

тативную в пределе диаграмму

$$\begin{array}{ccccc} \mathbb{C}^G & \xrightarrow{I_m} & H_m & \xleftarrow{P_m} & \Lambda R^N \\ F_G \downarrow & & \downarrow P_m F_N & & \downarrow F_N \\ \mathbb{C}^G & \xrightarrow{I_m} & H_m & \subset & \Phi R^N \end{array} \quad (4)$$

Таким образом,  $F_N = \lim I_m F_G I_m^{-1} P_m$  на  $\Lambda R^N$ .

Теперь, используя (1) и (4), можно связать  $F_N$  и  $F_M$ . Пусть  $G' = \bigoplus_{i=1}^M Z m'_i$ ,  $m' = (m'_1, \dots, m'_M)$ . Рассмотрим последовательность пар  $m, m'$  такую, что  $G$  изоморфна  $G'$ . Например, при  $M=1$  пары  $m$  и  $m'$  характеризуются тем, что  $m$  состоит из взаимно простых  $m_i$  и  $m' = \prod_{i=1}^N m_i$ .

Тогда, соединяя (1) с (4), получаем следующую диаграмму:

$$\begin{array}{ccccccc} \Lambda R^M & \xrightarrow{P_{m'}} & H_{m'} & \xleftarrow{I_{m'}} & \mathbb{C}^{G'} & \xleftarrow{J} & \mathbb{C}^G \xrightarrow{I_m} H_m \xleftarrow{P_m} \Lambda R^N \\ F_M \downarrow & & \downarrow P_{m'} F_M & & \downarrow F_{G'} & & \downarrow F_G \quad \downarrow P_m F_N \quad \downarrow F_N \\ \Phi R^M & \supset & H_{m'} & \xleftarrow{I_{m'}} & \mathbb{C}^{G'} & \xrightarrow{J^+} & \mathbb{C}^G \xrightarrow{I_m} H_m \subset \Phi R^N \end{array} \quad (5)$$

коммутативную в пределе на указанной подпоследовательности  $m, m' \rightarrow \infty$ . Отсюда на  $\Lambda R^N$  ( $\Lambda R^M$ )  $F_N = \lim U F_M V$ , где  $U = I_m J^+ I_m^{-1} P_{m'}$ ,  $V = I_{m'} J I_{m'}^{-1} P_m$  и  $F_M = \lim U' F_N V'$ , где  $U' = I_{m'} (J^+)^{-1} I_m^{-1} P_m$ ,  $V' = I_m J^{-1} I_m^{-1} P_{m'}$ . Операторы  $U, V, U', V'$  осуществляют дискретизацию и соответствующую расстановку дискретных отсчетов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику.— М.: Мир, 1970.
2. Престон К. Когерентные оптические вычислительные машины.— М.: Мир, 1974.
3. Строук Дж. У., Халида М., Том Ф., Виллам Д. Г. Улучшение качества и восстановление трехмерных изображений голографическими методами // ТИИЭР.— 1977.— Т. 65, № 1.
4. Кольтер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография.— М.: Мир, 1973.
5. Трахтман А. М., Трахтман В. А. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах.— М.: Сов. радио, 1975.
6. Кириллов А. А. Элементы теории представлений.— М.: Наука, 1978.
7. Хьюитт Э., Росс К. Абстрактный гармонический анализ.— М.: Наука, 1975.— Т. 1; М.: Мир, 1975.— Т. 2.
8. Кренкель Т. Э. Спектральный анализ на конечных коммутативных группах // Радиотехника.— 1975.— № 6.
9. Владимиров В. С. Уравнения математической физики.— М.: Наука, 1967.

Поступила в редакцию 17 февраля 1986 г.

