

УДК 621.397.2

## КОМПАКТНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ И КОДИРОВАНИЕ ГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

С.Д. Свет, профессор МТУСИ

А.В. Гузеев, аспирант МТУСИ

**Введение.** Повышение эффективности использования каналов связи особенно актуально, если передаваемая информация является графической. Это связано с постоянно возрастающим объемом подобной информации не только в электронном и факсимильном документообороте, но и в таких интенсивно развивающихся сферах как телемедицина, где зачастую канал связи может иметь существенные ограничения по полосе частот и качеству передачи. Во многих случаях единственная возможность увеличения эффективности использования канала связи — сжатие объема передаваемых изображений.

В настоящее время существуют и стандартизованы различные методы и алгоритмы сжатия, эффективность которых существенно зависит от характера передаваемой графической информации. Наиболее эффективное сжатие достигается при условии внесения некоторых потерь (искажений) в процессе кодирования — восстановленное изображение не является точной копией оригинала, но возникающие искажения не влияют на качество зрительного восприятия и с этой точки зрения являются допустимыми. Такие методы кодирования называются методами кодирования с потерями.

В отличие от существующих стандартизированных методов сжатия с потерями в данной работе развивается подход, при котором перед кодированием потери вносятся в само исходное изображение и можно заранее сказать, как именно будет искажаться изображение. При этом вносимые искажения согласуются со свойствами зрительного восприятия и, кроме того, нормируются в соответствии с заданным критерием качества.

Методология внесения потерь такова, что с позиции зрительного восприятия новое построенное изображение может быть практически неотличимым от оригинала.

Однако, это новое изображение обладает более простой структурой и приобретает свойства, которые оказываются полезными для решения задач сжатия и задач повышения помехоустойчивости

при передаче изображений по каналам связи.

Развиваемый в статье метод универсален еще и потому, что построенные на его основе алгоритмы сжатия оказываются достаточно эффективными для широкого спектра графических (двухградационных) изображений.

**Блочное представление двухградационного изображения.** Во всех методах сжатия цифровые изображения, состоящие из единичных элементов разрешения (пикселей), представляются в виде совокупности одно- или двумерных блоков, как правило, прямоугольной формы, которые подвергаются кодированию. Так при статистическом кодировании стандарта G3 изображение представляется набором длин серий черных и белых элементов, при кодировании с помощью преобразований (JPEG, WAVELET) и фрактальном кодировании — в виде двумерных блоков. При контекстных способах кодирования документальных текстовых изображений блоками могут являться фрагменты и даже сами изображения печатных символов, что сближает эти способы с методами опознавания образов [1].

Теоретически увеличение размеров блоков должно приводить к повышению эффективности кодирования, однако резко возрастающая вычислительная сложность существенно ограничивает размеры и форму блоков. Так при кодировании на основе преобразований (JPEG) размер блоков не превышает  $8 \times 8$  элементов и только в статистическом кодировании факсимильных изображений одномерные блоки достигают размера  $1 \times 1728$  элементов, что, однако, не приводит к большим коэффициентам сжатия, поскольку представление изображения в виде совокупности независимых строк развертки плохо отражает структуру и свойства изображения как двумерного объекта.

Между тем, к выбору размеров и числа блоков можно подойти с другой точки зрения. Выбрав некоторый размер блока  $m \times n$ , будем пытаться строить изображение не из всех возможных  $N = 2^{nm}$  блоков, а из некоторого ограниченного их числа  $N_{\text{разр}} \ll N$ .

При этом должно соблюдаться требование к качеству нового изображения, под которым будем понимать точность воспроизведения границ (контуров) изображения, поскольку для бинарных изображений качество копии определяется именно точностью воспроизведения контуров. Такая мера качества может быть задана количественной оценкой. Другой и, может быть, более важной мерой качества станет субъективная оценка, основанная на свойствах и особенностях зрительного восприятия изображения.

Цель такого представления изображения состоит в упрощении его структуры, что, как будет видно из дальнейших рассуждений, позволяет существенно повысить эффективность его сжатия. Кроме того, такое изображение приобретает и дополнительные полезные свойства.

Условие минимального искажения контуров кодируемого изображения состоит в том, чтобы границы реконструированного изображения изменялись не более чем на  $\pm k$  элементов разрешения по сравнению с соответствующими границами изображения оригинала.

