

СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 681.3.019 : 681.327.12.001.362 : 519.688

О. И. ПОТАТУРКИН, Г. А. СТЕРНИК

(Новосибирск)

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СИНТАКСИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ИХ КОНТУРОВ

При распознавании объектов с небольшим числом элементов разложения (порядка 16×16) методы, основанные на корреляционном анализе обрабатываемых и эталонных изображений, становятся малоэффективными, поскольку при наличии даже малого шума максимальные значения авто- и кросскорреляционных функций незначительно отличаются друг от друга. Следовательно, в этом случае актуальной является задача разработки алгоритмов, основанных на других принципах формирования функции сходства, с более высокими дискриминантными свойствами. Отметим, что для увеличения быстродействия и сокращения хранимой в ЗУ информации об объектах желательно, чтобы эти методы распознавания были инвариантны к аффинным преобразованиям обрабатываемых изображений. Эти соображения обусловили цель работы, которая заключается в разработке и исследовании алгоритмов распознавания изображений, основанных на их синтаксическом описании и удовлетворяющих перечисленным выше требованиям.

Как известно [1], наибольшую информацию о форме объекта несет его контур, описываемый в общем случае двумерной функцией. Однако в целом ряде ситуаций целесообразно перейти к одномерному представлению, выбрав в качестве аргумента расстояние вдоль контура между его точками.

Определим в каждой точке контура значение угла между произвольно выбранной осью и направлением контура. За направление контура в точке будем принимать направление вектора, нормального к контуру в данной точке и ориентированного внутрь объекта (рис. 1).

Выберем на контуре длиной L произвольную точку, которую примем за начало координат. Двигаясь от нее с шагом Δl и фиксируя при этом значение угла, получим функцию $\alpha(l)$, $0 \leq l \leq L$, которая описывает контур по направлениям в каждой его точке.

Рассмотрим функцию $\omega(l) = \Delta\alpha(l)/\Delta l$, характеризующую изменение направления контура при движении по нему. Зная $\omega(l)$ и шаг Δl , можно восстановить исходный контур с точностью до параллельного переноса и поворота, а изменяя при этом Δl , можно менять масштаб изображения. Выберем на контуре объекта какую-либо характерную точку l_0 и переместим в нее начало координат. Тогда преобразованная функция $\Omega(l)$ будет иметь вид

$$\begin{aligned}\Omega(l) &= \omega(l + (L - l_0)) && \text{при } 0 \leq l \leq l_0; \\ \Omega(l) &= \omega(l - l_0) && \text{при } l_0 < l \leq L.\end{aligned}\quad (*)$$

Контур изображения, заданных на прямоугольной дискретной координатной сетке, не является гладкой кривой, а имеет вид ломаной. Аналогично цепочному коду [2] функция $\alpha(l)$ для них представляет

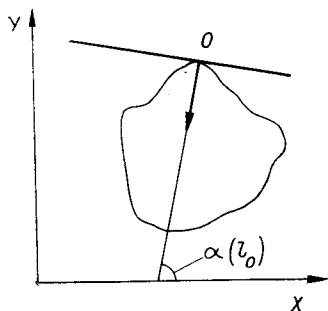


Рис. 1. Направление контура в точке

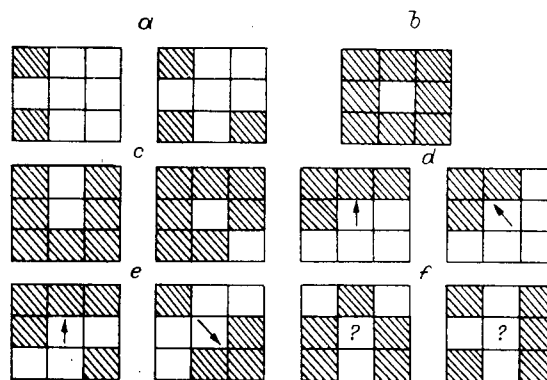


Рис. 2. Примеры анализа окрестности точек

собой набор отрезков с постоянными значениями на каждом из них, причем длины этих отрезков соответствуют длинам сторон контура. В свою очередь, функция $\omega(l)$ будет представлена набором отрезков $\omega(l) = 0$ той же величины и ненулевыми значениями углов между этими отрезками. Благодаря этому информация о контурах эталонных объектов компактно представляется в виде набора: угол — длина стороны — угол — ... — угол — длина стороны.