УДК 007.5 : 535 : 681.518

А. Г. БУЙМОВ, С. П. ИЛЬИН

(Томск)

### МОЗАИЧНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ С УПРАВЛЯЕМОЙ КОРРЕЛЯЦИЕЙ

**Введение.** При проектировании и исследовании систем, предназначенных для распознавания и дешифровки аэрокосмических и других снимков, необходимо иметь удобную параметризованную модель с контролируемой статистикой и визуальными свойствами (морфологией) реальных изображений. В [1—5] отмечается, что реальные изображения обычно имеют мозаичную структуру, т. е. состоят из областей с почти

постоянной яркостью во внутренних точках и резкими переходами на границах.

При моделировании мозаичных полей применяют разные способы разбиения плоскости случайными прямыми [3], алгоритмы объединения точек растра вокруг случайных центров по принципу ближайшего соседа [4] и т. д. Полученные области заполняют случайными постоянными яркостями.

Оригинальный метод получения мозаик предложен в [5]. Он использует алфавит из двенадцати контурных элементов, выстраиваемых в случайную последовательность на основе системы условных вероятностей. Изменение соотношения между вероятностями позволяет генерировать несколько типов мозаик от простейшей прямоугольной решетки до весьма замысловатых орнаментов.

Контурные элементы в [5] образованы лучами креста, разделяющего четыре соседние ячейки изображения (рис. 1). Бинарные величины  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  принимают значения нуль или единица и означают отсутствие или наличие соответствующего луча. Свойства мозаик полностью определяются значениями вероятностей  $P(a, b, c, d)$ :

$$\begin{aligned} P(0000) &= r_0; \\ P(1010) &= P(0101) = r_1/2; \\ P(1001) &= P(1100) = P(0110) = P(0011) = r_2/4; \\ P(1101) &= P(1110) = P(0111) = P(1011) = r_3/4; \\ P(1111) &= r_4; \quad \sum_{i=0}^4 r_i = 1. \end{aligned} \quad (1)$$

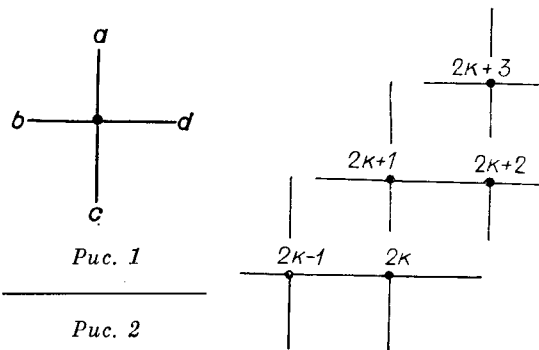
При построении используются условные вероятности

$$P(cd|ab) = P(abcd) / \sum_{c=0}^1 \sum_{d=0}^1 P(abcd).$$

Цель данной статьи — синтез таких соотношений между вероятностями (1), выполнение которых одновременно с заданием морфологии контуров позволяет контролировать корреляционные свойства получаемого кусочно-постоянного поля яркостей.

**1. Анализ переходных вероятностей.** Корреляционные свойства мозаичных полей вдоль некоторой траектории определяются потоками пересечения этой траектории контурными линиями и организацией заполнения непересекающихся областей случайными яркостями. В [3] рассматривается случай, когда яркости выбираются из коррелированной гауссовой совокупности. Получаемое при этом поле имеет громоздкое вероятностное описание, неудобное ни для аналитических исследований, ни для управления при имитационном моделировании. Если заполнение осуществлять с помощью независимой выборки, то, во-первых, упрощается управление корреляционными свойствами, так как они в этом случае зависят только от контурной структуры, а во-вторых, появляется возможность получения изображений с произвольными одномерными распределениями и достаточно простым двумерным описанием [6]. В случае мозаик с независимыми контурными элементами в соседних узлах решетки и независимым заполнением получают изображения с экспоненциальными корреляционными функциями.

Рассмотрим свойства последовательностей контурных элементов, соответствующих описанию (1).