Допустимость такого «качания» границ обусловлена, прежде всего, техническими параметрами существующих устройств формирования цифрового изображения. Известно, что для качественных сканеров точность воспроизведения черно-белой границы  $\pm 1$  элемент разрешения вдоль строки развертки считается более чем приемлемой. Кроме того, такая мера хорошо согласуется с особенностями зрительного восприятия бинарных изображений человеком.

Объектом исследования будут служить тестовые изображения стандарта МСЭ, представляющие различные документы, графики, таблицы, а также некоторые медицинские изображения. На рис. 1 показаны три характерных изображения (слева направо): А1, А2 и А3.

Возможность построения изображения из ограниченного числа блоков определяется, прежде всего, их статистическими свойствами — характером распределения блоков.

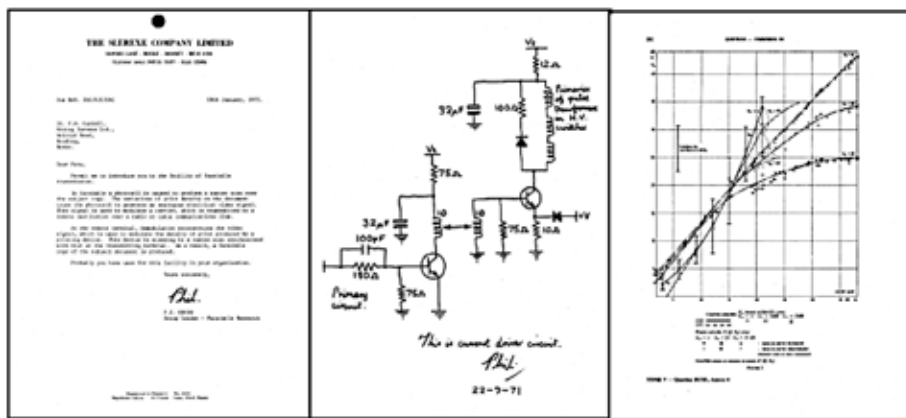


Рис. 1

На рис. 2 даны распределения блоков  $2 \times 4$ ,  $3 \times 3$  и  $4 \times 4$  для тестовых изображений A1, A2 и A3. Все кривые имеют резко спадающий характер, и при этом «хвост» имеет характер равномерного распределения. Вероятности некоторых блоков равны нулю.

Оказалось, что для блоков, не превышающих размеров  $5 \times 5$  элементов разрешения, распределения блоков носят крайне неравномерный характер, с увеличением размерности блока характер распределения становится почти

равномерным. Поэтому в дальнейшем мы будем оперировать с блоками размерностью не выше  $4 \times 4$ .

Как видно из рис. 2, для большинства бинарных изображений подавляющее количество типов блоков имеют очень маленькую вероятность появления, а некоторые типы блоков не встречаются на изображениях вообще. В связи с этим становится интересной следующая задача:

Если большинство блоков встречаются с малой вероятностью, то можно

ли их вообще удалить из изображения, заменив на некоторые блоки с большей вероятностью появления. В этом случае изображение будет состоять из меньшего числа возможных блоков, и в этом смысле будет иметь более простую структуру.

Очевидно, что при использовании ограниченного числа блоков реконструированное изображение будет содержать искажения, которые, прежде всего, будут возникать на границах — контурах изображений. Поэтому необходимо не только отобрать подходящие блоки, но и построить правила замены блоков таким образом, чтобы возникающие искажения границ были минимальны с точки зрения выбранного численного критерия и, кроме того, были согласованы со свойствами зрительного восприятия.

**Выбор числа блоков.** Выбор минимального числа блоков связан с представлением изображения в виде некоторой модели. Если предположить, что изображение является статистическим объектом, в котором различные блоки как случайные величины появляются независимым образом, то крайне неравномерный характер одномерного распределения блоков позволяет ограничить число блоков просто по величине их вероятности.

Так, если ограничиться вероятностным порогом 0,001, то для блоков  $2 \times 4$  текстового изображения число блоков, имеющих вероятность выше указанного порога, не превысит 32. Это означает, что реконструированное изображение следует строить не из всех возможных 256 блоков, а только из 32 «разрешенных» блоков. При пороге 0,005 число блоков сокращается до 15.

