

Необходимо отметить, что можно дополнительно уменьшить длительность переходного процесса, а следовательно, и динамическую погрешность, если емкость ФД в предлагаемом новом способе перезаряжать до напряжения, соответствующего фототоку $i_{cн}$, несколько большему, чем $i_{c\ min}$. С учетом (4) $i_{cн}$ определяем из условия

$$t_{\max 0}^{\downarrow} = t_{*}^{\downarrow}, \quad (5)$$

где $t_{\max 0}^{\downarrow}$ — длительность переходного процесса, получаемая из (2) при $i_c = i_c^*$; $i_{c\ min} = i_{cн}$; t_{*}^{\downarrow} — длительность переходного процесса, определяемая из (4) при $i_c = i_{cн}$. Из (5) получаем

$$i_{cн} = 1,458 i_{c\ min} (1 - 0,113 \sqrt{\ln(1/B)}). \quad (6)$$

Из (2), (4) с учетом (3), (6) находим динамические погрешности B_1, B_2 соответственно для предлагаемого и обычного ФПУ при одном и том же интервале регистрации (одной и той же длительности переходного процесса).

Приведем результаты расчета $B_1, B_2, \Theta = B_2/B_1$ в зависимости от длительности интервала регистрации t_p ($C = 50$ пФ, $I_N = 2 \times 10^{-11}$ А, $i_{c\ max} = 2$ мкА, $i_{c\ min} = 0,2$ нА):

t_p , мс	3,5	6,5	9,3	12,2	15
B_1	0,45	0,065	0,032	0,016	0,009
B_2	0,6	0,37	0,24	0,15	0,1
Θ	4	5,79	7,5	9,4	11,1

Предлагаемый способ регистрации излучения фотодиодом обеспечивает существенное снижение динамических погрешностей ФПУ. Наиболее эффективны в применении ФПУ такого типа при использовании ФД с малыми собственными емкостями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов Е. И. Фотоприемные устройства на основе фотодиодов и их применение.— М.: ЦНИИ «Электроника», 1986. (Обзоры по электронной технике. Сер. 4. Электроракуумные и газоразрядные приборы.— Вып. 1.)
2. А. с. 1122899 СССР. Способ регистрации излучения фотодиодом и устройство для его осуществления/Е. И. Чернов.— Оpubл. 07.11.84, Бюл. № 41.

Поступило в редакцию 12 апреля 1988 г.

УДК 681.3.019

В. А. ГОРЕНКИН

(Новосибирск)

РЕАЛИЗАЦИЯ ОПЕРАТОРА ХЮККЕЛЯ

Введение. Локальный оператор для распознавания краев и линий на цифровых изображениях предложен Хюккелем в [1]. В литературе высказывалось мнение, что его практическому использованию препятствуют чрезмерные вычислительные затраты, хотя конкретные данные о временных характеристиках реализаций оператора не приводились.

В настоящей статье рассмотрены некоторые методы снижения вычислительной сложности программ, приведены экспериментальные данные выделения краев и линий на основе оператора Хюккеля.

Краткое описание оператора. Метод Хюккеля основан на разложении фрагмента изображения в ряд Фурье по ограниченному набору функций и вычислении по коэффициентам разложения параметров модели, наилучшим образом (в смысле минимума среднеквадратичной ошибки) аппроксимирующей данный фрагмент.

В операторе используется набор из 9 базисных функций, заданных на непрерывном круглом окне единичного радиуса. Аппроксимирующая модель оператора задается тремя областями с различной яркостью, разделенными двумя параллельными границами. Край, линия и нерезкий край являются частными случаями этой модели.

Фрагмент изображения, попадающий в окно оператора, описывается следующими параметрами: расстояние от центра окна до центра средней области ($|R|$); направляющие косинусы \bar{R} ; яркость темной крайней области; величина перепада яркости между крайними областями; «объем» (ширина \times контраст) средней области («линии»); величина нерезкости края (если «объем» равен нулю).

