиксированных углах зрения линз — «омматидиев» — величина v зависит от квадрата расстояния до предметной плоскости. Оптимальное расстояние дается графиком на рис. 1. Оно не зависит от фокусных расстояний линз. Эта особенность давно подмечена у насекомых: они, несмотря на короткофокусность омматидиев, не обнаруживают признаков «близорукости».

Фасеточный глаз привлекателен для технического использования не только как простой инструмент для сжатия информации, но и как средство повышения разрешающей способности крупнозернистых фоточувствительных мишеней (ПЗС-структур) и других датчиков. Отметим, например, возможность мелкоструктурной визуализации структуры биомангнитных полей [6] с помощью малого числа индуктивных датчиков сравнительно большой площади. Важны также чисто оптические достоинства растровой оптики [5] и фасеточного глаза: светосильность, компактность и большая глубина резкости.

Запоминание и восстановление сжатых изображений. На рис. 2 представлена схема преобразования изображения в форме 1 в сжатую фасеточную (растровую) форму 2, которая затем восстанавливается в обычное изображение на экране монитора. Сжимающее преобразование сцены 1 выполняется линзовым растром 2, с выхода которого код изображения через канал связи поступает на регистр видеоданных 3. Обратное преобразование выполняется с использованием запоминающего устройства ЗУ 4, которое адресуется n -разрядным регистром-счетчиком 5. Одновременно с помощью двух цифроаналоговых преобразователей ЦАП 6 счетчик формирует развертывающие напряжения для монитора 7. Модулирующий вход монитора управляется логической решающей схемой 8. Узлы 6 и 7 объединены в блок 9, который может замещать сцену 1 в режиме настройки. В этом режиме ЗУ 4 переводится в режим записи, на модулятор подается открывающее напряжение, а видеоданные пересылаются из 2 в регистр входных данных 10. Настройка заключается в том, что формируемые блоком 9 одноточечные изображения преобразуются линзовым растром в m -мерные b -векторы, содержащие по s единиц. $M = 2^n$ таких векторов за один цикл развертки будут размещены в памяти 4. Сумма записанных единиц в каждом из m разрядов ЗУ равна v . Изображение поля зрения отдельной линзы из v точек можно получить на экране за цикл развертки, модулируя яркость или цветность сигналом соответствующего разряда выходного регистра ЗУ.

В рабочем режиме в качестве 1 предъявляются многоточечные изображения, и их Ψ -векторы пересылаются в регистр 3. Многоточечный и одноточечные коды, хранящиеся в 4, будут сравниваться блоком 8 синхронно с

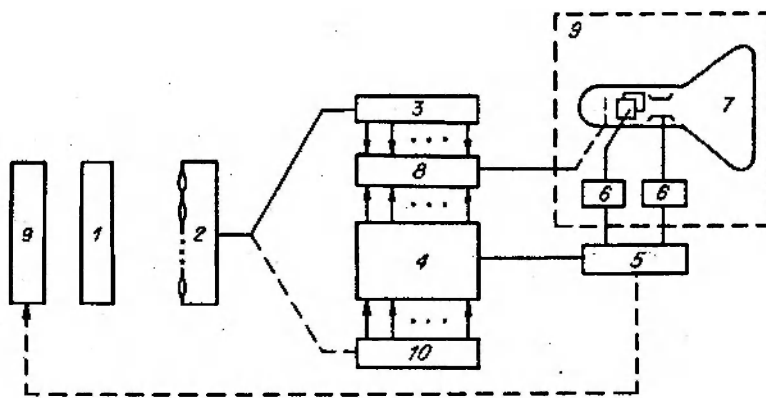


Рис. 2. Схема процессора сжатия и восстановления изображений

обращением луча в соответствующую точку экрана. Решающая функция схемы 8 реализуется в форме дизъюнкции импликант вида

$$z = \bigvee_{j < m} \bar{\Psi}_j b_j, \quad (19)$$

где b_0, b_1, \dots, b_{m-1} — векторы, представленные сочетаниями s единиц. Если хотя бы один из единичных элементов этого вектора не совпадает с единицей Ψ -вектора, то необходимо воспроизвести на экране «0» — на модулятор подается запирающее напряжение. При этом с вероятностью (12) возможны лишние гашения, что соответствует (8). Удобнее использовать инверсию функции (19), которая будет восстанавливать изображение, отпирая луч. Когда есть возможность выбрать величину s заранее, вместо ЗУ можно использовать ПЗУ или иное программное устройство.