Обозначим  $x_i = (a_i b_i c_i d_i)$  и  $y_j = (a_j b_j c_j d_j)$  как элементы в  $i$ -м и  $j$ -м узлах фрагмента прямоугольной решетки (рис. 2). Тогда с учетом правила построения мозаик [5] можно записать условные вероятности

$$P(y|x) = \prod_k P(y_{2k} | x_{2k-1}, x_{2k+1}), \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} x &= \{x_{2k-1}, k = 1, 2, \dots\}; \quad y = \{y_{2k}, k = 1, 2, \dots\}; \quad P(y_{2k} | x_{2k-1}, x_{2k+1}) = \\ &= P(c_{2k}, d_{2k} | a_{2k}, b_{2k}) \delta(a_{2k}, c_{2k+1}) \delta(b_{2k}, d_{2k-1}); \quad \delta(u, v) = \begin{cases} 1, & u = v; \\ 0, & u \neq v. \end{cases} \end{aligned}$$

Анализ (2) при различных требованиях к последовательности  $x$  приводит к выводу, что принятые правила в общем случае не обеспечивают независимости элементов из  $y$ , связность  $y$  выше связности  $x$  и, следовательно, получаемые мозаичные изображения статистически неоднородны.

В условиях (2) имеют место переходные вероятности

$$P(y_{2k+2} | y_{2k}) = P(c_{2k+2}, d_{2k+2} | a_{2k+2}, b_{2k+2}) P(a_{2k+2}, b_{2k+2} | a_{2k}, b_{2k}); \quad (3)$$

$$P(c_{2k+2} | a_{2k}) = \sum_{\substack{a_{2k+2} \\ b_{2k+2}}} P(c_{2k+2} | a_{2k+2}, b_{2k+2}) P(a_{2k+2}, b_{2k+2} | a_{2k}), \quad (4)$$

где

$$b_{2k} = d_{2k-1} \in x_{2k-1}; \quad a_{2k} = c_{2k+1}, \quad b_{2k+2} = d_{2k+1} \in x_{2k+1}; \quad a_{2k+2} = c_{2k+3} \in x_{2k+3}.$$

Анализируя (3), (4) и аналогичные вероятности переходов в других направлениях, можно показать, что необходимым и достаточным условием однородности изображения, независимости диагональных последовательностей типа  $x$ ,  $y$  и горизонтальных (или вертикальных) последовательностей лучей  $a$  (или  $b$ ) является независимость любых  $g$ -образных переходов в контурных элементах.

Очевидным примером, удовлетворяющим этому условию, может быть случайная прямоугольная решетка, заданная вероятностями

$$P(abcd) = P(a)P(b)\delta(c, a)\delta(d, b), \quad (5)$$

и мозаика, состоящая только из  $g$ -образных элементов:

$$P(abcd) = P(a)P(b)\delta(c, 1-a)\delta(d, 1-b). \quad (6)$$

В случае (1) переходы между лучами  $ab$ ,  $bc$ ,  $cd$  и  $ad$  характеризуются одной и той же стохастической матрицей

$$P = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{\alpha}{\alpha + \beta} & \frac{\beta}{\alpha + \beta} & \\ \beta & 1 - \alpha - 2\beta & \\ 1 & 1 - (\alpha + \beta) & 1 - (\alpha + \beta) \end{pmatrix} \quad (7)$$

с финальными вероятностями

$$p_0 = \alpha + \beta, \quad p_1 = 1 - (\alpha + \beta), \quad (8)$$

где  $\alpha = r_0 - r_2/4$ ,  $\beta = r_1/2 + r_2/4 + r_3/4$ . Если переходы независимы, то

$$P = \begin{pmatrix} p_0 & p_1 \\ p_0 & p_1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Выражения (7)–(9) одновременно выполняются только при условии

$$\alpha = (\alpha + \beta)^2, \quad p_0 = \sqrt{\alpha}, \quad (10)$$

которое и определяет искомое соотношение для вероятностей (1).

