

В заключение авторы выражают признательность В. М. Ефимову за плодотворные дискуссии при постановке экспериментов и обсуждение результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко Ю. В., Будцев В. Я., Касперович А. Н., Прокопенко В. И. Автоматизированный многоканальный регистратор оптических спектров // Автометрия.— 1987.— № 3.
2. Золотухин Ю. Н., Якушев В. Я. Привод телевизора // Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ: Тез. докл. Всесоюз. конф.— Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1979.

Поступила в редакцию 29 июня 1987 г.

УДК 621.391.268 : 007.52

С. М. БОРЗОВ, И. С. ГИБИН, И. И. РАЗУМОВА, В. Н. ХУДИК

(Новосибирск)

АНАЛИЗ ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ

В настоящее время известно большое число различных схемотехнических решений оптических корреляторов, предназначенных для решения задачи распознавания [1—5]. Достоинство таких корреляторов — высокая скорость вычисления корреляционной функции, обеспечиваемая параллельностью оптической обработки. Однако отсутствие гибкого оперативного формирования эталонного изображения (ЭИ) — быстрой смены ЭИ, его перебора по масштабу и ориентации — затрудняет их применение при решении большинства прикладных задач распознавания. Недостатком этих корреляторов является также необходимость перенормировки корреляционного поля при его пороговой обработке.

В данной работе анализируется параллельно-последовательный метод вычисления корреляционной функции, свободный от указанных недостатков [6]. Функциональные возможности этого метода естественным образом позволяют использовать априорную информацию о распознаваемых изображениях и тем самым повысить достоверность распознавания при наличии аппаратных шумов. В соответствии с этим методом распознаваемое изображение (РИ) $S_i(x, y)$ при проецировании с входной плоскости 1 (рис. 1) на плоскость накопителя 3 сдвигается как целое отклоняющим устройством 2 таким образом, что проекция начала координат плоскости 1 (точка $x = 0, y = 0$) в течение времени накопления T движется в плоскости 3 по некоторому закону $S_e(x, y) = x_e(t), y_e(t)$. Эталонное изображение $S_e(x, y)$ определяет время экспозиции РИ отклоняющим устройством в точке $(x_e(t), y_e(t))$: $\Delta t \propto S_e(x, y)$. Это означает, что для выбранной траектории движения Γ_e проекции начала координат входной

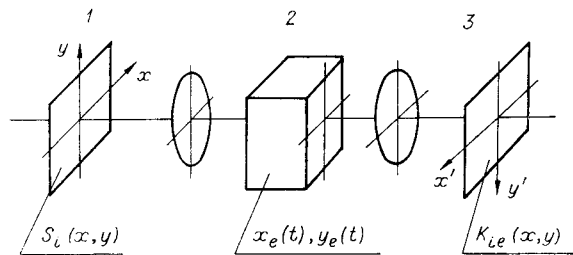


Рис. 1. Блок-схема коррелятора

ной плоскости на плоскость накопителя (рис. 2), достаточно плотно проходящей по всей площади A_e , где интенсивность ЭИ отлична от нуля, скорость движения $V = \sqrt{\dot{x}_e^2(t) + \dot{y}_e^2(t)}$ должна быть обратно пропорциональна

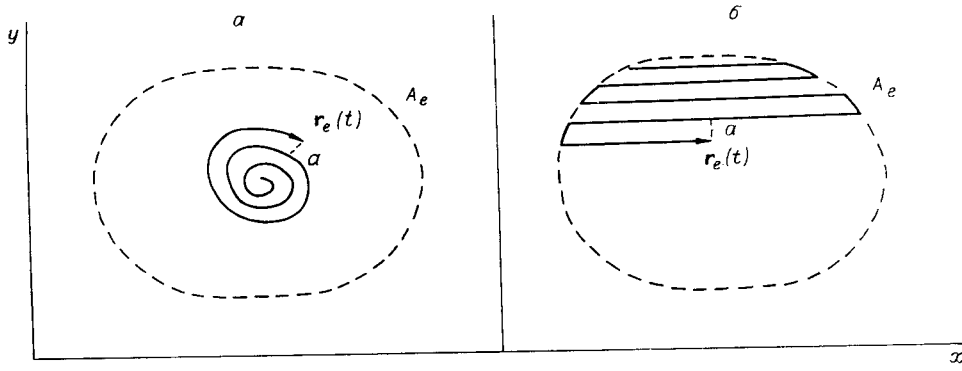


Рис. 2. Возможные траектории движения проекции РИ в плоскости накопителя: а — пример спиральной траектории, б — пример траектории, последовательно «заполняющей» площадь ЭИ

