

Однако сами значения \bar{n} оказываются существенно большими. Этот факт является непосредственным следствием более сложного вида анализируемого объекта и полностью согласуется с физическим представлением о том, что чем сложнее объект, тем большая доза излучения требуется для его более детального анализа.

Заключение. Полученное выражение для среднеквадратического отклонения восстановленного изображения от истинного позволяет оценить требуемое число изотопов \bar{n} , которое при однофотонной эмиссионной томографии обеспечивает значение A не более заданного, и определить оптимальную величину регуляризирующего параметра α . В этой связи интересно сравнить величину A с аналогичной величиной Δ , изучаемой в [1, с. 105—109] для трансмиссионной томографии, осуществляемой при слабом информационном сигнале. Легко видеть, что зависимость A от \bar{n} и α подобна зависимости Δ от \bar{n}_c и t . Однако в силу принципиально разных физической картины и физической сущности величин \bar{n} и \bar{n}_c , входящих соответственно в A и Δ , обсуждаемые зависимости существенно различаются в конкретном количественном выражении.

Находимое таким образом число \bar{n} позволяет оценить по известной методике количество радиоактивного вещества, которое должно вводиться для анализа объекта, в зависимости от того, на какой вид фантома ориентируется исследователь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троицкий И. Н. Статистическая теория томографии. — М.: Радио и связь, 1989.
2. Луис А. К., Наттерер Ф. Математические проблемы реконструктивной вычислительной томографии // ТИИЭР.—1983.—71, № 3.

Поступила в редакцию 14 июня 1991 г.

УДК 621.344.3

В. Н. Дубчак, В. Г. Красиленко

(Винница)

ЭФФЕКТИВНОЕ ФОРМИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ОПЕРАНДОВ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ МОМЕНТНЫХ ПРИЗНАКОВ МЕТОДОМ ПОФРАГМЕНТНОГО ИНТЕГРИРОВАНИЯ

При обработке визуальной информации в задачах распознавания образов, системах технического зрения, корреляционно-экстремальных системах навигации возникает задача эффективного вычисления последовательности моментных признаков, идентифицирующих заданное входное изображение. Перспективным и эффективным в смысле организации вычислительного процесса представляется определение моментных признаков методом пофрагментного интегрирования (МППИ).

Как показано в [1], чтобы вычислить совокупность моментных признаков $m_{\alpha\beta}$ цифрового полутонового изображения S размерностью $2N \times 2M$, определяемого набором из L бинарных срезов, необходимо выполнить преобразование вида

$$\begin{aligned}
 m_{\alpha\beta} &= \sum_{i=0}^{2N} \sum_{j=0}^{2M} i^{\alpha} j^{\beta} S(i, j) = \sum_{i=0}^{2N} \sum_{j=0}^{2M} \left(\sum_{p=0}^{K-1} a_{ijp}(\alpha, \beta) 2^p \right) \left(\sum_{l=0}^{L-1} s_{ijl} 2^l \right) = \\
 &= \sum_{p=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \left[\sum_{i=0}^{2N} \sum_{j=0}^{2M} (a_{ijp} s_{ijl}) \right] 2^p 2^l = \sum_{p=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} \|A_p S_l\| 2^{p+l}, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где $\|A_p S_l\|$ — сумма элементов конъюнкции матриц A_p и S_l . Таким образом, определение моментных признаков тестируемого изображения сводится к вычислению сумм элементов булевого произведения переменных A_p и S_l и суммированию полученных сумм в соответствующем двоично-взвешенном коде. Варианты устройств технической реализации вычислительного процесса определения МПМПИ приведены в [1—3].

Хранимые в памяти бинарные матрицы A_p служат для выделения фрагментов входного изображения и называются управляющими операндами (УО) определения МПМПИ.

