

А. Н. Касперович

(Новосибирск)

**ФИЛЬТРАЦИЯ, ОБНАРУЖЕНИЕ И ЛОКАЛИЗАЦИЯ
МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ КРУГОВОМ
СУБПИКСЕЛЬНОМ СКАНИРОВАНИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ***

Рассматриваются особенности фильтрации фона на фотоматричных изображениях, полученных при их субпиксельном круговом сканировании. Описывается процедура одномерной фильтрации фона по круговым траекториям сканирования.

Введение. Обнаружение и локализация (определение координат) мало-размерных объектов является важной задачей обработки изображений в ряде приложений.

В настоящее время все чаще для получения изображений используются фотоматричные устройства, однако их размерность, особенно в инфракрасном диапазоне, недостаточна. Для улучшения качества фотоматричных изображений применяется субпиксельное сканирование. Такое сканирование, как следует из [1], позволяет повысить пространственное разрешение изображения, уменьшить влияние зазоров между элементами фотоматрицы на эффективность обнаружения. Для упрощения процесса сканирования предложено выполнять круговое субпиксельное сканирование, при котором все элементы фотоприемной матрицы передвигаются одновременно относительно изображения сцены по окружностям одного радиуса.

Главным препятствием, возникающим при выполнении фильтрации, является существенная неравномерность отсчетов, полученных при круговом субпиксельном сканировании. Перевод же их на равномерную сетку сопровождается увеличением шума и требует значительных вычислительных затрат.

Цель настоящего исследования – разработка методов фильтрации фона (содержащего в том числе крупногабаритные объекты) непосредственно по отсчетам, полученным при круговом сканировании, не прибегая к переводу этих отсчетов на равномерную решетку и к реставрации полученных изображений.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 00-15-99092).

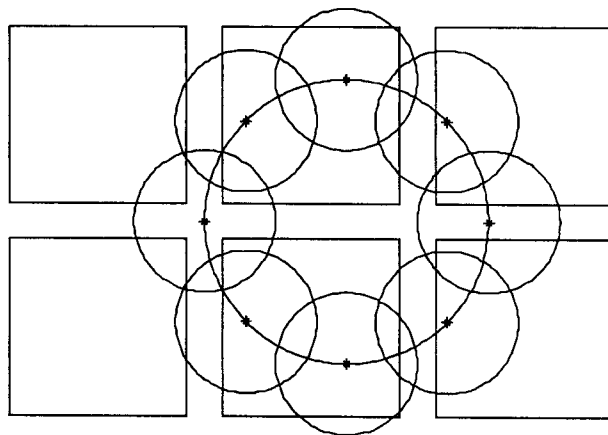


Рис. 1. Неподвижная фотоматрица и траектория движущегося малоразмерного объекта

ражений, а также анализ влияния параметров сканирования на результаты обработки. Это важно, поскольку в [2] показано, что обнаружение малоразмерных объектов при условии отсутствия фона может успешно выполняться непосредственно для неравномерных отсчетов.

Параметры фона обычно известны и задаются его корреляционной функцией.

На рис. 1 представлена фотоматрица, состоящая из квадратных фотоприемников, на которую наложена траектория движения малогабаритного объекта при круговом сканировании. Кружками обозначено положение центра малоразмерного объекта на разных кадрах. На рис. 2 представлена фотоматрица, движущаяся относительно неподвижного изображения.

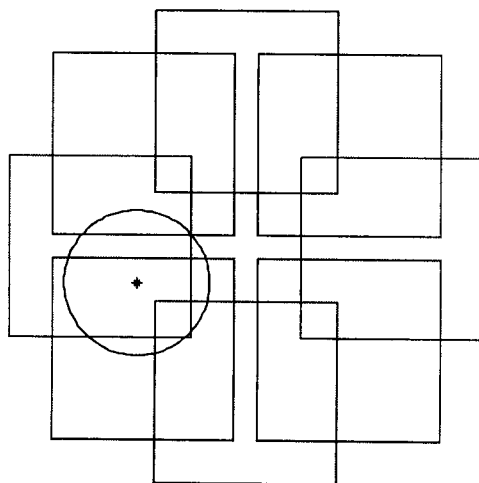


Рис. 2. Неподвижный малоразмерный объект и траектория движения элементов фотоматрицы относительно этого объекта

Анализируемое изображение представляет собой совокупность некоторого фона и наложенного на него изображения обнаруживаемого точечного объекта – пятна рассеивания, поэтому получаемые фотоматричные отсчеты определяются как полезным сигналом, так и фоном. Как правило, известен интервал корреляции экспоненциальной автокорреляционной функции фона.