интенсивности ЭИ:

$$V(\mathbf{r}) = \kappa / (a(\mathbf{r}) S_e(\mathbf{r})), \quad \mathbf{r} = (x, y) \in \Gamma_e, \quad (1)$$

здесь $a(\mathbf{r})$ — расстояние от данной точки траектории Γ_e до предыдущего ее «витка» ($a(\mathbf{r})$ должно быть много меньше размера ЭИ). Коэффициент κ выбран таким образом, чтобы общее время экспозиции РИ равнялось T :

$$\kappa = \frac{1}{T} \int_{\Gamma_e} S_e(\mathbf{r}) a(\mathbf{r}) dl \approx \frac{1}{T} \iint S_e(x, y) dx dy. \quad (2)$$

Выполнение (1) обеспечивает приближенное равенство (с точностью до не зависящего от координат множителя κ) поля накопленного сигнала $\bar{K}_{ie}(x, y)$ корреляционному полю $K_{ie}(x, y)$:

$$\begin{aligned} \bar{K}_{ie}(x, y) &= \int_0^T S_i(x + x_e(t), y + y_e(t)) dt = \int_0^T S_i(x + x_e(t), y + y_e(t)) \frac{aV dt}{aV} \approx \\ &\approx \frac{1}{\kappa} K_{ie}(x, y); \end{aligned} \quad (3)$$

$$K_{ie}(x, y) = \iint S_i(x + x', y + y') S_e(x', y') dx' dy'.$$

Величина максимума автокорреляционного поля при вычислении его последовательно-параллельным методом, как видно из (2), (3), равна

$$\bar{K}_{\max} = T \iint S_e^2(x', y') dx' dy' / \iint S_e(x', y') dx' dy'.$$

Заметим, что при анализе бинарных изображений (с ненулевым значением интенсивности I_0) эта величина одна и та же для всего рассматриваемого класса бинарных РИ:

$$\bar{K}_{\max} = T I_0. \quad (4)$$

В этом случае устанавливаемая величина порога K_p при постоянном времени накопления T не зависит от интегральных характеристик РИ и ЭИ и не требует перенормирования при их изменении. Превышение максимального значения кросскорреляционной функции $\bar{K}_{ie}(x, y)$ фиксированной величины порога означает, что общая часть площадей с отличной от нуля интенсивностью РИ и ЭИ составляет от площади ЭИ не менее $(K_p / (T I_0)) 100\%$.

При анализе рассматриваемого метода нами были использованы тестовые контурные (бинарные) входные фотоизображения (рис. 3), поскольку оконтуривание повышает достоверность при корреляционном распознавании [7].



Рис. 3. Тестовые изображения

Для оконтуренных бинарных изображений траектория движения Γ_e , задаваемая отклоняющим устройством, совпадает с контурной линией ЭИ, а скорость движения V постоянна при постоянной толщине контура. Величина автокорреляционного максимума согласно (4) не зависит ни от толщины контура δ , ни от его длины L . Но для регистрации этого максимума необходимо, чтобы толщина контура предъявляемых изо-

бражений была больше линейных размеров одного элемента разрешения устройства накопления сигнала. Это связано с тем, что ширина главного пика автокорреляционного поля $\sim \delta$. Распознавание оконтуренных изображений основано на том, что при превышении максимума кросскорреляционной функции установленного порогового значения K_p длина общей части контуров РИ и ЭИ больше или равна $(K_p / (I_0 T)) 100\% = r\%$ длины контура ЭИ. Повышением значения порога K_p можно увеличить достоверность распознавания по этому признаку. Однако с приближением K_p к максимальному значению $K_{\max} = T I_0$ становится существенным присутствие аппаратных шумов в системе, которые могут значительно исказить результаты распознавания. Одним из способов уменьшения влияния шумов является дополнительная обработка корреляционной функции [8, 9].