Теперь, оставив некоторое ограниченное число блоков — «кусочков мозаики», пользуясь только этим набором, построим новое, но очень «похожее» на исходное, изображение.

Если это удастся сделать, то можно получить следующие возможности:

1. Мы существенно упростим структуру изображения — оно будет состоять из небольшого набора блоков и при этом останется почти тем же самым исходным изображением.

2. Ограничив число блоков, мы уже уменьшим объем исходного изображения, поскольку для кодового описания блоков, например для 16 или 32 блоков  $2 \times 4$ , нам нужно 4 или 5 разрядов вместо 8 исходных. Дальнейшее сжатие можно осуществить, применяя различные известные методы компрессии.

3. Поскольку новое изображение построено из небольшого числа разрешен-

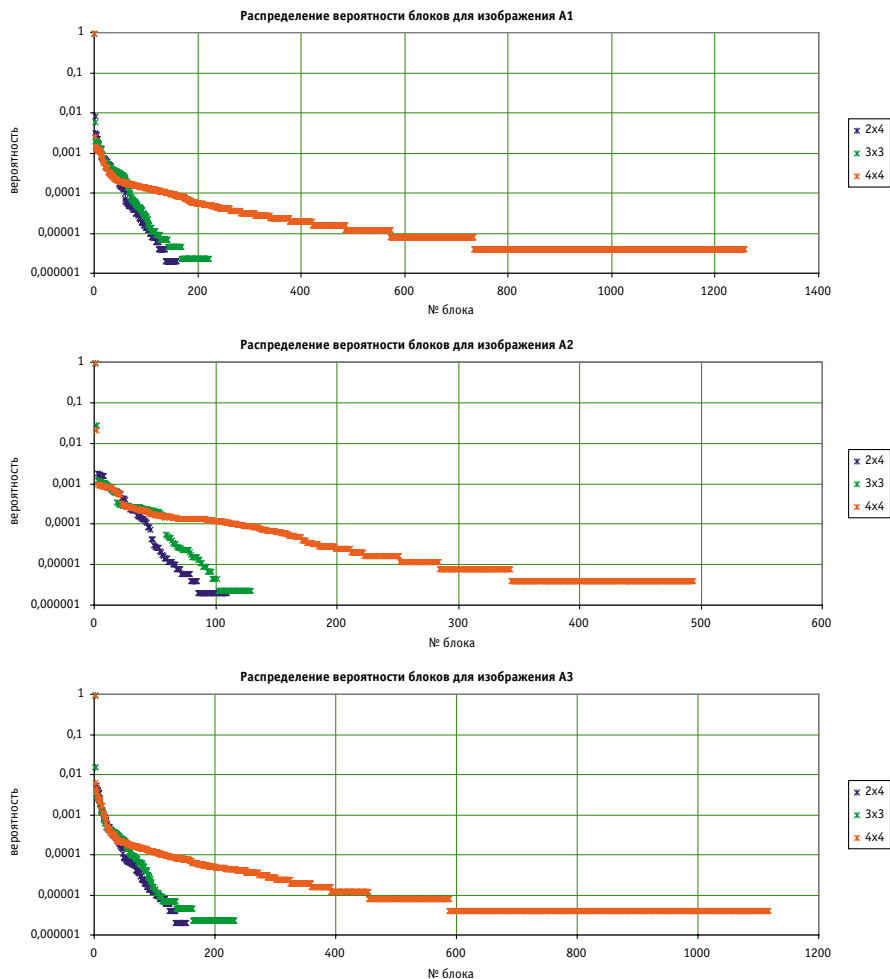


Рис. 2

ных блоков, а все остальные являются недопустимыми, то такое изображение должно обладать помехоустойчивыми свойствами, поскольку его структура аналогична структуре кодовых комбинаций некоторого помехоустойчивого (N, K) кода.

4. При ограничении числа блоков, в принципе правомерна постановка задачи поиска таких кодовых символов, свойства которых были бы оптимальны в некотором смысле для выбранного способа кодирования.

**Замена блоков.** Ограничив количество блоков, разработаем способы их замены, при этом замена должна осуществляться таким образом, чтобы не нарушалась форма границ изображения в пределах заданного критерия качества — качания границы не более чем, например, на ±1 элемент разрешения (вдоль или поперек строки развертки).