Пусть фотоматрица, с помощью которой считывается изображение, имеет размерность $N \times N$ элементов. При круговом сканировании будет получено F кадров и общее число полученных отсчетов составит $F \times N \times N$. Кадр – это снимок сцены. По сути, каждый снимок, содержащий $N \times N$ отсчетов, – отклик системы на малоразмерный объект, находящийся в некоторой точке круговой траектории.

Фон на изображении (при поиске малоразмерных объектов) может быть представлен как некоторый нежелательный шум. Отсчеты фотоприемников фотоматрицы содержат мультипликативный шум, ухудшающий качество обнаружения. Кроме того, поскольку пятно рассеивания покрывает фотоприемный элемент не полностью (особенно на углах фотоприемников), отсчет соответствует только части энергии пятна, что можно интерпретировать как некий добавочный шум.

Прежде чем переходить к исследованию фильтрации фона, обратим внимание на то, что изображение сцены можно представить в виде

$$U = \delta * z_a * z_n, \quad (1)$$

где δ – дельта-функция, описывающая точечный объект; z_a – аппаратная функция оптической системы; z_n – импульсная характеристика фотоприемного элемента, который может быть представлен как скользящий интегратор (со сбросом).

Аппаратная функция – отклик оптической системы субпиксельного сканирования на точечный объект, пятно рассеивания – определяется длиной волны излучения, используемого при получении изображения, размером диафрагмы и фокусным расстоянием оптической системы. При круглой диафрагме пятно имеет круговую симметрию, а при квадратной – крестообразную. Заметим, что квадратная диафрагма могла бы упростить обработку – сделать независимой по координатам x и y .

Отклик оптической системы на точечный объект (пятно) при круглой диафрагме описывается кривой Эйри. Спектр этой кривой определяется выражением [3]:

$$h(\chi) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[\arccos \frac{\chi}{\chi_{\max}} - \frac{\chi}{\chi_{\max}} \sqrt{1 - \frac{\chi^2}{\chi_{\max}^2}} \right] & \text{при } |\chi| \leq \chi_{\max}; \\ 0 & \text{при } |\chi| \geq \chi_{\max}, \end{cases} \quad (2)$$

где χ – пространственная частота; $\chi_{\max} = d / \lambda f'$.

Для проведения численных экспериментов обычно кривая Эйри аппроксимируется гауссоидой или (что лучше) косинусоидой в четвертой степени. В последнем случае аппроксимируемый размер пятна является конечным и удобным для анализа, упрощаются аналитические выкладки и обеспечивается более ясное понимание анализируемой ситуации. Исходя из этого аппа-

ратную функцию оптической системы субпиксельного сканирования опишем выражением

$$z_a = \frac{8}{3c} \cos^4(\pi\rho/c) \text{ для } |\rho| \leq c/2;$$

$$z_a = 0 \text{ для } |\rho| > c/2,$$
(3)

где c – диаметр пятна; ρ – расстояние от центра пятна.

Функция z_a может быть представлена в виде

$$z_a = \left[1 + \frac{4}{3} \cos 2\pi\rho/c + \frac{1}{3} \cos 4\pi\rho/c \right], \quad \rho \leq c/2.$$
(4)

Спектр сечения этой функции является взвешенной суммой спектров прямоугольного окна размером $\rho \leq c/2$, сдвинутых в области пространственных частот на частоту гармоник, составляющих косинусоидальный сигнал.

Импульсная характеристика интегратора z_n определяется формой фотоприемного элемента и представляет собой двумерную функцию единичной амплитуды с квадратным основанием. На самом деле интегрирование осуществляется не только по площади элемента, но и по времени. Однако далее для простоты интегрирование по времени не учитывается.