Вычисление корреляционной функции параллельно-последовательным методом позволяет использовать определенную априорную информацию о классе бинарных РИ и снизить значение установленного порога, уменьшая тем самым влияние шумов на результаты распознавания. Для этого учтем следующее. Вклад в величину корреляционного максимума от различных (но равных по площади) участков изображения одинаков. Но, очевидно, не все они равноценны при распознавании изображения. Поэтому целесообразно увеличить вес характерных для данного объекта участков изображения и соответственно ослабить вклад типичных участков. Определим модифицированную таким образом корреляционную функцию бинарных изображений S_i и S_e равенством

$$K_{ie}(x, y) = \int \int S_i(x + x', y + y') S_e(x', y') \rho(x', y') dx' dy'.$$

Здесь $\rho(x', y')$ — удельный «вес» окрестности точки (x', y') ЭИ; $\rho(x, y) > 1$ в точках характерных участков; $\rho(x, y) < 1$ в точках типичных участков. При нормировке

$$\langle \rho(x, y) \rangle = \frac{1}{A_e} \int \int_{A_e} \rho(x, y) dx dy = 1 \quad (5)$$

введение функции $\rho(x, y)$ при перестройке структуры корреляционных полей не изменяет величины автокорреляционного максимума. Однако кросскорреляционные максимумы могут быть понижены подходящим выбором этой функции. Модифицированная корреляционная функция оконтуренных бинарных изображений весьма просто вычисляется последовательно-параллельным методом: время экспозиции, задаваемое в точке $(x, y) = (x_e(t), y_e(t))$, должно быть пропорционально «весу» $\rho(x, y)$ этой точки. Следовательно, скорость $V(x, y)$ обратно пропорциональна «весу»

$$V(x, y) = V_0 / \rho(x, y), \quad (x, y) \in \Gamma_e,$$

где $V_0 = L_e/T$, L_e — длина контура ЭИ. При этом величина автокорреляционного максимума по-прежнему определяется формулой (4).

Для примера рассмотрим следующую задачу и покажем, каким образом на основе априорной информации можно выбрать оптимальную весовую функцию, дающую наибольшую разницу в величинах авто- и кросскорреляционных максимумов. Пусть в классе оконтуренных бинарных изображений $\{S_i(x, y)\}$ с пренебрежимо малой толщиной контуров находится ЭИ $S_e(x, y)$. Предположим, что при несовпадении РИ из этого класса с ЭИ общая часть их контуров $S_{ie}(x, y)$ имеет максимально возможную длину * L_{ie} , которая не превышает величины $k_p L_e$. Здесь константа k_p ($k_p < 1$) одна и та же для всего класса $\{S_i(x, y)\}$. Тогда величина корреляционного максимума равна $\max K_{ie}(x, y) = (L_{ie}/L_e) T I_0$, а нижнее значение устанавливаемого порога $K_p = k_p T I_0$. В качестве характерной детали возьмем некоторую точку C контура ЭИ. Пусть относительно выбранной точки априори известно, что для любого РИ рассматриваемого класса, не совпадающего с ЭИ, она не принадлежит части контура $S_{ie}(x, y)$, которой определяется максимум кросскорреляционной функции. Тогда наибольшая длина L_{ic} общей части контуров РИ и ЭИ, содержащая точку C , строго меньше длины L_{ie} . Поэтому можно выбрать константу k_c одну и ту же для указанных РИ такую, что $L_{ic} \leq k_c L_{ie}$. Исходя из вышеприведенных соображений, увеличим «вес» точки C и равномерно уменьшим в остальных точках. Условие неизменности автокорреляционного максимума (или в других обозначениях условие (5)) можно записать в виде

$$(L_e/V_1) + T_c = T; \quad V_1 = V_0/\rho_1 \equiv L_e/T\rho_1, \quad (6)$$

где T_c — время экспозиции в точке C ; ρ_1 — «вес» контура ЭИ за вычетом точки C . Кросскорреляционный максимум при $\rho_1 < 1$ понижается; однако возникающий вследствие увеличения времени экспозиции в точке C локальный корреляционный максимум растет. Равенством их величин

$$(L_{ie}/L_e)\rho_1 T I_0 = T_c I_0 + (L_{ic}/L_e)\rho_1 T I_0 \quad (7)$$

определяется минимальное значение кросскорреляционного максимума. Из (6), (7)

$$\rho_1 = \frac{1}{1 + L_{ie}/L_e - L_{ic}/L_e} \leq \frac{1}{1 + (1 - k_c) L_{ie}/L_e},$$