Выбор телевизионного стандарта — величины M — не зависит от m и определяется лишь возможностями монитора, скоростью работы счетчика 5, его разрядностью, разрядностями ЦАПов, емкостью ПЗУ. Для разных стандартов могут различаться величины m , зависящие (13) только от μ и p . Поскольку μ меняются от кадра к кадру, качество изображения в течение передачи также будет переменным, но не хуже (13), а для малоинформативных кадров — значительно лучше.

Объединение счетчика 5 и ПЗУ 4 можно рассматривать как адресную систему s -распределенной памяти, в которой число ячеек памяти уменьшается с $M = 2^n$ до m , где величина m определена в (14) и любые n разрядов адресуют s ячеек памяти. В такую память можно непосредственно записывать видеосигнал 1. При этом будет получено сжатое изображение 5, такое же, как с использованием линзового растра, необходимо лишь следить за выполнением условия 8. Для этого следует предусматривать запоминающие элементы в «1», записывать только «0» и запрещать восстановление «1» при повторном обращении. Альтернативой для построения адресной системы, совмещающей функции блоков 4 и 5, может служить дешифратор Такахаси и Гото [7], порог которого снижен для получения нужной величины s . Некоторые другие устройства лучше приспособлены для этих целей [8, 9]. Они могут рассматриваться как аналоги нейронной памяти [10].

Целесообразно также использовать обычные твердотельные ЗУ [11, 12], изменив способ их адресации.

Надежностные свойства s -распределенной ассоциативной памяти. Сохраняющаяся в сжатой информации избыточность определяет устойчивость записи к повреждениям носителя информации.

Действительно, пусть повреждена часть $\delta = \Delta m/m$ элементов памяти. Подставляя вместо m величину $m - \Delta m$ в (11), получим p' — новое значение для ошибок аппроксимации:

$$p' = p^{1-\delta}, \quad (20)$$

где, очевидно, $(1 - \delta)$ — доля элементов, оставшихся неповрежденными. Следовательно, точность или надежность записанной информации не зависит от числа поврежденных элементов памяти или от характера повреждений (сосредоточенных или рассеянных), а зависит лишь от числа оставшихся элементов. Например, при начальной точности $p = 10^{-6}$ и разнообразных вариантах повреждений 25 % от общего числа элементов памяти точность воспроизведения снижается до $p' = 3,16 \cdot 10^{-5}$. Для выявления таких различий в p и p' необходимы содержательные статистические эксперименты. Без них у экспериментатора создается впечатление неуязвимости памяти.

Таким образом, сочетательно-адресный принцип размещения информации придает памяти надежностные свойства голограмм. Чтобы подчеркнуть это сходство, на рис. 3 представлен вариант системы обращения к памяти, которая функционально аналогична приведенной на рис. 2. Однако для

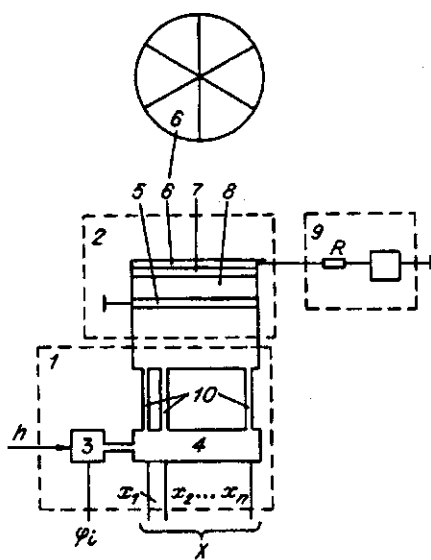


Рис. 3. Система обращения распределенной ассоциативной памяти

формирования $\{I_i\}$ используется пороговое преобразование оптических интерферограмм.