Пусть функция $\Omega^{(0)}(l)$, $0 \leq l \leq L_0$, соответствует эталонному объекту. Преобразовав $\Omega(l)$ таким образом, чтобы $L = L_0$, и сравнив с $\Omega^{(0)}(l)$, можно судить о сходстве контуров эталонного и распознаваемого объектов, что и было положено в основу разработанного алгоритма. Тем самым реализация данного алгоритма состоит из следующих этапов:

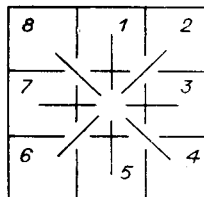
- 1) получение контура изображения;
- 2) определение направлений в точках контура;
- 3) определение функции $\alpha(l)$ путем прослеживания контура;
- 4) вычисление функции $\omega(l)$;
- 5) определение функции $\Omega(l)$ путем преобразования функции $\omega(l)$;
- 6) сравнение $\Omega(l)$ с $\Omega^{(0)}(l)$.

На первом этапе необходимо получить замкнутую и неразрывную линию контура толщиной в один элемент разложения координатной сетки, что обеспечит в дальнейшем возможность прослеживания. В данной работе такой контур формируется путем разделения всего кадра (с помощью гистограммного анализа и пороговой обработки) на объект и фон с последующим выделением из фона таких граничных точек [3], у которых хотя бы одна из четырех ближайших точек окрестности принадлежит объекту.

Для определения направлений в работе предложены два метода — масочный и табличный. В первом из них осуществляется обработка исходного полутонового изображения в точках полученного на предыдущем этапе контура четырьмя различно ориентированными масками оператора Собела [4]. С учетом знака максимального по абсолютной величине отклика в каждой точке выбирается одно из восьми возможных направлений. В табличном методе первый и второй этапы обработки совмещены и определение направлений происходит одновременно с получением контура объекта. Этот метод объединяет в себе идею применения углового кода для описания изображений [5] и метод морфологических (табличных) преобразований бинарного изображения [6]. После бинаризации исходного полутонового изображения из восьми элементов окрестности каждой точки фона в соответствии с определенным законом формируется 8-разрядное двоичное слово. Это слово указывает на адрес ячейки ЗУ, в которой находится результат анализа для соответствующей окрестности:

— центральная точка не принадлежит контуру (рис. 2, a — c);

Рис. 3. Номера направлений 1—8



— центральная точка принадлежит контуру и имеет соответствующее направление (рис. 2, d, e);

— центральная точка принадлежит контуру, но определенного направления не имеет (рис. 2, f).

При этом производится исключение из фона «выколотых» точек (см. рис. 2, b) и сокращение незамкнутых линий (см. рис. 2, c), а процедура определения направлений контура учитывает появление шумовых составляющих на бинаризованном изображении (см. рис. 2, e). Необходимо отметить, что направление, полученное первым методом, соответствует ориентации перепада яркости исходного изображения в точке контура, а при использовании второго метода оно зависит только от формы бинаризованного объекта.

Полученная информация о направлениях контура (рис. 3) представляется в цифровом виде и используется для осуществления третьего этапа (прослеживания) по следующему алгоритму:

- 1) выбрать точку контура;
- 2) установить в точке признак того, что она прослежена;
- 3) занести значение направления контура в дискретную последовательность α_i , которая описывает функцию $\alpha(l)$, где $i = 1 \div N$, а N — число точек в контуре;
- 4) выбрать по значению направления контура в этой точке окрестность из трех элементов, где будет проводиться поиск продолжения линии контура;
- 5) найти в окрестности точку, принадлежащую контуру;
- 6) перейти к шагу 2, если в этой точке признак не установлен, в противном случае контур считать прослеженным.

Отметим, что при неопределенном направлении контура в точке или при отсутствии в выбранной окрестности продолжения контура этой точке присваивается направление, которое соответствовало предыдущей точке. В случае, когда продолжение контура не удается найти (контур не замкнут, наличествуют отдельные точки), прослеженный участок считается шумом. Он исключается из изображения, и происходит возврат к шагу 1.