а для нижнего значения K'_p устанавливаемого порога при анализе модифицированной корреляционной функции верна оценка

$$K'_p = \max \left(\frac{L_{ie}}{L_e} \rho_1 \right) T I_0 \leq K_p / (1 + (1 - k_c) k_p). \quad (8)$$

Таким образом, на основе априорной информации величину порога в данном случае можно снизить в $[1 + (1 - k_c) k_p]$ раз.

Подчеркнем, что в рассмотренном примере особенность детали связывается не с частотой ее появления в изображениях данного класса, а со спецификой ее местоположения на контуре ЭИ. Формулу (8) можно обобщить и на случай, когда в качестве характерной детали взят участок (или несколько участков) контура конечной длины.

Увеличение времени распознавания и наличие памяти в системе позволяют добиться при этой же априорной информации еще большего понижения устанавливаемого порога. Для примера вновь обратимся к рассмотренной задаче. Анализ изображений теперь проведем в два такта. В течение первого такта (длительности T) определяется корреляционная функция с весом $\rho(x, y) \equiv 1$ и затем заносится в память системы. Во втором такте (той же длительности) вычисляется модифицированная

* Эта длина не может быть увеличена более точным совмещением РИ и ЭИ с помощью параллельного переноса РИ.

корреляционная функция, для которой вес $\rho_1 = 0$ на всем контуре ЭИ за вычетом точки C с координатами (x_c, y_c) , а в этой точке время экспозиции $T_c = T$. Эта функция совпадает с РИ (параллельно смещенным по осям x, y соответственно на $-x_c, -y_c$), контур которого описывается уравнением

$$S_i(x + x_c, y + y_c) = I_0. \quad (9)$$

Путем логической обработки производится поточечное сравнение результатов первого и второго тактов и присваивается данной точке либо значение TI_0 (когда величина корреляционной функции в этой точке превышает значение порога K_p'' и в первом, и во втором тактах), либо нулевое значение (во всех остальных случаях). Такой алгоритм отбора автоматически пропускает точки автокорреляционных пиков и регистрирует РИ при его совпадении с ЭИ. Найдем нижнее значение порога K_p'' , при котором отбрасываются не совпадающие с эталоном РИ. Во избежание регистрации таких РИ значение порога K_p'' должно превышать максимальную величину корреляционной функции

$$\bar{K}_{ie}(x, y) = \int_0^T S_i(x + x_e(t), y + y_e(t)) dt \quad (10)$$

на контуре РИ (9). Так как максимум (10) при условии (9), налагаемом на координаты x, y , равен $(L_{ic}/L_e) TI_0$, то для нижнего значения порога K_p'' , обеспечивающего достоверность распознавания, верна оценка

$$K_p'' = \max \left(\frac{L_{ic}}{L_e} \right) TI_0 \leq k_c K_p. \quad (11)$$

Отметим, что правая часть (11) меньше правой части (8), и, таким образом, применение данного алгоритма распознавания дает возможность на основе априорной информации еще более понизить величину устанавливаемого порога. Приведенные рассуждения справедливы и в случае, когда в качестве характерной детали взят участок контура конечной длины. Для редко встречающейся в классе РИ формы этого участка возможно дополнительное снижение порога.

При макетировании для накопления сигнала корреляционного поля использована телевизионная камера на основе видикона. Его работа в этом режиме исследована в [10]. Время накопления T взято равным длительности одного телевизионного кадра. В качестве отклоняющего устройства применен двухкоординатный акустооптический дефлектор изображения с программным управлением [11]. Управление дефлектора обеспечивает формирование ЭИ в виде набора точек, расположенных в контуре Γ_e ЭИ. При равномерном расположении этих точек для вычисления корреляционной функции ($C\rho = 1$) время экспозиции во всех точках одинаково (при этом постоянна средняя скорость движения по контуру). Величина автокорреляционного максимума не зависит ни от