Система содержит синтезатор интерферограмм 1 и пороговый преобразователь, выполненный в виде люминесцентного конденсатора 2. Синтезатор содержит лазер 3, модулируемый по амплитуде записываемыми сигналами φ_i , и группу фазовращателей 4, управляемых ассоциированными сигналами X . Люминесцентный конденсатор 2 содержит между обкладками — прозрачными электродами 5 и 6 — люминесцентный 7 и фоторезистивный 8 слой. Конденсатор питается от источника тока 9. Одну из обкладок целесообразно разделить на изолированные электроды (обкладка 6 на верхней части схемы) и каждый из них присоединить к отдельному источнику тока. Интерферограммы создаются путем освещения световодами 10 фоторезистивного слоя 8. Для выравнивания освещенности этого слоя

относительно каждого из световодов 10 использованы светорассеивающие структуры и отражающие покрытия.

Электролюминесцентный конденсатор с фоторезистивным слоем образует преобразователь изображений. Обычные недостатки таких преобразователей — контрастирование — здесь намеренно усугублены за счет применения фоторезисторов лавинного типа, использования электролюминесцентных слоев с высокой проводимостью и питания от источника тока. В данном случае достаточно включения в цепь питания дополнительных резисторов R . Конструкция должна предусматривать возможность оптического контакта электролюминесцентного слоя 7 через прозрачный электрод 6 с запоминающей средой (не показана).

Адресная система работает следующим образом. Свет лазера 3 группой фазовращателей 4 расщепляется на n световых пучков. Фаза каждого из них может изменяться в пределах 180° под действием ассоциированных сигналов $X = x_1, x_2, \dots, x_n$. Световые пучки по световодам 10 передаются через прозрачный электрод 5 к фоторезистивному слою 8, образуя в нем $(n + 1)$ -градационные интерферограммы. При этом в зависимости от информационного содержания X синтезируется одна из 2^n возможных интерферограмм (в случае, если x — двоичные переменные). Проводимость поляризованного фоторезистивного слоя с лавинным умножением описывается гистерезисной петлей и характеризуется скачкообразным изменением проводимости, которая вызывается изменением освещенности. Это обеспечивает пороговое преобразование интерферограмм — высвечивание эксцессов. Регулируя общую освещенность слоя 8 со стороны лазера (стрелка h), можно установить оптимальный относительный порог, при котором высвечивается в среднем s точек интерференционных картин.

На величину порога влияет поляризация фоторезистивного материала. После возникновения s -точечной проводимости и высвечивания эксцессов падение напряжения на резисторе R ослабляет поляризацию материалов, заключенных между электродами. Это повышает порог и препятствует визуализации неустойчивых элементов интерферограммы (вблизи начального уровня порогового преобразования). Изменением величины R устанавливаются минимальные, но устойчивые размеры световых пятен.

Под влиянием ассоциированного «текста» ежетапно изменяются наборы переменных x_i . Соответствующие изменения интерферограмм приводят к

изменениям локализации светящихся точек люминофора, а в динамике — к сканированию s -лучевого световода, с помощью которого записываемая информация размещается на носителе. На траекториях развертки осуществляется s -распределенная запись сигналов ϕ , модулирующих по амплитуде свет лазера J . Те же траектории развертки повторяются при воспроизведении, но при этом лазер включен постоянно, что в данном случае позволяет воспроизводить записанные сигналы в инверсном виде.

Число высвечиваемых точек варьирует на множестве интерференционных картин. Эти вариации уменьшаются благодаря питанию от источника тока. Разделение одной из обкладок на изолированные электроды и питание их от отдельных источников тока позволяют довести число высвечиваемых точек до одной под каждым из электродов, когда вариации s отсутствуют или почти отсутствуют.

Между слоями 7 и 8, как и в известных преобразователях изображений, целесообразно размещение светоизолирующего слоя. Толщина слоя 8 должна быть примерно равна полуволне излучения лазера. Это обеспечивает четкую локализацию лавинного оптоэлектрического пробоя и точную (в пределах пучности интерферограммы) коммутацию источника тока к соответствующему участку излучающего $p-n$ -перехода. Если в преобразователях изображений разрешение ограничивается из-за диффузионного растекания носителей зарядов, то в данном случае имеет место обратное явление — канализация лавинного разряда и в фотопроводнике, и в $p-n$ -переходе. И первый, и второй характеризуются вольт-амперными характеристиками с участками отрицательного сопротивления.