Полученная таким образом последовательность значений α_i используется на четвертом этапе для определения последовательности ω_i согласно

$$\omega_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i \quad \text{для } i = 1 \div N - 1, \quad \omega_N = \alpha_1 - \alpha_N.$$

При этом зануляются пары соседних одинаковых по абсолютной величине и различных по знаку значений ω_i , которые соответствуют флуктуациям направлений контура.

За начальную точку контура принимается вторая точка максимальной стороны объекта. В соответствии с (1) производится преобразование:

$$\begin{aligned} \Omega_i &= \omega_{i+N-k} & \text{для } 1 \leq i \leq k; \\ \Omega_i &= \omega_{i-k} & \text{для } k < i \leq N, \end{aligned}$$

где k — номер выбранной начальной точки последовательности.

Для согласования масштабов число элементов в каждой нулевой группе последовательности Ω_i (стороне контура) умножается на коэффициент пропорциональности, который равен отношению количества элементов в максимальной стороне эталонного изображения к количеству элементов в максимальной стороне распознаваемого изображения.

Последовательность $\Omega_i^{(0)}$, описывающая эталонное изображение, представлена в операционной памяти ЭВМ в виде набора пар чисел: $\beta_j^{(0)}, n_j^{(0)}$, $j = 1 \div M_0$, где $n_j^{(0)}$ — номер элемента последовательности $\Omega_i^{(0)}$, которому соответствует угол $\beta_j^{(0)} = \Omega_{n_j^{(0)}}^{(0)}$; M_0 — число углов (и, естественно,

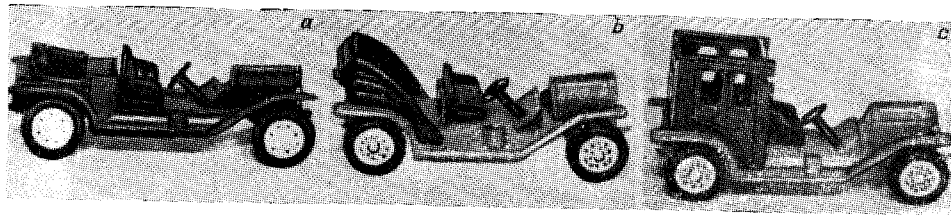


Рис. 4. Распознаваемые объекты

сторон) в контуре. Таким же образом $(\beta_j, n_j, j = 1 \div M)$ представляется последовательность Ω_i , описывающая распознаваемое изображение.

Для первоначальной оценки соответствия между эталонным и распознаваемым изображением производится сопоставление числа углов M_0 и числа точек N_0 в эталоне с аналогичными характеристиками преобразованного распознаваемого изображения M и N . Поскольку при $M \neq N_0$ или $|N - N_0| > 3$ (за счет погрешности округления при масштабировании) контуры однозначно принадлежат различным объектам, процесс распознавания на этом заканчивается. В противном случае для дальнейшего анализа вычисляется решающая функция

$$R = \sum_{j=1}^{M_0} R_j,$$

где $R_j = \min(R_j^-, R_j^0, R_j^+)$, $R_j^- = |\beta_j - \beta_j^{(0)}| + |n_j - 1 - n_j^{(0)}|$, $R_j^0 = |\beta_j - \beta_j^{(0)}| + |n_j - n_j^{(0)}|$, $R_j^+ = |\beta_j - \beta_j^{(0)}| + |n_j + 1 - n_j^{(0)}|$, которая определяет идентичность распознаваемого и эталонного изображений при $R = 0$. Смысл этой функции заключается в том, что контур распознаваемого изображения должен иметь такой же набор углов, что и эталонный, а длины соответствующих сторон не должны отличаться более чем на ± 1 элемент (за счет погрешности округления при масштабировании). Последнее условие определяет допуск искажений контура входного изображения. Необходимость выбора минимального из трех значений решающей функции обусловлена тем, что при согласовании масштабов по размерам наибольших сторон могут возникнуть ошибки округления, смещающие часть последовательности Ω_i на один элемент вправо или влево.

Для оценки работоспособности изложенных выше алгоритмов проведены экспериментальные исследования по распознаванию трех объектов I, II, III (рис. 4, a — c соответственно), изображения которых представлены на прямоугольной сетке размерностью 32×32 элемента с 64 градациями яркости (рис. 5, a — c). В качестве распознаваемых также использовались изображения объекта I, искаженные шумом с распределением Гаусса. При этом характеристикой величины шума служило отношение P/H , где P — высота перепада яркости между объектом и фоном; H — максимальное значение шума.