Прежде чем приступить к разработке алгоритмов замены следует сказать несколько слов о характеристиках кодируемого изображения. Кодируемые изображения имеют разрешение не меньше 10—12 точек/мм, и самые тонкие штрихи (0,15—0,2 мм) на обычных графических изображениях имеют размеры не менее двух точек разрешения сканирования. Таким образом, речь идет о «типичных» изображениях, которые передаются по каналам факсимильной связи, электронной почте и сетям передачи данных.

Правила замены блоков можно разбить на три группы:

- формализованные алгоритмы, основанные на математических критериях блости;
- эмпирические алгоритмы, основанные на экспериментальных данных;
- комбинация указанных алгоритмов.

Рассмотрим некоторые формализованные способы.

Степень близости блоков можно оценивать, например, с помощью метрики Хемминга. Однако ее применение не гарантирует однозначного нахождения разрешенного блока и может оказаться, что несколько разрешенных блоков «претендуют» на один из заменяемых.

Как показали многочисленные эксперименты, алгоритм замены разбивается на два этапа. На первом происходит сравнение заменяемого блока со всеми разрешенными по модулю 2, т. е. отбираются все возможные разрешенные блоки с минимальным расстоянием Хемминга. Если найденный разрешен-

ный блок — единственный, то он и является заменяемым блоком. Если таких блоков оказывается несколько, то заменяемым оказывается тот блок, который в наименьшей степени искажает часть контура. Экспериментально было выяснено, что при такой замене блоков сдвиги границ- контуров изображений изменяются не более чем на 1—2 элемента разрешения. Это хорошо видно на рис. 3, где показано изображение разности исходного фрагмента изображения и того же фрагмента, реконструированного в данном случае из 8 разрешенных блоков.



Рис. 3

Левая и средняя части рис. 3 представляют собой оригинал и реконструированное изображение соответственно. Из правой части рисунка хорошо видно, что ошибки в основном располагаются по контуру изображения — фактически изображение разности является изображением контура.

В результате проведенных экспериментов установлено, что при 64 разрешенных блоках зрительно отличить восстановленное изображение от оригинала невозможно даже при существенном увеличении изображений.

При 32 блоках восстановленное изображение по качеству практически не отличается от исходного. При этом объеме изображения может быть уже сжат в

3.2 раза только за счет уменьшения числа разрешенных блоков. Интересно, что если снизить требования к качеству изображения и ограничиться требованием читаемости, то число блоков можно существенно сократить. Так, на рис. 4 приведено изображение текста, построенное всего из 8 блоков размером 2×4. Качество этого изображения несколько превосходит качество изображения, полученного с пониженным разрешением сканера (8 точек/мм).

Более качественные результаты по выбору и замене блоков можно получить, усложнив модель изображения, считая, что, по крайней мере, некоторые соседние блоки в изображении статистически связаны между собой.

На рис. 5 приведен график совместного распределения двух блоков размером 2×4, откуда видно, что некоторые пары блоков достаточно сильно статистически связаны. Подробный анализ статистики блоков различных размеров разных изображений позволил построить более эффективный способ замены блоков, при котором вид заменяемого блока зависит от соседних ближайших блоков.

На рис. 6 представлены реконструированные изображения из 32 блоков, при этом последнее изображение построено с учетом соседей. На изображениях разности хорошо видно, что количество искажений в последнем случае значительно меньше.

При таком способе замены для многих документальных изображений приемлемое качество может быть достигнуто и при меньшем количестве разрешенных блоков.