Спектр скользящего квадратного интегратора определяется функцией $\sin c$ в направлениях краев фотоприемного элемента. Область первого максимума амплитудного спектра интегратора имеет также форму квадрата, повернутого на $\pi/4$.

Полная аппаратная функция оптической системы с фотоматрицей будет сверткой бесконечной (по пространству) аппаратной функции оптической системы (конечной при аппроксимации) с конечной импульсной характеристикой скользящего интегратора, а полный спектр свертки – произведение бесконечного спектра импульсной характеристики скользящего интегратора и конечного спектра кривой Эйри. Вследствие этого спектральная плотность полной импульсной характеристики будет также ограниченной по пространству (будет кругом). Получить аналитическое выражение для полной импульсной характеристики оптической системы с фотоприемным элементом фотоматрицы и для ее спектра затруднительно.

Полная аппаратная функция z^* – свертка аппаратной функции $z_a(\rho)$ и импульсной характеристики интегратора z_n :

$$z^* = z_a(\rho) * z_n(x_k, y_k);$$

$$z_n = 1 \text{ при } |x| \leq l/2, \quad |y| \leq l/2;$$

$$z_n = 0 \text{ в противном случае.}$$

При расположении центра интегратора в точке (x_k, y_k)

$$z^*(x_k, y_k) = \int_{x_k - l/2}^{x_k + l/2} \int_{y_k - l/2}^{y_k + l/2} dx dy z(\rho),$$
(5)

где l – размер стороны фотоматричного элемента. Соответственно отсчет фотоприемника может быть вычислен по формуле

$$U(x_k, y_k) = \int_{x_k - l/2}^{x_k + l/2} \int_{y_k - l/2}^{y_k + l/2} dx dy z(x, y), \quad (6)$$

где x_k, y_k – координаты центра фотоприемника.

Заметим, что свертка круглого отклика на точечный объект с квадратной формой фотоприемного элемента не обладает круговой симметрией, хотя при достаточно большом размере пятна можно пренебречь этим эффектом.

О критериях оптимальности фильтрации фона. Фильтрация может быть основана на разных пространственных частотных характеристиках изображения малоразмерного объекта и фона, а также на различии их временных характеристик. Поскольку пространственные спектры фона и изображения объекта могут перекрываться, возникает необходимость выполнения оптимальной фильтрации. Как известно, процесс фильтрации может оптимизироваться по двум различным критериям: либо максимизируется отношение сигнал/шум SNR и отслеживается координата изображения, где это отношение максимально, либо минимизируется средний квадрат ошибки воспроизведения сигнала на выходе фильтра. В соответствии с этим различают «согласованную» и «винеровскую» фильтрацию. Заметим, что для выполнения согласованной фильтрации фильтруемый сигнал должен быть предварительно «отбелен». В обоих случаях фоновая помеха рассматривается как шум.

В качестве первого шага рассмотрим возможности обычной (неоптимальной) высокочастотной фильтрации. Определим непрерывную импульсную характеристику высокочастотного согласованного фильтра, основанного только на аппаратной функции оптической системы. Предлагается выбирать ее в виде аппаратной функции оптической системы, из которой вычтена постоянная составляющая

$$g = \frac{8}{3c} \left[\cos^4(\pi\rho/c) - \frac{3}{8} \right]. \quad (7)$$

Спектр подобной импульсной характеристики не содержит нулевой гармоники и имеет максимумы на тех же частотах, из которых состоит спектр аппаратной функции оптической системы (см. [4], с. 122). По сути, фильтр с такой импульсной характеристикой будет устранять низкочастотные компоненты фона.

Для использования непрерывной импульсной характеристики (7) необходимо построить по полученным отсчетам непрерывное изображение сцены. Однако это противоречит первоначальным требованиям. Поэтому согласованная фильтрация должна выполняться иначе.

Одномерная фильтрация по круговой траектории субпиксельного сканирования. Интересен вопрос о возможности одномерной круговой фильтрации непосредственно по отсчетам, расположенным на круговой траектории. Это позволило бы существенно упростить обработку. Для такой одномерной фильтрации необходимо иметь на траектории равномерно расположенные отсчеты сигнала. Сравнивая рис. 1 и 2, установим, что такие от-

счета можно получить при сканировании в соответствии с рис. 2 и затруднительно при сканировании в соответствии с рис. 1.