Обработка осуществлялась на моделирующем стенде с использованием пакета прикладных программ. Стенд включал ТВ-процессор ввода в ЭВМ произвольного по местоположению фрагмента телевизионного кадра, микроЭВМ с периферийными устройствами. Математическое обеспечение состояло из программ, реализующих масочный и табличный методы согласно изложенным выше алгоритмам, программы корреляционного анализа с предварительным оконтуриванием, а также программы искажения изображений случайным шумом.

В результате выполнения первого этапа обработки определены контуры объектов (рис. 6, a — c, при оптимальных значениях порога $h = 35, 39, 34$ соответственно). Такие контуры необходимы при определении направлений масочным методом. Что касается табличного метода, то в нем, как отмечалось выше, процедуры получения контура и определения направлений совмещены.



Рис. 5. Изображения объектов

На рис. 7, 8 видно, что на форму контуров существенно влияет отличие значений порога бинаризации от оптимального (см. рис. 6, *a*), т. е. геометрия контура оказывается неустойчивой к такому параметру. Поэтому максимальные нормированные значения автокорреляционных функций в этом случае могут значительно отличаться от I и даже быть меньше кросс-корреляционных отсчетов близких объектов. Предлагаемая в работе система признаков, основанная на информации о направлении контуров, оказывается существенно устойчивей (по сравнению с формой контуров) к таким факторам, как порог бинаризации и шум на изображении. Следует отметить, что при реализации масочного метода (см. рис. 7) отклонения полученной линии контура от действительной не влияют на направления благодаря тому, что в данном случае учитывается действительная ориентация перепада яркости в выделенных точках. Табличный же метод (см. рис. 8) просто не чувствителен к этим отклонениям. Игнорируются и небольшие изгибы линий контура. Так, если судить по направлениям, полученным табличным методом, контур объекта I представляет собой прямоугольник.

В результате экспериментальных исследований определено, что повороты объектов в плоскости изображения, не превышающие 20° , не влияют на процесс распознавания. То же происходит и при поворотах $90 \pm 20^\circ$, $180 \pm 20^\circ$, $270 \pm 20^\circ$. В других случаях возникают ошибки определения направлений контура, связанные с погрешностью аппроксимации контуров на прямоугольной сетке.

Для сравнения дискриминантных свойств и оценки влияния шума на процесс распознавания корреляционным (на основе анализа формы контуров) и предложенными (на основе анализа направлений конту-

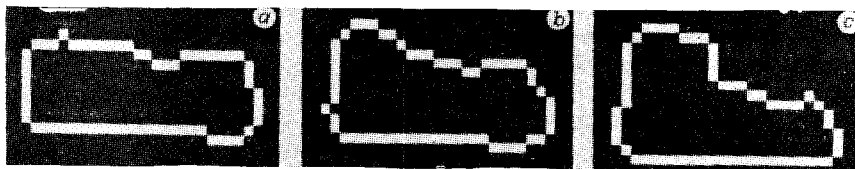
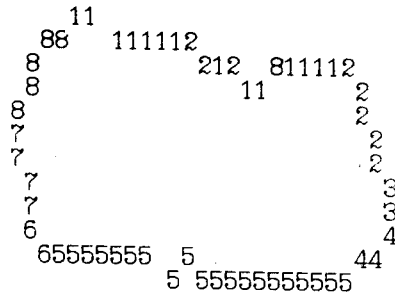
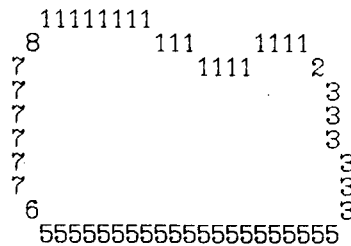


Рис. 6. Контуров объектов



$\alpha_i = 111111122121181111222223344455555555555555555555555555566777788888$
 $w_i = 10000001041404100010000101001000060000000000000010100010000$
 $\Omega_i = 0000000000000000010100010000100000010001000000100001010010$

Рис. 7. Преобразования контура объекта *a*, полученного масочным методом при пороге бинаризации $h = 44$