Помимо этого, оценивается отношение сигнал/шум.

Реализация оператора. Оператор реализован в виде набора подпрограмм, написанных на Фортране.

Расчет таблиц базисных функций. Для обработки дискретного цифрового изображения базисные функции задаются в виде таблиц, рассчитанных для конкретного размера окна методом численного интегрирования по площади с уровнем дискретизации — 100 точек на элемент таблицы.

Радиус окна подбирался для максимально точного выполнения условия ортогональности базисных функций $H(1)$ и $H(8)$ [1]. Подготовлены таблицы для окон различных размеров, отображаемых на площадки величиной от 7×7 до 17×17 элементов изображения. Симметрия функций позволяет хранить менее одной четверти элементов таблиц.

Таблицы состоят из данных вещественного типа. Пытки использования целочисленных таблиц не дали преимуществ в скорости выполнения свертки на мини-ЭВМ «Электроника 79».

Подпрограммы свертки. Для сокращения вычислительных затрат существенно использовалась симметрия системы базисных функций. Ее учет позволяет рассчитывать суммы и разности значений яркости симметричных относительно центра элементов изображения, а затем использовать полученные массивы для вычисления свертки в соответствии с отмеченной выше симметрией. Таким образом удастся сократить как общее количество операций, так и относительную долю операций с плавающей запятой. Время вычисления свертки уменьшено почти в 4 раза по сравнению с прямым методом.

При данном подходе максимальный выигрыш по времени получается для окон оператора, расположенных на площадках с четным числом элементов. Привязка результата при работе с такими окнами не вызывает затруднений, так как все параметры аппроксимирующей модели представлены вещественными (а не целыми) числами.

Расчет аппроксимирующей модели. Основой для разработки послужил алгоритм, описанный в [1]. Некоторые затруднения были связаны со случаями неустойчивости при обработке бинарных изображений края; они были преодолены введением ограничения на максимальное расстояние от центра окна до границ разделов (в том случае, если по расчетам они находятся внутри окна) и соответствующим подбором радиусов окон.

Необходимость в операциях с комплексными величинами при обработке изображений по данному алгоритму возникает относительно редко, поэтому в программу была введена ветвь, использующая только операции над действительными переменными. Частичное исключение операций над комплексными числами сократило среднее время расчета модели более чем в 3 раза.

Экспериментальные результаты. Методика, основанная на использовании оператора Хюккеля с окнами различных размеров, исследовалась при обработке модельных изображений (без шумов и с аддитивным гауссовым шумом), а также на реальных цифровых изображениях с 256 градациями яркости.

Экспериментальные результаты показали, что таким образом удается эффективно выделять и классифицировать перепады яркости различных типов. В качестве детектора края оператор Хюккеля превосходит другие локальные операторы [2—5] по точности обработки при наличии шума, уступая им только в скорости работы. Оператор позволяет выделять и классифицировать линии различной ширины по направлению, «объему» и яркости по отношению к фону, определять середину широких линий, восстанавливать мелкие разрывы и «пунктирные» линии.

При обработке модельных изображений без шума погрешность определения угла не превышала 0,03 рад, погрешность определения положения центра средней области — 0,1 дискрет. Параметр, описывающий нерезкость края, позволяет отличить «склон» от края.

При обработке полутонового изображения размером 256×256 элементов оператором с окном диаметром 9 элементов (2075 обращений к программе) временные затраты распределились следующим образом (с):

Позиционирование и чтение	— 1,2
Свертка	— 6,2
Расчет модели	— 3,8
Отображение результата	— 0,4
Общее время	— 11,6

Обработка производилась на комплексе обработки изображений с управляющей ЭВМ «Электроника 79»

ВЫВОДЫ

Реализованный вариант оператора Хюккеля для распознавания краев и линий обладает высокой точностью определения параметров аппроксимирующей модели на полутоновом и бинарном изображениях.