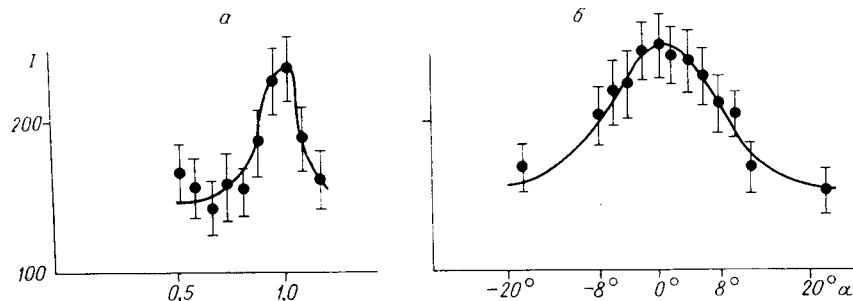


Рис. 4. Графики зависимостей величины корреляционного максимума от масштаба эталонного изображения (а) и ориентации эталонного изображения (б). Приведен разброс значений при снятии этих характеристик

толщины контура РИ, ни от числа точек в описании ЭИ:

$$\max \bar{K}_{ie}(x, y) = \varphi_V(TI_0) \quad \text{при } i \equiv e,$$

здесь $\varphi_V(\cdot)$ — нелинейная вход-выходная характеристика видикона. Программное формирование ЭИ позволяет оперативно и весьма просто найти зависимость величины автокорреляционного максимума от масштаба и ориентации ЭИ. Это обеспечивает возможность определения шага поиска по масштабу и ориентации при различных способах оконтуривания. На рис. 4 приведены графики зависимостей максимума автокорреляционной функции от масштаба и ориентации для объекта 1.3 (третье изображение из 1-й строки матрицы изображений на рис. 3).

№ п/п	1	2	3	4
1	74	82	169	71
2	95	106	90	80
3	103	82	67	65
4	156	99	92	74

Операция выделения по порогу нами проводилась для изолированных объектов (см. рис. 3). Эти оконтуренные объекты выбраны таким образом, что взаимно корреляционные связи с их бесконечно тонкими контурными аналогами (которые и реализуются блоком отклонения) не превышали 75%. В качестве эталона взято изображение объекта 1.3. После считывания корреляционного поля осуществлялась его оцифровка. В таблице приведена матрица максимальных значений корреляционных функций, полученная в результате корреляции матрицы изображений входных объектов (см. рис. 3) с объектом 1.3 в качестве эталона. Из таблицы видно, что автокорреляционная функция для одинаковых объектов 1.3 и 4.1 принимает значения 169 и 156, а максимальное значение кросскорреляционной функции составляет 106,

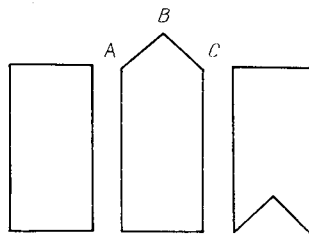


Рис. 5. Тестовые изображения S_1, S_2, S_3

следовательно, при значении порога $106 < K_p \leq 156$ происходит уверенное распознавание объектов.

Нами также экспериментально проверен двухтактный метод повышения достоверности распознавания изображений. Среди объектов (рис. 5) осуществлялся поиск изображения S_2 . Характеристика анализируемых объектов такова. Длины контуров в относительных единицах $L_1 = 6, L_2 = L_3 = 5 + \sqrt{2}$. Максимальная длина общей части контуров S_1, S_2 равна $L_{12} = 5$, контуров $S_3, S_2 - L_{32} = 4$. Максимумы корреляционных функций объектов S_1, S_2, S_3 с объектом S_2 в качестве эталона равны

$$\begin{aligned} \max K_{12}(\mathbf{r}) &= 5/(5 + \sqrt{2}) TI_0 \approx 0,78 TI_0, \quad \max K_{22}(\mathbf{r}) = \\ &= TI_0, \quad \max K_{32}(\mathbf{r}) = 4/(5 + \sqrt{2}) TI_0 \approx 0,62 TI_0. \end{aligned}$$