Построение контуров на основе описания (1) с ограничениями (10) и независимым заполнением случайными яркостями должно гарантиро-

Морфологический тип	$r_0$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	Примечание
A	$p_0^2$	$2p_0(1-p_0)$	0	0	$(1-p_0)^2$	$\tau_0 \geq 1/\ln 2$ , $p_0 = 1/2$
B	0	0	1	0	0	
C	$p_0^2$	$4p_0 - 3p_0^2 - 1$	0	$2(1-p_0)^2$	0	$\tau_0 \geq 1/\ln 3$
D	$2p_0 - 1$	$2(3p_0 - 2p_0^2 - 1)$	$4(1-p_0)^2$	0	0	$\tau_0 \geq 1/\ln 2$
E	$\frac{p_0^2}{1+\kappa}$	$p_0 \left( 2 - \frac{2+3\kappa}{1+\kappa} p_0 \right)$	$\frac{4\kappa p_0^2}{1+\kappa}$	0	$1 - 2p_0 + \frac{1-\kappa}{1+\kappa} p_0^2$	$r_0 \leq \frac{1+\kappa}{1-\kappa} - \frac{\sqrt{2\kappa(1+\kappa)}}{1-\kappa}$ , $\kappa \neq 1; p_0 \leq 1/2$ $\kappa = 1$

вать получение статистически однородных изображений с корреляционными функциями по горизонтали и вертикали

$$\rho(\tau) = p_0^\tau, \quad (11)$$

а по диагонали

$$R(\tau) = (r_0 + r_2/2)^\tau. \quad (12)$$

**2. Результаты моделирования.** Построение мозаик начинается с независимого присвоения лучам  $a$  первой строки и лучам  $b$  первого столбца контурных элементов значений 0 или 1 в соответствии с вероятностями  $p_0$  и  $p_1$ , а затем продолжается с помощью условных вероятностей  $P(cd|ab)$  [5].

Морфология контуров задается исключением одного или нескольких типов контурных элементов (1). Корреляционные свойства определяются заданием радиусов пространственной корреляции  $\tau_0$ , которые затем пересчитываются в вероятности  $p_0 = \exp(-1/\tau_0)$  и  $r_i, i=0,4$ , с учетом формул (8), ограничений (10) и выбранного типа мозаичного рисунка.

В таблице приведены описания пяти типов мозаик (1) с управляемой корреляцией. Тип A (прямоугольная решетка) соответствует фор-