Среди методов выделения линий оператор не имеет аналогов. Возможность непосредственного определения отрезков линий оператором и его относительно высокая информативность позволяют значительно упростить дальнейший анализ изображения. Существуют возможности сокращения времени выполнения подпрограмм оператора с помощью программных и специализированных аппаратных средств.

Автор выражает благодарность В. А. Иванову за постановку задачи и помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hueckel M. N. A local visual operator which recognizes edges and lines // J. of ACM.— 1973.— 20, N 4.— P. 634.
2. Hueckel M. N. An operator which locates edges in digitized pictures // J. of ACM.— 1974.— 18, N 1.— P. 113.
3. Меро Л., Васси З. Упрощенный и ускоренный вариант оператора Хюккеля для оптимального нахождения перепада на изображении // Тр. IV Междунар. объединен. конф. по искусственному интеллекту.— Т. 8: Анализ визуальной информации.— М., 1975.

УДК 681.3.06 : 681.3.019

И. Г. ХОЛЬШИН

(Новосибирск)

ПАКЕТ ПРОГРАММ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ СПЕКТРОЗОНАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

В статье рассмотрен пакет прикладных программ CLUST, реализованный на языке Фортран 4⁺ для обработки и анализа цифровых растровых полутоновых спектрально-зональных (цветных) изображений, размещаемых либо в плоскостях (листах) видеопамати, либо в соответствии организованных файлах данных, если видеопамать отсутствует.

Состав программных средств. Прикладные программы, содержащиеся в пакете, преимущественно ориентированы на классификацию изображений и позволяют выполнять следующие процедуры:

предварительная обработка изображений (коррекция с целью ослабления влияния условий съемки, линейная и медианная фильтрация, контрастирование, изменение динамического диапазона яркости, морфологические операции и т. д.);

формирование признаков;

кластерный анализ изображений;

дискриминантный анализ изображений;

сервисное обеспечение (выделение участков изображения, пересылка изображений с масштабированием, поворот и инвертирование, построение гистограмм и срезов, маскирование, выделение отдельных кластеров или классов, переименовка кластеров по средней яркости, формирование границ и определение их координат и т. д.).

Кратко рассмотрим некоторые из этих процедур.

Формирование признаков изображений. При обработке и анализе спектрально-зональных изображений, кроме исходных яркостных спектральных характеристик, обычно используются разнообразные вторичные признаки [1]. Для уменьшения описания размерности спектрально-зонального изображения формируются либо признаки спектрального контраста, либо их линейные комбинации вида $Y = \bar{R} \times X$. Матрица преобразования \bar{R} выбирается исходя из статистической независимости Y (метод главных компонент), т. е. преобразование определяется собственными векторами ковариационной матрицы X .

Наиболее сложными и в то же время самыми информативными являются текстурные характеристики, позволяющие разделять объекты, отличающиеся пространственной структурой полей яркости. Поэтому значительная часть пакета CLUST предназначена для формирования разнообразных текстурных признаков. Общий подход состоит в построении функции пространственного распределения для элементарного участка (окна) изображения и определения интегральных количественных характеристик для центрального элемента этого участка.

Программно реализовано формирование ряда текстурных параметров, в частности, вычисление в скользящем окне размером $(2W + 1) \times (2W + 1)$ центральных моментов n -го порядка ($n = 1 \dots 4$), градиентов Робертса, Собела, Уоллиса или Кирша, а также признаков, характеризующих относительной длиной серий, шириной автокорреляционной функции, числом перепадов яркости по заданному порогу (признак Розенфельда и Троя) [2], кривизной поверхности в скользящем окне. Возможно также в качестве характеристики текстуры использовать фрактальную размерность, которая определяется коэффициентом линейной зависимости средних перепадов яркости элементов изображения от расстояния между элементами в скользящем окне.