При вычислении последовательности $m_{\alpha\beta}$ с использованием средств математического моделирования либо на базе набора данных, полученных в результате натурального эксперимента, как правило, ограничиваются конечным набором значений по каждому из параметров α и β , вследствие чего совокупность моментных признаков может быть представлена в виде матрицы, столбцы которой соответствуют изменению одного параметра, а строки — другого. В дальнейших рассуждениях, однако, зададимся максимальным порядком вычисляемого момента, определяемым как $\alpha + \beta \leq r$. Тогда, как показано на рис. 1, описание набора возможных моментных признаков зависит от квадратной матрицы треугольного вида, в которой диагональные числа означают моментные признаки одинакового порядка (l — r -порядки).

Пусть K — число УО, необходимых для нахождения моментного признака $m_{\alpha\beta}$. Тогда в предположении, что $N = 2^n$, $M = 2^m$, справедливо соотношение

$$K = \alpha(n + 1) + \beta(m + 1) + 1, \quad (2)$$

где $\alpha + \beta \leq r$, $\alpha = \overline{1, r}$, $\beta = \overline{1, m}$, и общее число определяемых до r -го порядка включительно МПМПИ равно $r(r + 3)/2$ (не учитывается значение признака m_{00} , вычисление которого в данном случае тривиально и не требует использования УО). Число управляющих операндов, необходимое для вычислений всех МПМПИ до r -го порядка включительно, равно

$$V = (r(\max\{n, m\} + 1) + 1)r(r + 3)/2.$$

Исследования показали, что, используя ряд несущественных, по сути, условий, можно значительно сократить разрядность объема памяти для хранения УО.

Выбор координатной сетки с началом в центре экрана позволяет сократить число УО, при этом значение K в соотношении (2) изменится и примет вид (3)

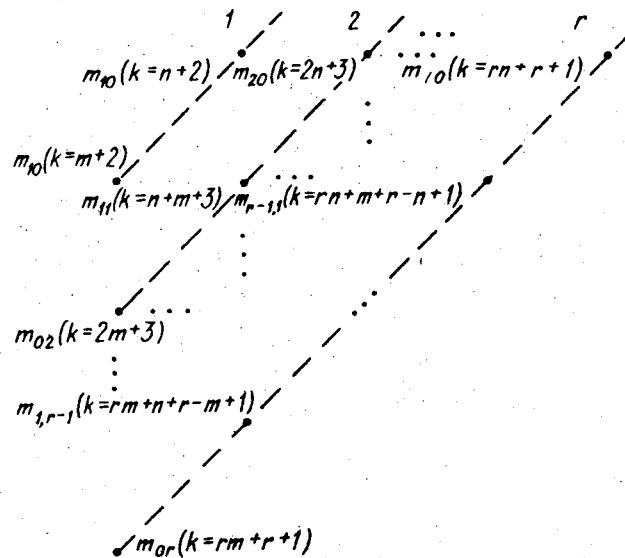
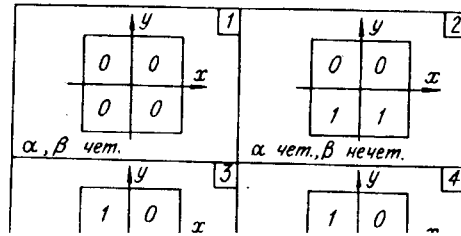


Рис. 1



$$K = \alpha n + \beta m + 1 = rn + 1, \quad (3)$$

если $n = m$.

Перенос начала координат в центр экрана ($i, j = -2^n, 2^n$) требует вычисления сумм элементов бинарных матриц с учетом знака. На значениях α и β : вычисление результирующих сумм элементов фрагментов изображений по

всему экрану необходимо производить с учетом знаковых областей.

Наборы УО для признаков $m_{\alpha\beta}$ и $m_{\beta\alpha}$ в случае, когда $n = m$, совпадают друг с другом с точностью до операции транспонирования над матрицами УО одного из наборов. Данная операция может быть реализована методами, описанными в [4], причем транспонирование возможно выполнять непосредственно над бинарными срезами входного изображения S .