Фильтрация локальной постоянной составляющей фона. Фильтрация фона по круговой траектории сканирования может быть осуществлена за счет вычисления среднего значения фона на этой траектории путем суммирования отсчетов одноименных элементов фотоматрицы на всех кадрах и последующего вычитания этого среднего:

$$U_{\text{cp}} = \sum_{i=1}^F U_i, \quad (8)$$

где F – число кадров сканирования; U_i – отсчеты интенсивности элемента в i -м кадре.

В случае равномерного фона со значением U_{ϕ} и присутствия только одного малоразмерного объекта среднее значение составит:

$$U_{\text{cp}} = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^F U_i = \frac{1}{F} \sum_{i=1}^F (U_{\phi} + \theta_i U_s) = U_{\phi} + \frac{U_s}{F} \sum_{i=1}^F \theta_i, \quad (9)$$

где U_s – интенсивность малоразмерного объекта; θ_i – коэффициент заполнения элемента (часть энергии объекта, попадающей в элемент в i -м кадре).

Полученное среднее значение сигнала может быть вычтено из одномерных отсчетов элементов всех кадров. Тем самым отфильтрованное значение отсчета будет иметь вид

$$U_{si} = U_i - U_{\text{cp}} = \theta U_s - U_s \frac{1}{F} \sum_{i=1}^F \theta_i = U_s \left(\theta_i - \frac{1}{F} \sum_{i=1}^F \theta_i \right). \quad (10)$$

Значение U_{si} в этом случае не зависит от U_{cp} и определяется только размером пятна. Если, например, $\theta_i = 0$, траектория находится внутри одного элемента, а объект точечный, то $U_{si} \equiv 0$.

Рассмотренная процедура устранения фона эквивалентна фильтрации путем свертки последовательности отсчетов с импульсной характеристикой

$$h_0(n) = \begin{cases} 1 - 1/N & \text{для } n = k; \\ -1/N & \text{для } n \neq k, \end{cases} \quad (11)$$

где n – номер отсчета на траектории; k – номер фильтруемого отсчета; N – число отсчетов на траектории, равное числу кадров F .

Тем самым после устранения постоянной составляющей фона значения отсчетов элемента кадра будут определяться не только коэффициентом заполнения этого фотоприемника кадра θ , но уменьшатся на сумму коэффициентов заполнения фотоприемников на всех других кадрах, поделенную на число кадров, т. е. отсчет будет занижен. Если импульсную характеристику модифицировать, заменив, например, все отрицательные значения, которые соответствуют отличию θ от нуля, на положительные, то эффект занижения превратится в эффект завышения (будет иметь место «собрание» энергии). Можно поставить задачу нахождения такой импульсной характеристики,

чтобы процедура фильтрации была оптимальной в желаемом смысле. Это предмет дальнейшего рассмотрения.

Фильтрация линейно-наклонного фона. Если фон содержит медленно изменяющуюся по изображению компоненту, то импульсная характеристика фильтра может быть построена следующим образом. Примем, что на участке траектории сканирования интенсивность фона изменяется линейно по обеим координатам. Эту ситуацию можно представить таким образом: отсчеты расположены на поверхности эллиптического цилиндра, накрывающего траекторию сканирования. Значения отсчетов получаются путем пересечения этого цилиндра плоскостью, описывающей линейно изменяющийся фон. Далее покажем, что интенсивность отсчетов, расположенных равномерно по углу на траектории, изменяется по синусоидальному закону. Если эту синусоидальную компоненту вычесть из исходной совокупности отсчетов, то тем самым линейно изменяющийся фон будет устранен.

Пусть интенсивность отсчетов фона описывается уравнением

$$Ax + By + Cz = 0. \quad (12)$$

(Предполагается, что постоянная составляющая фона уже устранена.) Эллиптическая траектория (эллиптический цилиндр) задается как

$$\begin{aligned} x &= a \cos \alpha; \\ y &= b \sin \alpha, \end{aligned} \quad (13)$$

где a и b – полуоси эллипса; α – угол.