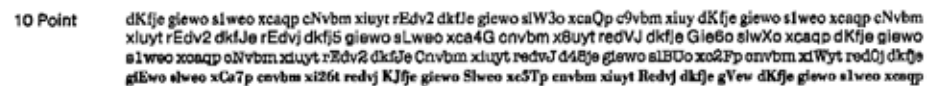


Рис. 4

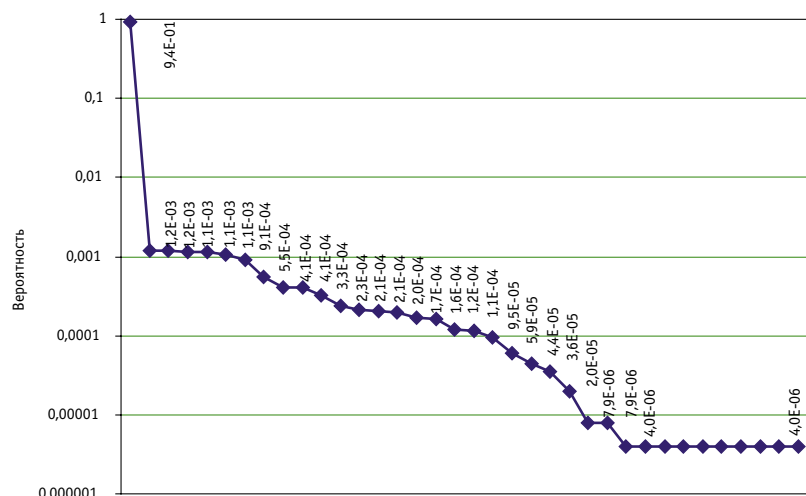


Рис. 5

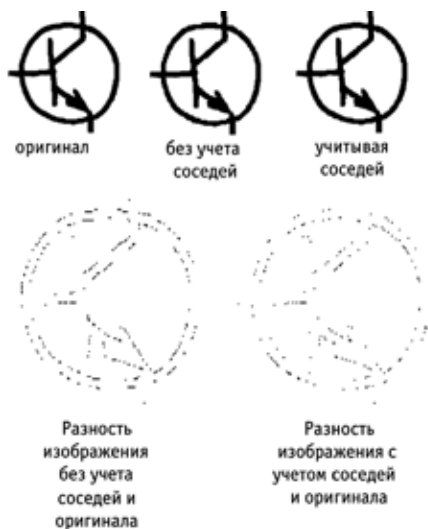


Рис. 6

**Сжатие двухградационных изображений.** Если посмотреть на распределение вероятностей разрешенных блоков, то сильная неравномерность распределения делает целесообразным применение известных статистических методов сжатия.

В данной статье мы приводим результаты сжатия модифицированным кодом Хаффмана. В табл. 1 даны результаты компрессии исходных и реконструированных изображений, состоящих из различного числа разрешенных блоков.

Наибольший выигрыш достигается при использовании 32 разрешенных блоков, при которых качество реконструированного изображения практически не отличается от исходного оригинала, а коэффициент компрессии некоторых изображений существенно превосходит коэффициент сжатия  $K_{сж}$  исходного изображения.

Таблица 1

Изображение	Коэффициент сжатия для		
	оригинала	16 блоков	32 блоков
A1	18	26	22
A2	21	28	25
A3	17	24	21

Таким образом, в среднем по всем тестовым изображениям увеличение  $K_{сж}$  достигает 18%. При использовании алгоритма арифметического кодирования увеличение  $K_{сж}$  достигает 23—25%.

Для изображений, состоящих из ограниченного набора блоков, можно разработать и более эффективные методы сжатия. Так для алгоритма JBIG (в котором применяется контекстное кодирование), удалось подобрать «оптималь-

ные» кодовые фрагменты, построенные на основе выбранных разрешенных блоков, которые повысили эффективность сжатия текстовых изображений в 2,5 раза ( $K_{сж} = 75$ ) [2].

**Сжатие растрованных изображений.** Растрованные изображения часто содержатся в документах, книгах, газетах и журналах. По своей сути эти изображения также являются двухградационными, а полутона визуально создаются специально регулярной структурой, состоящей из черных точек разных площадей, соответствующих определенным градациям яркости.

Общепринятая процедура хранения и передачи таких изображений заключается в том, что сначала исходное изображение подвергается процедуре дерастрирования, после чего полученное полутоновое изображение подвергается кодированию. Если на приемной стороне требуется иметь растрованное изображение, то процедура растрирования применяется еще раз. Очевидно, что при такой цепочке преобразований происходит существенная потеря качества изображения.

Потерь можно избежать, если сжатие подвергнуть само исходное растрованное изображение. При АМ-растрировании изображение формируется регулярной структурой (линиатурой) — сеткой с определенным шагом, в узлах которой, располагаются растровые точки различной площади. Поскольку параметры линиатуры известны, то в канал можно передавать только информацию о площадях растровых точек, а на приеме восстанавливать эти площади в со-

ответствующих узлах растровой сетки. Такой способ кодирования был предложен в 1986 г. для построения цифровых систем передачи газет [3]. Коэффициент сжатия достигает 10—15 в зависимости от заданного числа уровней яркости растрованного изображения.