Как следует из (3), порядок вычисляемого момента пропорционален числу используемых УО, что позволяет сократить их общее число за счет отбрасывания последних по старшим весам для моментов низших порядков, поскольку данные УО формируют только фрагменты с нулевой суммой элементов, не дающей вклада в окончательный результат.

С учетом приведенных рассуждений скорректированный объем памяти по числу УО равен

$$\tilde{V} = 0,5\Theta[r(r+3) + rn(r^2+r+2)] = 0,5r\Theta[r^2n + r(n+1) + 2n+3], \quad (4)$$

$$\Theta = \begin{cases} (r+4)/(2r+6), & r \text{ четное,} \\ (r^2+4r-1)/(2r^2+6r), & r \text{ нечетное.} \end{cases}$$

Коэффициент Θ введен с учетом моментов $m_{\alpha\alpha}$, для которых нет симметричных наборов УО. На практике значение (4) следует округлять в сторону ближайшего целого. Выигрыш по объему памяти равен

$$\eta = \left(1 - \frac{\tilde{V}}{V}\right) 100\% = \left(1 - \Theta \frac{r^2n + r(n+1) + 2n+3}{r^2(n+1) + r(3n+4) + 3}\right) 100\%. \quad (5)$$

Различные формы представления последовательности вычислений в преобразовании (1) позволяют синтезировать соответствующие варианты алгоритмов и устройств технической реализации вычислений.

В таблице приведены шесть вариантов структурных алгоритмов последовательного вычисления МПМПИ, их сравнительные характеристики по быстродействию и аппаратным затратам:

1 — бинарные срезы входного изображения и УО формируются последовательно, для каждого входного среза подаются свои УО (или наоборот);

2 — бинарные срезы входного изображения подаются параллельно, УО формируются последовательно;

3 — УО подаются параллельно, срезы входного изображения — последовательно;

4 — бинарные срезы входного изображения и УО формируются параллельно;

5 — входное изображение полутонное, УО подаются последовательно во времени, значения сумм элементов также формируются последовательно;

**Сравнительные параметры алгоритмов устройств
последовательного вычисления МПМПИ
до r -го порядка включительно**

№ п/п	Быстродействие	Аппаратурные затраты в усл. ед. (по числу блоков)
5	$\tilde{V}(\tau_1 + \tau_{III} + \tau_2)$	$Z_{II} + Z_{сч}$
6	$r(r+3)(\tau_1 + \tau_{II} + K\tau_2)/2$	$(r+1)Z_{II} + Z_{сч}$

П р и м е ч а н и е. τ_1 — такт логического поэлементного умножения бинарных матриц $A_p S_l$; τ_{III} — такт определения нормы $A_p S_l$; τ_2 — такт вычисления $SUM = \sum_{p=K}^{K-1} \sum_{l=L}^{L-1} \|A_p S_l\| 2^{p+l}$; Z_{II} — затраты на выполнение аналого-цифрового преобразования; $Z_{сч}$ — затраты на реализацию функции И для матриц; $Z_{сч}$ — затраты на суммирующий счетчик; \tilde{V} — скорректированный объем памяти по числу УО (4).

6 — входное изображение полутонное, УО подаются параллельно во времени, значения сумм элементов формируются параллельно.

Из таблицы следует, что сравнительно эффективны первая, вторая и пятая модели алгоритмов, поскольку в качестве определяющего параметра по быстродействию они содержат скорректированное значение \tilde{V} . Формальный анализ показывает, что наиболее перспективной оказывается пятая модель, если в качестве критерия оптимальности выбрать величину, пропорциональную быстродействию и обратно пропорциональную затратам. Однако в этом случае необходимо проводить обработку полутонных фрагментов изображений. Выбор нужного критерия эффективности в каждой конкретной ситуации должен определяться применением той или иной модели при технической реализации устройств вычисления МПМПИ.