Считается, что оси эллипса ориентированы по координатам x и y , хотя это предположение непринципиально и делается только для упрощения выкладок. Тогда после подстановки (10) в (9) и замены переменных выражение для пересечения цилиндра плоскостью будет иметь вид

$$z = -\frac{1}{c} \sqrt{(Aa)^2 + (Bb)^2} \sin(\alpha + \beta), \quad (14)$$

где $\beta = \arctg \frac{Aa}{Bb}$ – угол наклона плоскости, описывающий фон относительно плоскости x, y .

Импульсная характеристика фильтра, устраняющего линейную составляющую фона – первую гармонику зависимости интенсивности фона по траектории сканирования, будет определяться как

$$h_1(n) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{N} \cos \frac{2\pi}{N}(n - k) & \text{для } n = k; \\ -\frac{1}{N} \cos \frac{2\pi}{N}(n - k) & \text{для } n \neq k. \end{cases} \quad (15)$$

Вышеперечисленные процедуры сводятся к фильтрации в частотной области: получению спектра сигнала по траектории, отбрасыванию двух гармоник (нулевой и первой) и последующему восстановлению сигнала по спектру.

Изложенные выше соображения показывают, что подобная процедура устранения фона не зависит от параметров траектории сканирования: размеров полуосей эллипса (радиуса для круга) и его эксцентриситета. Процедура фильтрации фона по круговой траектории не требует знания радиуса кругового сканирования и поэтому не критична как к его значению, так и к искажению формы траектории. Ничто не мешает быть ей, например, овальной.

Особенности одномерной фильтрации. Как описано выше, на границах участков изображения будут иметь место разрывы интенсивности. При фильтрации постоянной локальной составляющей фона на местах перепадов уровня сигнала станут выделяться границы: возникать отрицательные и положительные отсчеты, соизмеримые с разностью интенсивности фона на соседних участках и мешающие обнаружению объектов. Поэтому осуществлять фильтрацию по этим участкам целесообразно поочередно. Заметим, что полосограниченные участки фона не расположены по круговым траекториям, равно как по строкам и столбцам.

Фильтрация фона на изображениях в отличие от фильтрации одномерных сигналов обладает одной важной особенностью (см. [5], с. 176). Отсчеты интенсивности, полученные в результате обработки, не могут быть отрицательными. Поэтому можно предложить новые способы обработки, учитывающие эту особенность. Например, если при устранении постоянной составляющей фона к отрицательным отсчетам, полученным из-за наличия сигнала от малоразмерного объекта, прибавить самое большое по модулю отрицательное значение, то результаты фильтрации будут более близкими к идеальным (см. таблицу).

Отсчеты		
до фильтрации	после фильтрации	после суммирования
U	$-\frac{\theta}{N}$	0
U	$-\frac{\theta}{N}$	0
U	$-\frac{\theta}{N}$	0
$U + \theta$	$\theta - \frac{\theta}{N}$	θ
U	$-\frac{\theta}{N}$	0
U	$-\frac{\theta}{N}$	0
U	$-\frac{\theta}{N}$	0
U	$-\frac{\theta}{N}$	0

Подобная ситуация возникает также, когда траектория сканирования попадает на границу между двумя участками фона существенно разной интенсивности. Рассмотрим для начала случай резкой границы между участками. Процедура фильтрации будет выглядеть следующим образом. Сначала выполняется вычитание постоянной составляющей по всей траектории. В результате отсчеты на одной части траектории будут положительными, а на другой – отрицательными. При этом суммы отсчетов на каждой части траектории будут одинаковыми, отличаясь только знаком. Затем вычисляется среднее по каждой части и выполняется его вычитание из отсчетов в каждой части траектории. На части траектории, где объекта нет, отсчеты получаются нулевыми. На другой части, где объект есть, опять же получаются знакопеременные отсчеты. И, наконец, ко всем отсчетам другой части траектории добавляется значение самого отрицательного отсчета. В результате все отсчеты, за исключением одного, будут

нулевыми, а отсчет элемента, в котором находится объект, будет иметь значение сигнала объекта без каких-либо искажений U ; фон же будет устранен. Граница между участками фона при этом определяется автоматически.