Увеличить  $K_{сж}$  растрованного изображения можно, применив изложенную выше стратегию блочного представления изображения.

В данном случае блоком будет являться ансамбль из точек раstra 2×2, 3×3, ... и т. д.

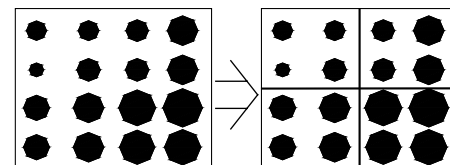


Рис. 7

На рис. 8 приведены распределения вероятностей различных блоков.

Наиболее неравномерное распределение имеют блоки размером 2×2 растровых точек, которые и были выбраны для дальнейшего исследования. Ввиду ограниченного объема статьи, подробности правил отбора и замены блоков здесь не приводятся. В отличие от предыдущих способов разработанные правила отбора и замены блоков являются адаптивными, что позволяет сохранять как контурные детали изображений, так и уровень градации яркости замененного блока. Заключительной процедурой является кодирование выбранных блоков одним из статистических методов.

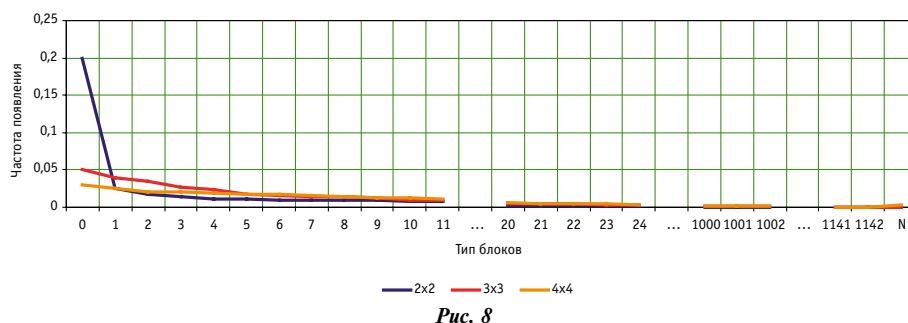


Рис. 8



Рис. 9

Растринрованное изображение, приведенное на рис. 9 слева, занимает объем 960 Кб. Декодированное растринрованное изображение приведено на рис. 9 справа. Сжатие на основе ограниченного числа блоков уменьшает первоначальный объем в 56,5 раза. Коэффициенты сжатия различными алгоритмами после дерастрирования изображения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Метод сжатия	Коэффициент сжатия
<i>Сжатие с удалением растровой структуры</i>	
TIFF + LZW без потерь	18,1
GIF без потерь	17,7
JPEG с потерями	35,6
<i>Сжатие без удаления растра</i>	
Блочное кодирование	56,5

**Заключение.** Полученные результаты по сжатию графических изображений подтверждают целесообразность дальнейшего исследования предложенного подхода: реконструкции структуры кодируемого изображения на основе ограниченного числа выбранных блоков. Во-первых, это позволяет существенно увеличить сжатие графических изображений широкого класса стандартными методами (Хаффман, арифметическое кодирование и другие). Во-вторых, реконструированное изображение приобретает дополнительные полезные свойства, которые позволяют поставить в принципе задачу кодирования не как нахождение кода для данного класса изображений, а как «оптимизацию» изображения для данного алгоритма кодирования. Экспериментально такая возможность была подтверждена для алгоритма контекстного кодирования, что позволило существенно увеличить коэффициент сжатия.

Наконец, в дополнительном исследовании нуждаются также и свойства помехоустойчивости, приобретаемые изображениями, построенными из ограниченного числа блоков.

Предложенный подход можно также использовать и при кодировании полутонных изображений.

---

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кунт М.** Блочное кодирование графических материалов: Обзор. ТИИЭР, 1980, т.68, №7, 21—39.
2. **Witten I.H.** Managing gigabytes: compressing and indexing documents and images. Academic Press, 1999.
3. **Гудштейн Е.** Кодирование с потерями двухуровневых факсимильных изображений // Средства связи. — 1986. — №2. — С. 27—29.

Получено 4.02.09