Приведенные рассуждения позволили оптимально сократить число УО при вычислении МПМПИ без искажения результата. Дальнейшего сокращения УО можно достичь внесением заданной погрешности, определяемой из соотношения

$$\varepsilon = (m_{сф} - m_{сф}^*) 100 \% / m_{сф},$$

где $m_{сф}^*$ — приближенное значение вычисленного МПМПИ, полученное путем отбрасывания «младших» УО соответствующего набора $m_{сф}$. Вычислительный процесс может быть организован по алгоритму

$$m_{сф}^* = \sum_{p=K^*(\varepsilon)}^{K-1} \sum_{l=L^*(\varepsilon)}^{L-1} \|A_p S_l\| 2^{p+l}.$$

На рис. 3 представлена рабочая область УО. Справа по каждой из строк отброшены УО, соответствующие фрагментам с нулевой нормой, слева — за счет внесения допустимой погрешности, пропорциональной числу отброшенных УО. Очевидно, значение погрешности связано с порядком вычисляемого момента, размерностью апертуры, расположением входного изображения относительно начала координат, его геометрическими, энергетическими и другими характеристиками. Верхний предел погрешности может быть найден при оценке максимальных сумм элементов булевого произведения бинарных срезов

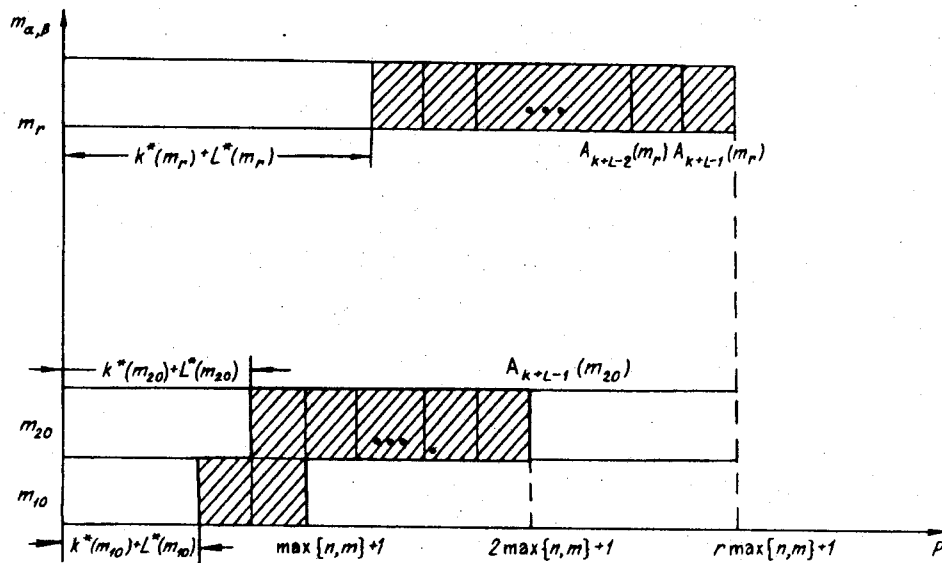


Рис. 3

входного изображения и соответствующих УО. Как следует из рис. 1, такие максимальные суммы будут формироваться для входного изображения S , проецируемого по знакопостоянной области, в зависимости от значений α и β . Естественно, в ряде случаев значение допустимой погрешности или число «старших» УО может быть уменьшено. Из (4) следует, что минимальное число УО для определения МПМПИ до r -го порядка включительно равно \tilde{V} . Исследования показывают, что достаточно хранить в оптической памяти только первый и второй начальные наборы УО, с помощью которых, выполняя определенную последовательность булевых операций, можно рекуррентным способом получать новые наборы УО для вычисления МПМПИ более высоких порядков. Другими словами, имея первый начальный набор УО для вычисления признака $m_{\alpha\beta}$ и второй начальный набор УО для матричного представления дискретизованных значений координаты i , введением оптического канала логической обработки можно получить набор для определения признаков $m_{\alpha+1, \beta}$, затем, транспонируя матрицы второго начального набора и используя первый начальный набор, вычислить набор соответственно для определения признака $m_{\alpha, \beta+1}$ и т. д. Если в качестве первого начального выбран набор, соответствующий признаку m_{10} , то первый и второй наборы просто совпадают. При необходимости в качестве второго начального набора возможно использование УО для матричного представления дискретизованных значений $|i^2|$, но в этом случае, очевидно, достигается получение не всех наборов. Возможны разные варианты комбинаций первого и второго начальных, а также уже вычисленных текущих наборов для получения последующих, соответствующих признакам более высокого порядка.