Подобная процедура основывается на различии в размерах объекта и участка фона. Если же эти размеры отличаются незначительно, например, участок фона попадает своим углом на тот же элемент, куда попадает объект, то они будут отфильтрованы оба: и фон, и элемент. Если же фон постоянен на всей траектории, то второй этап приведет к тому, что все отсчеты будут нулевыми. Тогда нужно вернуться назад и сразу после первого этапа перейти к третьему.

Фон на изображении зачастую может состоять из набора участков с заметной разной средней интенсивностью и с относительно слабо изменяющейся интенсивностью на каждом участке (например, большие медленно перемещающиеся облака, озера и леса), поэтому известный интерес представляет аналитическое выражение для границы протяженного объекта в реальной оптической системе, что в принципе позволит осуществить вычитание этой границы при вычитании фона и тем самым обнаружить объекты на таких границах.

Для описания интенсивности края крупногабаритного объекта на изображении удобно воспользоваться понятием пограничной кривой [6]. По определению пограничная кривая описывает распределение освещенности в изображении границы объекта, состоящего из светлого и темного полей. Производная пограничной кривой есть функция рассеяния линии.

Численное моделирование процедуры определения пограничной линии по аппаратной функции (для ее косинусоидального представления) позволило получить аппроксимацию этой линии (при $c = 1$) в виде

$$f_n = \rho + a \sin 2\pi\rho + b \sin 4\pi\rho, \quad (16)$$

где $a = 0,19721$; $b = 0,03247$.

Заметим, что функция рассеяния линии совпадает с функцией рассеяния точки, отличаясь только амплитудами гармоник. Спектральный состав границы слабо отличается от спектра аппаратной функции, они частично перекрываются. Поэтому оптимальная фильтрация, конечно, ослабит эффект границы, но он будет еще значительным. Объекты будут плохо разделимы.

Однако если осуществлять одномерную фильтрацию по контуру края крупногабаритного объекта, то представляется, что малогабаритный объект будет успешно выделяться. Интенсивность по контуру будет одинакова и эквивалентна некоторому фону, и, следовательно, фон может быть отфильтрован.

Оптимизация одномерной фильтрации. Как отмечалось выше, фильтровать можно не только нулевую и первую гармоники фона, но и другие. Найдем выражение для частотной характеристики оптимального винеровского фильтра. Такой фильтр можно построить по априорным непрерывным спектральным плотностям фона и полной аппаратной функции. Спектральную плотность входного сигнала можно определить, вычислив квадрат амплитудного спектра импульсной характеристики сигнала (1), а спектральную плотность фона – из заданной корреляционной функции фона, предполагая, что требуемая спектральная плотность отсчетов по круговой траектории совпадает со спектральной плотностью всего изображения.

Частотная характеристика оптимального винеровского фильтра $S_\phi(\chi)$, как известно, определяется следующим образом:

$$S_\phi(\chi) = \frac{h(\chi)}{h^2(\chi) + S_N(\chi)},$$

где $S_N(\chi)$ – спектральная плотность фильтруемого изображения.

Для практического использования – умножения на спектр последовательности отсчетов на круговой траектории – полученную характеристику надо дискретизировать по числу точек отсчета на траектории.

Перейдем теперь к построению импульсной характеристики согласованного фильтра. Будем искать ее как отклик системы сканирования на точечный объект. Для этого вычислим зависимость отсчетов интенсивности изображения точечного объекта (пятна) от номера отсчета на круговой траектории сканирования.

В связи с трудностью получения отсчетов на круговых траекториях для сканирования в соответствии с рис. 1 выполним согласованную фильтрацию изображения по всем отсчетам. Предварительно обсудим основную идею одномерного метода обнаружения и локализации малогабаритного объекта на фотоматричных изображениях, предложенную в [2].

Обнаруживаемый точечный объект с интенсивностью, принятой за единицу, расположен в какой-либо произвольной точке исходного изображения. При проецировании на фотоматрицу этот объект будет представлен в виде пятна рассеяния. Объект при сканировании «распределится» по ряду фотоприемных элементов фотоматрицы. При круговом субпиксельном сканировании пятно от точечного объекта образует кольцо. В полученном изображении при отсутствии фона и шума отсчеты тех элементов, в которые попадал объект во время сканирования, будут отличны от нуля. Значения отсчетов будут определяться энергией той части пятна изображения, которая попадет на соответствующий элемент.