При реальных измерениях первого такта $\max K_{12}(\mathbf{r}) = 54, \max K_{22}(\mathbf{r}) = 86, \max K_{32}(\mathbf{r}) = 71$. Во втором такте вычислялась корреляция изображений S_1, S_2, S_3 с частью контура S_2 — ломаной (A, B, C). Максимумы соответствующих корреляционных функций таковы: $\max \bar{K}_{12}(\mathbf{r}) = 35, \max \bar{K}_{22}(\mathbf{r}) = 105, \max \bar{K}_{32}(\mathbf{r}) = 120$. Положение максимума корреляционной функции $\bar{K}_{22}(\mathbf{r})$ совпадало с положением максимума функции $K_{22}(\mathbf{r})$, а максимум функции $\bar{K}_{32}(\mathbf{r})$ смещался вниз относительно максимума $K_{32}(\mathbf{r})$. Значением функции $K_{32}(\mathbf{r})$ в точке максимума функции $\bar{K}_{32}(\mathbf{r})$ (которое равнялось 39) задается нижняя граница порога в системе при двухтактной обработке. При одноктактной обработке эта граница значительно выше и определяется величиной $\max \bar{K}_{32}(\mathbf{r}) = 71$.

ВЫВОДЫ

Функциональные возможности параллельно-последовательного метода вычисления двумерных корреляционных функций изображений позволяют естественным образом использовать априорную информацию о распознаваемых изображениях путем выбора оптимальных «весовых» функций.

Оптимизация «весовых» функций при задании эталонных изображений, обеспечиваемая выбором времени накопления и частотой квантования наиболее характерных участков эталонных изображений, увеличивает разницу между авто- и кросскорреляционными максимумами и в результате повышает надежность распознавания.

Экспериментальные исследования, выполненные на тестовых объектах, подтвердили результаты анализа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Duthie J. G., Upatnieks J., Christensen C. R., Mc Kenzie R. D. Real-time optical correlation with solid-state sources // SPIE: International Optical Computing Conference.— 1980.— V. 231.
2. Casasent D. Acoustooptic transducers in iterative optical vector-matrix processors // Appl. Opt.— 1982.— V. 21, N 10.— P. 1859.
3. Upatnieks J. Portable real-time coherent optical correlator // Appl. Opt.— 1983.— V. 22, N 48.— P. 2798.
4. Yu F. T. S., Lu X. J. Real-time optical scanning correlator // Appl. Opt.— 1984.— V. 23, N 48.— P. 3109.
5. Крупницкий Э. И. Гибридные оптико-электронные комплексы для обработки изображений // УНФ.— 1985.— Т. 23.— С. 132.
6. Гибин И. С., Разумова И. И., Тарков В. А. и др. Исследование двумерного параллельно-последовательного коррелятора изображений с интегрированием во времени // Оптическая обработка изображений: Сб. науч. статей/Под ред. С. Б. Гуревича, Г. А. Гаврилова.— Л.: Наука, 1985.
7. Ловенталь С., Бельво И. Пространственная фильтрация и голография — новое в когерентной оптике.— М.: Энергия, 1970.
8. Козик В. И., Опарин А. Н., Потатуркин О. И. Многоканальный оптико-электронный процессор с обработкой корреляционной функции // Автометрия.— 1985.— № 6.
9. Merkle F., Lösch T. Hybrid optical-digital pattern recognition // Appl. Opt.— 1984.— V. 23, N 10.— P. 1509.
10. Афанасьева О. А., Борзов С. М., Гибин И. С. и др. Восстановление изображений в итеративной оптико-электронной системе с обратной связью // Автометрия.— 1986.— № 2.
11. Тарков В. А. Двухкоординатное акустооптическое устройство отклонения изображений // Оптическая обработка изображений: Сб. науч. статей/Под ред. С. Б. Гуревича, Г. А. Гаврилова.— Л.: Наука, 1985.

Поступила в редакцию 25 февраля 1986 г.

УДК 535.317.1

И. Н. ТРОИЦКИЙ, М. С. УМАНСКИЙ

(Москва)

АНАЛИЗ ВЕЛИЧИНЫ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ТОМОГРАФИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ МЕТОДОМ РАЗЛОЖЕНИЯ В ОРТОГОНАЛЬНЫЕ РЯДЫ

При использовании для восстановления томографических изображений алгоритма, основанного на разложении в ортогональные ряды, необходимо определить число используемых членов разложения и допустимый уровень флуктуаций, сопровождающих регистрацию исходных дан-