При указанных толщинах светочувствительность слоя 8 невелика, но в отличие от люминесцентных преобразователей изображений здесь это не имеет значения: недостаточная чувствительность легко компенсируется увеличением мощности лазера.

Более эффективно эти преобразования можно выполнять, если стабилизировать s — число высвечиваемых точек. Для этого достаточно разделить одну из обкладок на s изолированных электродов и питать их от отдельных источников тока или через отдельные резисторы. Установкой тока следует довести число высвечиваемых точек до одной под каждым из электродов. Это же позволяет уменьшить размеры высвечиваемых точек, что дополнительно повышает разрешение системы обращения и соответственно емкость памяти.

Замена математического ожидания \bar{s} детерминированной величиной s изменяет оценки надежности: они улучшаются (при сохранении «голографичности»). Вывод формул дан в приложении. В частности,

$$\lg p = \left(\frac{\lambda_m}{\mu} w \ln 2 \right) \lg(1 - \exp(-w \ln 2)), s_{\text{opt}} = \frac{m}{\beta} \ln 2, p_{\text{min}} = 2^{-s_{\text{opt}}}.$$

После подстановок, которые мы выполнили при выводе (20), получим аналогичный надежный результат, но с лучшими цифровыми данными.

Заключение. Итак, инвариантность к параметрам развертки можно получить «ценой» сжатия телевизионного сигнала. «Цена» оказывается отрицательной: получается дополнительный выигрыш, не менее важный, чем инвариантность. Процессорные функции можно реализовать еще на стадии восприятия изображения (растровая оптика), но можно и в процессе последующей обработки. В этом случае эффективным инструментом сжатия информации является s -распределенная ассоциативная память.

Кроме рассмотренного варианта, такая память может быть создана на базе СБИС-памяти и программными средствами.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Расчет ошибок аппроксимации для упорядоченного размещения импликант формируемой булевой функции. Будем исходить из посылки о возможности разделения m импликант на s равномогущих групп и таком их распределении внутри группы, когда каждая из них представлена плотной упаковкой n -пространства, но расположение импликант, принадлежащих разным группам, независимо. Изображение представлено независимым расположением μ

точек в этом пространстве: $\mu = \alpha + \beta \approx 2\beta$, где α — число единиц, β — число нулей.

Вероятность того, что нулевая точка изображения попадет в фиксированную импликанту, равна s/m . С вероятностью $1 - s/m$ она окажется вне этой импликанты. Вероятность того, что все β точек изображения не попадут в импликанту (вероятность ее сохранения) равна $(1 - s/m)^\beta$. Вероятность ошибок $p = p(0/1)$ определяется возможностью освобождения от импликант точек n -пространства, в которых размещены единицы изображения. Для одной из s групп это событие оценивается вероятностью $p(1, s)$ и соответствует попаданию единичной точки изображения в импликанту, которая вычеркнута хотя бы одним из β нулей.

Следовательно, $p(1, s) = 1 - (1 - s/m)^\beta$. Однако эта ошибка в воспроизведении данного единичного символа будет зарегистрирована в том случае, если она одновременно произойдет в s группах. Отсюда вероятность ложного воспроизведения единичного символа равна $p = [1 - (1 - s/m)^\beta]^s$.

Исследуя эту функцию на минимум, находим, что он наступает при

$$s = s_{\text{opt}} = \frac{m}{\beta} \ln 2.$$

После подстановки в исходную формулу получим для случая больших β

$$p = 2^{-s_{\text{opt}}}.$$

Отсюда легко получить общую оценку улучшения надежности за счет перехода к детерминированному размещению импликант:

$$p_d = p_c \exp[e^{-1} - (\ln 2)^2].$$

Для случая $p_d = p_c$ получим улучшение других параметров — количества записываемой информации или экономию памяти:

$$\frac{m_c}{m_d} = \frac{\beta_d}{\beta_c} = e(\ln)^2 = 1,306.$$

Отметим, что улучшения параметров при переходе от случайной технологии к детерминированной оказываются неожиданно малыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радченко А. Н. Аппроксимация и точное формирование булевых функций многих переменных. I. Объем памяти и точность аппроксимации // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. — 1985. — № 1.
2. Радченко А. Н. Аппроксимация и точное формирование булевых функций многих переменных. II. Эффективное построение ассоциативной памяти // Там же. — № 2.
3. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение: Пер. с англ. — М.: Мир, 1990.
4. Мануэль Т. Нейропроцессор, обеспечивающий возможность вычисления в реальном масштабе времени на персональных компьютерах // Электроника: Пер. с англ. — 1988. — 61, № 3.
5. Валюс Н. А. Растровая оптика. — М.: Машиностроение, 1966.
6. Введенский В. Л., Ожогин В. И. Сверхчувствительная магнитометрия и биомагнетизм. — М.: Наука, 1986.
7. Takahasi H., Goto E. Application of error-correcting codes to multi-way switching // UNESCO Conf. on Information Proces. — Paris, 1959.
8. А. с. 1418813 СССР. Блок обращения к ассоциативному запоминающему устройству / А. Н. Радченко. — Опубл. 23.08.88, Бюл. № 31.
9. А. с. 1434500 СССР. Блок обращения к оптоэлектронной памяти / А. Н. Радченко. — Опубл. 30.10.88, Бюл. № 40.
10. Радченко А. Н. Физическое моделирование нейронной памяти как мозаики хемо- и электроцептивных элементов СД-мембраны // Нейрофизиология. — 1974. — 6, № 1.

11. Шапиро А. С., Быкова Т. П. Твердотельные устройства записи ТВ программ и перспективы их использования // Техника кино и телевидения. — 1989. — № 7.
12. Городников А. С. Перспективы твердотельной записи аудиовизуальной информации // Техника кино и телевидения. — 1990. — № 2.

Поступило в редакцию 1 августа 1991 г.

УДК 621.391

Ю. И. Палагин

(Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОМЕРНЫХ СЛУЧАЙНЫХ ПОЛЕЙ АВТОРЕГРЕССИИ — СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО

Рассматриваются точные и приближенные методы моделирования случайных полей класса авторегрессии — скользящего среднего (АР — СС). Структура множества соседей, а также размерности пространства значений и аргумента поля произвольны. Для некаузальных моделей однородное (стационарное) решение определяется с помощью спектрального разложения. Исследуются переходные процессы и даются рекомендации по выбору параметров алгоритмов каузальных полей. Получена параметрическая модель произвольного векторного поля авторегрессии — скользящего среднего, адекватная на уровне первых двух моментов. Приводятся примеры.

Исследования сложных информационно-измерительных систем, устройств распознавания, анализа и обработки статистических данных, функционирующих в условиях действия случайных возмущений, требуют синтеза эффективных алгоритмов моделирования многомерных случайных полей (СП) и процессов [1—4]. Для различных классов случайных функций разработаны методы, позволяющие воспроизводить заданные вероятностные характеристики и в первую очередь математическое ожидание и корреляционную функцию (КФ) [5—12]. При обобщении известных рекуррентных алгоритмов моделирования стационарных случайных процессов АР — СС [5, 6] на поля возникают значительные трудности, обусловленные некаузальностью моделей [12, 13]. Оказываются существенными методические погрешности, вызванные переходными процессами. Ввиду многомерности аргумента $x = (x_1, \dots, x_m) \in R^m$ моделируемого поля $\xi(x) \in R^n$ резко возрастает затрачиваемое машинное время ЭВМ.

Настоящая статья посвящена обобщению методов моделирования случайных процессов и СП с непрерывным временем на многомерные поля класса АР — СС. Размерности пространства значений n и аргумента m произвольны. В работах [4, 12—14 и др.] АР-модели и модели скользящего среднего использовались как аппарат описания изображения подстилающих поверхностей. Поля предполагались каузальными, скалярными ($n = 1$) и двумерными ($m = 2$). Для некаузальных полей «чистой авторегрессии» (при $n = 1, m = 2$) в [12] предложен приближенный метод, который использовался для машинного синтеза текстур. Как показано в [13], модели АР — СС возникают при дискретизации стохастических дифференциальных уравнений в частных производных. Различным типам уравнений соответствуют как каузальные, так и некаузальные АР-схемы.

Описание поля. Определение решения. Рассмотрим стохастическое уравнение

$$\xi_k + \sum_{j \in D_k} A_j \xi_{k-j} = \sum_{j \in D_k} B_j \eta_{k-j}, \quad (1)$$