$\alpha_i = 1111111111111111111123333335555555555555555555555567777778$
 $w_i = 10000000000000000001100000200000000000000000000000011000001$
 $\Omega_i = 00000000000000000001100000110000000000000000000000110000020$

Рис. 8. Преобразования контура объекта *a*, полученного табличным методом при пороге бинаризации $h = 25$

ров) методами были определены экспериментальные значения решающих функций и в том и в другом случае (рис. 9, 10). По оси абсцисс отложены принятые при оконтуривании распознаваемого изображения пороги бинаризации, а по оси ординат — коэффициенты корреляции между эталонным и полученным контурами, которые вычислялись как процентное отношение числа совпавших точек контуров к общему числу точек в контуре объекта. Там же обозначены интервалы, в которых согласно масочному (сплошная линия) и табличному (штриховая линия) методам устанавливается полное соответствие между распознаваемыми и эталонными изображениями. Отсюда видно, что значения решающей функции, полученные предложенными методами, по сравнению с корреляционными в меньшей степени зависят от диапазона выбранного порога, что обусловлено, с одной стороны, его существенным влиянием на форму контура, а с другой — стабильностью получаемых направлений, т. е. предложенные методы обеспечивают более достоверное распознавание и в том случае, когда авто- и кросскорреляционные отсчеты близки друг к другу. При этом табличный метод менее чувствителен к шуму входного изображения, однако по сравнению с масочным методом он характеризуется большей вероятностью ложной тревоги.

Проводя сравнительную оценку вычислительных затрат, можно сказать, что среднее время полного цикла обработки фрагмента изображения с размерами 32×32 элементом предложенными методами примерно в 3 раза меньше времени, необходимого для получения коэффициента корреляции между контурами при аналогичном способе окон-

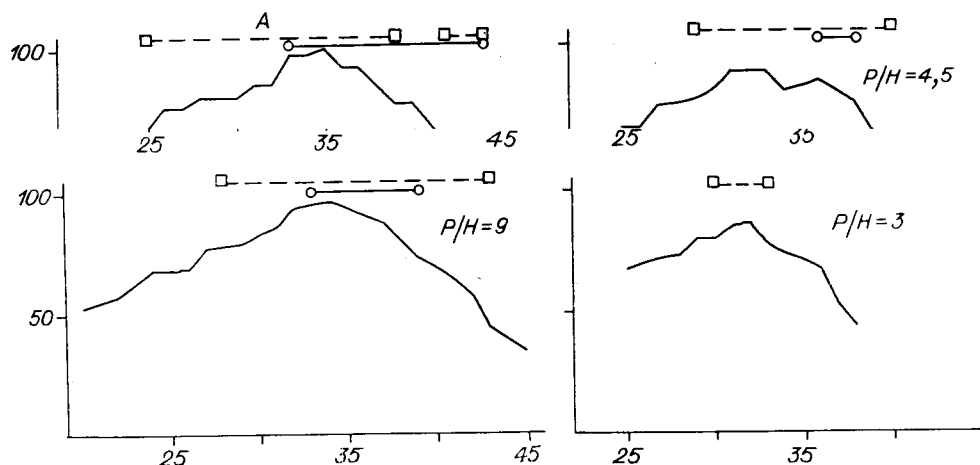


Рис. 9. Значения решающих функций для объекта *a* при различном уровне шума и эталона *a* (*A* — без шума)

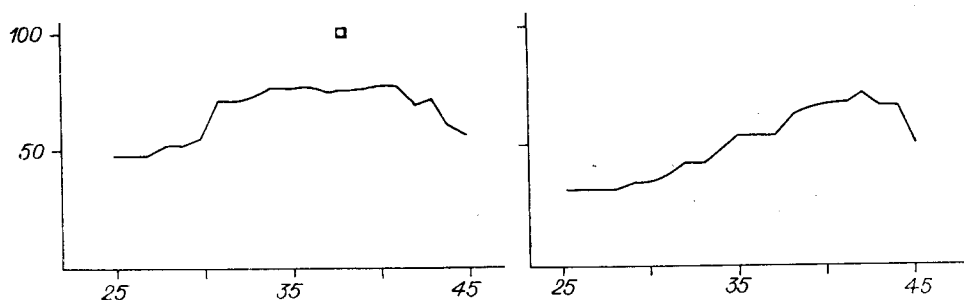


Рис. 10. Значения корреляционной функции для объектов *b* и *c* при эталоне *a*

турирования. Эффективность данных методов дополнительно повышается за счет инвариантности к масштабу и повороту распознаваемого изображения.