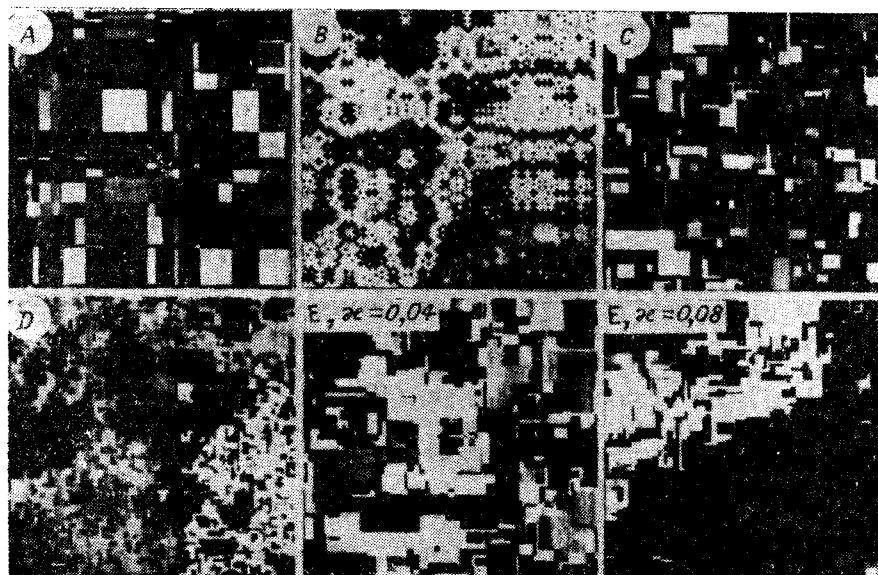


Рис. 3

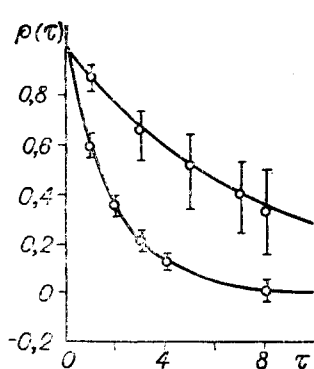


Рис. 4

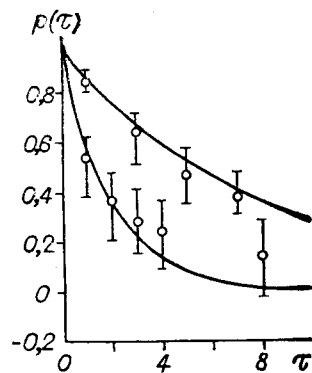


Рис. 5

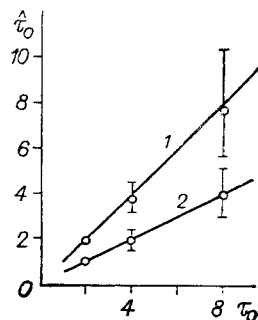


Рис. 6

мале (5). Вырожденный тип *B* имеет постоянный радиус корреляции  $\tau_0 = 1/\ln 2$  и соответствует (6) при  $P = 1/2$ . Мозаика типа *C* образуется непересекающимися прямоугольниками разных размеров. Тип *D* представляет собой многосвязные замкнутые области с более мелкими вкраплениями. Мозаика типа *E* зависит от неотрицательного параметра  $\kappa$ . При  $\kappa = 0$  *E* переходит в *A*. С увеличением  $\kappa$  прямоугольная решетка за счет появления г-образных элементов разрушается.

На рис. 3 приведены реализации получаемых изображений. Изображения сгенерированы на ЭВМ ЕС-1045, а затем с помощью ЭВМ М-6000 выведены на фототелеграфный аппарат. Все изображения, кроме типа *B*, имеют радиус корреляции  $\tau_0 = 3$  и размерность  $100 \times 100$  элементов.

На рис. 4 даны примеры корреляционных функций изображений, порожденных мозаикой типа *C*. Теоретические кривые построены по формуле (11) при радиусах корреляции  $\tau_0 = 2$  и  $\tau_0 = 8$ . Кружками обозначены средние величины, взятые по десяти значениям оценок, полученных по реализациям изображений размером  $100 \times 100$  элементов. Вертикальными отрезками отмечены максимальные отклонения от средних.

Анализ изображений типа *A* показал хорошее, как и на рис. 4, совпадение теоретических зависимостей с усредненными оценками, но обнаружил большие по сравнению со случаем *C* отклонения от средних. Этот факт объясняется тем, что прямоугольная решетка при заданной первой строке и первом столбце контурных элементов полностью детерминирована и, следовательно, реализация изображения типа *A* содержит намного меньше информации о статистических свойствах мозаики, чем реализация изображения типа *C*.

На рис. 5 приведены результаты оценивания корреляционных функций изображений типа *D*. В пределах радиуса корреляции усредненные оценки идут чуть ниже теоретических кривых. Дальнейший подъем экспериментальных точек соответствует «двухмасштабному» характеру мозаик этого типа. По-видимому, при  $\tau < \tau_0$  корреляционные свойства изображения определяются размерами мелких контуров, а при  $\tau > \tau_0$  — внешними размерами многосвязных областей.

Во всех случаях обнаружено приемлемое согласие между заданными значениями  $\tau_0$  и шириной  $\hat{\tau}_0$  оценок корреляционных функций на уровне 0,37. В качестве примера на рис. 6 приведены зависимости 1 и 2, соответствующие формулам (11) и (12) для изображений типа *C*. Кружками обозначены средние значения оценок, вертикальными отрезками — максимальные отклонения от средних.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пытьев Ю. П. Морфологический анализ изображений // ДАН СССР.— 1975.— Т. 224, № 6.
2. Харалик Р. М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР.— 1979.— Т. 67, № 5.