Для выбранного положения объекта на изображении (как и для любого другого положения) можно заранее вычислить значения отсчетов, которые должны быть получены при сканировании. Эти значения и образуют коэффициенты оптимального фильтра: A_1, A_2, \dots, A_M , где индекс M зависит от радиуса сканирования, числа кадров F и удовлетворяет соотношению $F \leq M \leq N \times N \times F$, и, вообще говоря, для каждого положения объекта он разный.

Значения этих отсчетов вычисляются в соответствии с (5) для элементов с координатами центров приемников x_k, y_k и положений пятна на траектории x_T, y_T .

Допустим, что при сканировании были получены значения отсчетов U_1, U_2, \dots, U_M , содержащие нормальный белый шум. Тогда для детектирования сигнала следует вычислить $\sum A_m U_m$ по всем отсчетам, в которые попадал объект во время цикла сканирования. Образно говоря, имея «снимок, след» объекта (т. е. A_1, A_2, \dots, A_M), нужно «наложить» его на полученную картину (вычислить $\sum A_m U_m$). Значение сигнала при этом определяется выражением

$$s = \sum A_m U_m. \quad (17)$$

Вычисленный результат надо сравнить со значением порога, полученным в соответствии с отношением максимального правдоподобия, и тем самым установить наличие объекта в данной точке изображения. Для точки изображения, где сумма будет наибольшей, вероятно присутствие обнаруживаемого объекта.

По серии снимков можно увеличить достоверность обнаружения, построив траекторию наиболее вероятного положения объекта. Описанная процедура, по сути, осуществляет согласованную фильтрацию сканированного изображения при условии отсутствия фона. Поэтому перед ее применением необходимо фотоматричное изображение подвергнуть обработке: обелить и устранить фон. Будем осуществлять фильтрацию, обнаружение и локализацию малогабаритного объекта на изображениях во всех точках (пикселах) плоскости с шагом Δ по обеим координатам. Значение Δ определяет точность локализации.

Для определенности значение шага выберем $\Delta = l/p$. Координаты этих точек:

$$x = n\Delta, \quad n = 1, \dots, pN; \quad y = m\Delta, \quad m = 1, \dots, pN.$$

Тогда общее число точек (пикселов), где производится обнаружение, составит $(pN)^2$. Ясно, что при этом число импульсных характеристик будет также равно $(pN)^2$.

Круговую траекторию заданного радиуса, проходящую через выбранный пиксел, определим следующим образом: примем координаты центра траектории x_0, y_0 ($x_0 = n\Delta + r, y_0 = m\Delta$), а траекторию — $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$.

На каждой траектории за цикл кругового сканирования осуществляется выборка F отсчетов со всех элементов фотоматрицы. Координаты отсчетов на траектории определяются как

$$x_\tau = r \cos \varphi_k; \quad y_\tau = r \sin \varphi_k,$$

где $\varphi_k = 2\pi/N$ (k — номер отсчета на траектории).

Можно определить, как будет выглядеть импульсная характеристика в зависимости от номера равноотстоящих точек на круговой траектории для случая, когда аппаратная функция определяется только оптической системой.

Отсчеты интенсивности на траектории (без учета вклада в аппаратную функцию интегрирующего фотоприемника) будут решением системы уравнений

$$z = \cos^4 \pi \rho \quad \text{для } \rho \leq c/2;$$

$$z = 0 \quad \text{для } \rho > c/2;$$

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2; \quad \rho = x^2 + y^2,$$

где ρ – расстояние от центра пятна; r – радиус сканирования. Координаты: центр пятна $x = 0, y = 0$; центр траектории $x = x_0, y = y_0$. Точки отсчетов на круговой траектории:

$$x_k = r \cos \varphi_k + x_0; \quad y_k = r \sin \varphi_k + y_0;$$

$$\varphi_k = \frac{2\pi}{F} k, \quad k = 1, 2, \dots, F.$$

Для простоты примем, что первый отсчет на траектории расположен в центре пятна.

Для того чтобы сигнал фона отбелить, нужно из определенной вышеуказанным способом импульсной характеристики вычесть постоянную составляющую – нулевую гармонику.