Пусть признаку $m_{\alpha\beta}$ соответствует набор $|i^\alpha j^\beta| (1 \leq i, j \leq 2^n)$: $(|A_0|, \dots, |A_{k-1}|)$, а матричному представлению дискретизованных значений координаты — i -набор: $|i| : (|B_0|, \dots, |B_{n-1}|)$, причем матрицы набора $|i|$ имеют известный вид:

$$|B_0| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 0 & 1 & 0 & \dots \end{vmatrix}, \quad |B_1| = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 1 & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 1 & 0 & \dots \end{vmatrix},$$

$$|B_2| = \begin{vmatrix} 0001\dots \\ 0001\dots \\ \dots\dots\dots \\ 0001\dots \end{vmatrix}, \dots, |B_{n-1}| = \begin{vmatrix} 00\dots 01 \\ 00\dots 01 \\ \dots\dots\dots \\ 00\dots 01 \end{vmatrix}.$$

Тогда набор УО для определения признака $m_{\alpha+1,\beta}$ может быть представлен совокупностью бинарных матриц:

$$(|C_0|, |C_1|, |C_2|, \dots, |C_{K+n-2}|, |C_{K+n-1}|),$$

причем

$$C_g = \sum_{h=h_1(g)}^{h_2(g)} (AhB_{g-h}) \oplus \Pi_{g-1}(1) \oplus \Pi_{g-2}(2), \quad C_{K+n-1} = \Pi_{K+n-2}(1), \quad (6)$$

если $0 \leq g \leq n-1$, то $h_1(g) = 0$, $h_2(g) = g$,
 если $n-1 < g \leq K-1$, то $h_1(g) = g-n+1$, $h_2(g) = g$,
 если $K-1 < g \leq n+K-2$, то $h_1(g) = K-1$, $h_2(g) = g-n+1$,

где $\Pi_i(j)$ означает формирование матрицы переноса на i -м шаге вычислений, j определяет номер старшего разряда переноса, который следует учитывать после i -го вычисления.

Для определения набора УО для признака $m_{\alpha,\beta+1}$ в (6) следует вместо матриц $|B_0|, \dots, |B_{n-1}|$ использовать транспонированные к ним бинарные матрицы $|B_0|^{Tr}, \dots, |B_{n-1}|^{Tr}$, которые определяют второй начальный набор.

Вычисление матричных коэффициентов новых наборов УО возможно с использованием известных узлов логической обработки оптоэлектронного матричного процессора, например [5, 6].

Применение УО для определения МПМПИ предполагает хранение наборов данных матриц с использованием оптической страничной памяти, реализация которой может быть выполнена методами [7].

Наряду с возможностью использования логической обработки при определении МПМПИ, оптимизация метода по объему памяти для хранения УО позволяет синтезировать производительные устройства с минимизированными аппаратными затратами.

На рис. 4 и 5 приведены графические зависимости точности вычислений $m_{\alpha\beta}$ от числа отброшенных УО (отн. ед.) и выигрыша по числу УО вычисляемого МПМПИ от допустимой погрешности ϵ (%).