3. Modestino J. W., Fries R. W., Vickers A. L. Stochastic images models generated by random tessellations of the plane // Comput. Graph. Image Proc.—1980.— V. 12, N 1.— P. 74—98.
4. Ahuja N., Dubitzki T., Rosenfeld A. Some experiments with mosaic models for images // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics.—1980.— V. SMC-10, N 11.— P. 744—749.
5. Виттих В. А., Сергеев В. В., Соифер В. А. Обработка изображений в автоматизированных системах научных исследований.— М.: Наука, 1982.
6. Буймов А. Г. К статистике пальмовских полей // Автометрия.— 1981.— № 6.

Поступила в редакцию 13 июня 1985 г.

УДК 621.383

И. Ш. АЛКАРОВ, М. М. БАИЕВ, А. ЗАРНИПОВ,  
В. Ю. ИБРАГИМОВ, В. М. РУБИНОВ  
(Ташкент)

### УПРАВЛЯЕМАЯ СВЕТОМ ЗАПОМИНАЮЩАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХСЯ ХАЛЬКОГЕНИДНЫХ ПЛЕНОК

Для многих задач обработки информации необходимы устройства, обеспечивающие оперативную запись оптических изображений, их длительное хранение, обработку, считывание и перезапись в масштабе реального времени [1].

В [2] был предложен принцип построения полупроводникового устройства с указанными функциями. Его основой служит полупроводниковая многослойная сэндвич-структура, содержащая слой халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП) с бистабильным переключением и слой фоторезистивного полупроводника (ФР), которые заключены между пленочными электродами. Данная работа посвящена вопросам реализации такой структуры и возможностям ее использования, например, в качестве коррелятора изображений. На рис. 1, а представлена топология сэндвич-структуры. Стеклоподобная подложка 1 покрыта оптически прозрачным электродом из  $\text{SnO}_2$  2, на котором выращивается в квазизамкнутом объеме и сенсibilизируется фоторезистивный слой толщиной  $\sim 10$  мкм на основе  $\text{CdS}$  3. Затем последовательно наносятся островковая металлическая пленка 4 и слой ХСП из  $\text{As}_2\text{Se}_3$  5, на поверхность которого термически осаждается никелевый пленочный электрод 6.

Структура работает в трех последовательных режимах: а) запись — запоминается одно из изображений (опорное) в виде пространственного распределения проводящих и непроводящих участков слоя ХСП; б) счи-

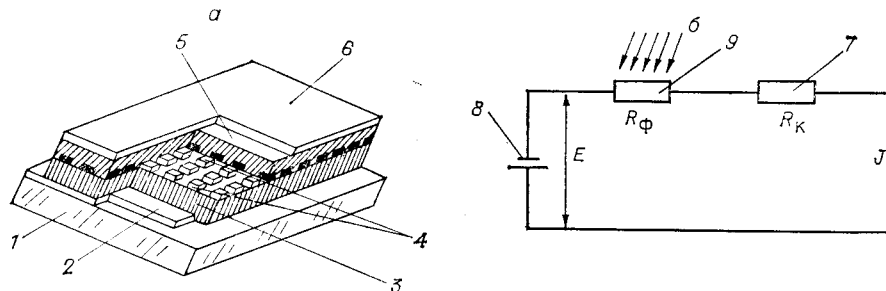


Рис. 1. Управляемая светом запоминающая структура (а) и эквивалентная электрическая схема одного элемента структуры (б):  
1 — подложка; 2 — слой  $\text{SnO}_2$ ; 3 — фоторезистивная пленка  $\text{CdS}$ ; 4 — проводящие островки из Ni; 5 — слой  $\text{As}_2\text{Se}_3$ ; 6 — электрод из Ni; 7 — сопротивление слоя  $\text{As}_2\text{Se}_3$ ; 8 — источник напряжения; 9 — сопротивление фоторезистивного слоя