Выбор параметров сканирования. Сформулируем несколько соображений о выборе параметров субпиксельного кругового сканирования. Этот выбор может осуществляться по разным критериям. Попытаемся установить связь между r, l, c, F , а также рекомендовать такие их значения, когда достаточно большое число коэффициентов заполнения θ будут нулевыми, тем самым будет достигнуто наибольшее различие изображения малоразмерного объекта и фона. (Здесь желательно учитывать, что оптимальные (в смысле влияния шумов на прямоугольной сетке) значения радиуса кругового сканирования, как было показано ранее, равны $1/3; 2/3; 3/3$ от l .)

Интервал дискретизации по пространству определяется радиусом кругового субпиксельного сканирования r и составляет $2\pi r/F$, а при $F=16$ и $r=2/3l$ приблизительно равен $1/4l$.

Определим число элементов (отсчетов), перекрывающих пятно при движении фотоматрицы по круговой траектории:

$$m = cF/2\pi r. \quad (18)$$

Относительное значение радиуса сканирования

$$r/c = F/2\pi m.$$

Лучше всего, по-видимому, чтобы $m \approx 3$.

Принимая размер пятна с равным линейному размеру элемента (без зазоров), можно получить, например,

$$\text{при } F = 16 \text{ и } r/c = 1 \quad m \approx 2,5;$$

$$\text{при } F = 8 \text{ и } r/c = 2/3 \quad m \approx 1,9.$$

Если радиус сканирования соизмерим с размерами пятна, то объект будет восприниматься как фон и также будет отфильтровываться. При попадании малоразмерного объекта в центр траектории все части его изображения, лежащие на траекторию, будут восприниматься как фон и отфильтровываться.

Если пятно (по сравнению с размером элемента) большое, то интенсивность отсчета падает и может стать соизмеримой с шумом. Заметим, что независимо от параметров сканирования уменьшение размера пятна приведет к увеличению влияния зазоров.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что субпиксельное круговое сканирование является перспективным средством для обнаружения малогабаритных объектов на фото-матричных изображениях.

2. Определены подходы к вычислению импульсной характеристики фильтра для согласованной фильтрации объектов и спектральной характеристики фильтра для винеровской фильтрации фона, которая обеспечивает оптимальное ослабление пространственных гармоник спектра фона при сохранении гармоник спектра обнаруживаемого объекта.

3. Предложено для уменьшения ошибок обнаружения при фильтрации фона, содержащего крупногабаритные объекты, осуществлять одномерную фильтрацию по контурам таких объектов. Показано, что при фильтрации фона, например, для исключения границ крупных объектов, возможно использовать свойство неотрицательности отсчетов интенсивности, получаемых в результате фильтрации.

4. Установлено, что при фоне, содержащем только постоянную и линейно-наклонную составляющие, результаты фильтрации не зависят от параметров траектории: радиуса сканирования и эллиптических отклонений от круговой траектории.

Полученные результаты могут послужить основой для построения программного комплекса численного моделирования процедур фильтрации.

Оценивая роль кругового сканирования в рассматриваемой ситуации, можно сказать, что круговое сканирование делает случайной погрешность получения отсчетов из-за частичного перекрытия пятна рассеивания и фотоприемника и, главное, дает возможность уточнить координаты подозрительных на наличие объекта точек изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peleg S., Keren D., Schweizer L. Improving image resolution using, subpixel offsets // Pattern Recogn. Lett. 1987. 5. P. 225.
2. Белых Н. К., Касперович А. Н., Шалагинов Ю. В. О выделении объектов на фото-матричных изображениях при их круговом сканировании // Автометрия. 2001. № 1. С. 15.
3. О'Нейл. Введение в статистическую оптику. М.: Мир, 1972.
4. Харкевич А. А. Основы радиотехники. М.: Связьиздат, 1963.
5. Реконструкция изображений /Под ред. Г. Старка. М.: Мир, 1992.
6. Крепилова Г. В., Лазарева Н. Л., Пуряев Д. Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987.

*Институт автоматки и электрометрии СО РАН,
E-mail: kasperovich@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
5 августа 2002 г.*