Таким образом, экспериментальные исследования показали, что предложенный алгоритм обладает следующими свойствами: высокими дискриминантными свойствами функции сходства; устойчивостью к локальным искажениям контуров обрабатываемых изображений, которые обусловлены входным шумом; инвариантностью к масштабным изменениям объектов; частичной инвариантностью к ориентации объектов в плоскости изображения (в пределах $\pm 20^\circ$); компактным представлением информации об эталонных объектах; относительно высоким быстродействием.

К недостаткам метода можно отнести необходимость выбора порога при разделении изображения на объект и фон, а также то, что полученный контур прослеживается не во всех случаях. Второй недостаток может быть устранен путем учета в процессе прослеживания возможности раздвоения и разрыва линии контура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко Г. И. Голографическое опознавание образов.— М.: Сов. радио, 1977.
2. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен.— М.: Мир, 1976.
3. Брюхомицкий Ю. А., Галуев Г. А. Об одном методе определения контура изображения // Электрон. моделирование.— 1983.— 11, № 4.

4. Багут П. А., Колмогоров Г. С. Сегментация изображений: методы выделения границ областей // Зарубеж. радиоэлектрон.— 1987.— № 10.
5. Ковяевский В. А., Абрамов В. А. Процедуры выделения контуров плоских изображений на основе углового кода // Управление сложными техническими системами: Межвуз. науч. сб.— 1981.— № 4.
6. Косых В. П., Пустовских А. И., Тарасов Е. В., Яковенко Н. С. Морфологический процессор // Автометрия.— 1984.— № 4.

Поступила в редакцию 21 февраля 1990 г.

УДК 681.324

А. В. БЕРЕЗОВСКИЙ, В. А. КОЗЛАЧКОВ, И. И. КОРШЕВЕР,
С. А. ПАВЛОВ, К. В. ТЕСЛЕНКО, М. Ю. ШАДРИН

(Новосибирск)

ПЕРИФЕРИЙНЫЙ ПРОЦЕССОР ДЛЯ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

Введение. СП-12 — периферийный процессор для цифровой обработки сигналов и изображений, представляющий собой дальнейшую модификацию ранее описанного процессора СП-8 [1]. Оба эти процессора ориентированы на включение в стандартную систему, базирующуюся на шине МПИ (*Q-bus*), и поддерживаются соответствующими операционными системами с помощью специальных сопрягающих программ.

Совершенствование процессора СП-8 проводилось в следующих направлениях:

1. Повышение арифметических возможностей процессора. В этих целях в новый процессор введены дополнительные аппаратные элементы:

второе 16-разрядное АЛУ; оба АЛУ могут работать отдельно (именно в этом случае производительность процессора достигает 12 млн опер./с на тактовой частоте 4 МГц) или как единое 32-разрядное целочисленное устройство;

аппаратный одноктактный сдвигатель, позволяющий эффективно осуществлять взаимный переход чисел от представления в формате с плавающей запятой к представлению в формате с фиксированной запятой.

2. Расширение (до 20 разрядов) адресного пространства основной памяти данных (прежде всего, в целях повышения эффективности работы с изображениями). Это обеспечивается расширенным до 20 разрядов адресным процессором и третьей платой, расширяющей объем памяти данных от 128 до 768 К 16-разрядных слов. Введен также аппаратный контроль четности и микропрерывания по результатам этого контроля.

3. Приняты меры для упрощения процедуры отладки программ; с этой целью введен режим ROM-симуляции, при котором в процессе отладки генерирование микрокодов осуществляется из основной памяти данных.

4. С помощью аппаратных и микропрограммных расширений ускорена работа канала прямого доступа к памяти (КПД).

5. Повышена скорость взаимодействия процессора внешней ЭВМ на системном уровне, для чего предусмотрена поддерживаемая микропрограммно начальная загрузка блока параметров по КПД.

6. Расширена до 6 Кслов табличная память тригонометрических функций.

Функциональное описание процессора [2]. На рис. 1 изображена блок-схема процессора СП-12 (интерфейсная часть взаимодействия с