Проведенные экспериментальные исследования по оптимизации числа УО при вычислении МПМПИ позволяют сделать следующие выводы:

— выигрыш η , согласно (5), по объему памяти за счет выбора начала координат в центре экрана, использования тождественных с точностью до операции транспонирования матриц УО для наборов $m_{\alpha\beta}$ и $m_{\beta\alpha}$, отбрасывания «нулевых» УО, соответствующих старшим весам для младших порядков вычисляемых моментов, не влияет на точность вычислений и достигает величины 40 %, медленно увеличиваясь с ростом размерности $N = 2^n$ матриц УО

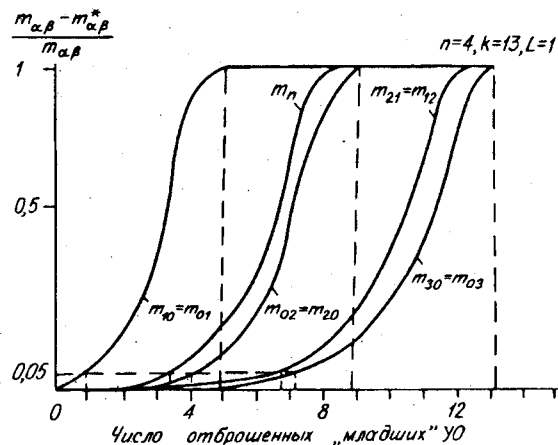


Рис. 4

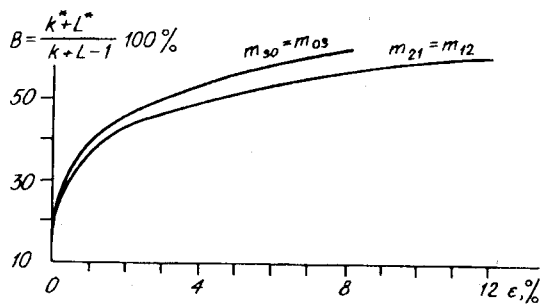


Рис. 5

(при этом не превышая 50 % для всех n);

— приведенные на рис. 4 и 5 графические зависимости показывают, как связано число «младших» отброшенных УО соответствующих наборов $m_{\alpha\beta}$ с верхним пределом допустимой погрешности. Например, отклонение значения вычисляемого признака ($n = 4, K = 13, L = 1$) на 5 % может быть обеспечено отбрасыванием одного «младшего» УО для наборов m_{10} и m_{01} , четырех «млад-

в 4 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бойко Р. В., Комаров В. А., Красиленко В. Г. Быстродействующий метод вычисления моментных признаков при обработке изображений // *Автометрия*.—1989.—№ 6.
2. Красиленко В. Г., Дубчак В. Н., Бойко Р. В. Быстродействующий метод пофрагментного интегрирования для вычисления инвариантных признаков при обработке изображений.— Киев, 1989.—Деп. в УкрНИИИТИ 01.06.89, № 1466.
3. Красиленко В. Г., Дубчак В. Н., Лицинская Л. Б. Сравнительные методы вычисления моментных признаков изображений // Тез. докл. 4-го Всесоюз. совещ. «Оптические сканирующие устройства и измерительные приборы на их основе».—Барнаул: АлПИ, 1988.— Ч. 1.
4. Дубчак В. Н., Красиленко В. Г. Фоточувствительные регистровые структуры для реализации матричных операций в оптоэлектронных процессорах // Тез. докл. 5-го Всесоюз. совещ. «Координатно-чувствительные фотоприемники и оптико-электронные устройства на их основе».—Барнаул: АлПИ, 1989.—Ч. 1.
5. Лабусов В. А., Михляев С. В., Твердохлеб П. Е. Опыт параллельного вычисления логических функций неравнозначности оптико-электронным способом // *Автометрия*.—1989.—№ 5.
6. Красиленко В. Г., Дубчак В. Н. Математическая модель построения логических устройств картинного типа на БИСПИН-фотоприемниках // *Материалы семинара «Проектирование и создание многомашинных и многопроцессорных систем реального времени»*.—М.: Знание, 1990.
7. Ванюшев Б. В., Вьюхина Н. Н., Гибин И. С. и др. Архитектура информационной системы на основе голографической памяти большой емкости // *Автометрия*.—1989.—№ 3.

Поступила в редакцию 3 апреля 1990 г.