

УДК 004.9

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ С УЧЁТОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАБЛЮДАЕМОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПРИ МИКРОСКАНИРОВАНИИ*

А. К. Шакенов¹, Д. Е. Будеев²

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86
E-mail: adil.shakenov@ngs.ru

Предложен алгоритм фильтрации для обнаружения объектов на изображениях, полученных в режиме микросканирования. Приведён алгоритм расчёта фильтра для объекта известной формы. Проведено исследование влияния на результат фильтрации изменения формы объекта, вызванного субпиксельным смещением объекта относительно центра фоточувствительного элемента. Апробирован подход к выбору формы фильтра с учётом изменения формы объекта. Приведены результаты численного моделирования.

Ключевые слова: малоразмерный объект, алгоритм обнаружения, субпиксельное смещение, микросканирование, алгоритм фильтрации изображений.

DOI: 10.15372/AUT20180505

Введение. Для обнаружения малоразмерных движущихся объектов часто применяются камеры, регистрация изображений в которых происходит с помощью матричного фотоприёмника. Регистрирующая матрица состоит из фоточувствительных элементов, разделённых межэлементными промежутками. При попадании объекта в межэлементный промежуток матрицы фотоприёмника часть энергии объекта теряется. Один из путей решения этой проблемы заключается в применении системы наблюдения на основе микросканирования [1, 2]. В процессе микросканирования матрица фотоприёмника сдвигается относительно начальной позиции и регистрация данных производится в нескольких положениях. Зарегистрированные в каждом положении кадры объединяются в одно изображение более высокого разрешения. Существуют разные методы восстановления изображения высокого разрешения по набору кадров, полученных при микросканировании. Алгоритм восстановления и модель сканирующего устройства представлены в [3]. В работах [4, 5] развит подход к решению этой задачи на основе винеровской фильтрации. Методы, использующие оптимальный линейный прогноз, изложены в [6, 7]. Оптимизированные по скорости решения можно найти в [8, 9]. Объекты, представлявшие на исходных кадрах несколько пикселей, на изображении высокого разрешения, полученном в результате микросканирования, имеют выраженную форму, которая зависит от параметров системы наблюдения: функции рассеяния точки, размера фоточувствительного элемента, а также от траектории смещения матрицы в процессе микросканирования. На рис. 1 приведены изображения объектов в центре элемента фотоприёмного устройства, в межэлементном промежутке до (a, c) и после (b, d) микросканирования.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Федерального агентства научных организаций (государственная регистрация № АААА-А17-117052410034-6).

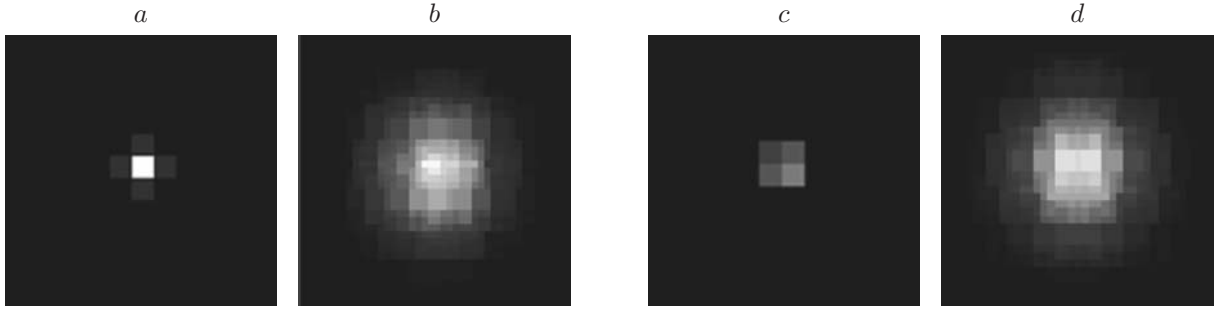


Рис. 1

Как правило, исходное изображение, на котором необходимо обнаружить объект, включает в себя коррелированную фоновую составляющую, среднеквадратичное отклонение (СКО) которой сопоставимо с амплитудой объекта, и некоррелированный шум, обусловленный влиянием регистрирующего устройства.

Форму объекта можно считать известной, поскольку определены параметры регистрирующей системы и траектория сканирования матрицы. Возникает задача обнаружения объекта известной формы на фоне коррелированного шума. Метод согласованной линейной фильтрации [10] позволяет найти оптимальное на множестве линейных фильтров решение данной задачи. Однако при наблюдении изменяющихся фонов применение указанного алгоритма затруднено из-за большого объёма вычислений, необходимых для оценки ковариационной матрицы коррелированного шума. По этой причине интенсивно развиваются быстрые неоптимальные методы прогнозирования и исключения фоновой составляющей. В основе таких подходов, как правило, лежат эвристические предположения о свойствах подстилающей поверхности. Так, например, в [11] представлен линейный фильтр, построенный в предположении о локальной линейности фона. В работе [12] для слабых фонов приведён метод фильтрации, учитывающий изменения шума, возникающие в процессе сканирования изображения. В [13, 14] представлено несколько методов подавления текстуры, использующих билатеральную фильтрацию. Оценка и исключение фона с помощью медианного фильтра применены в [15]. В работах [16, 17] можно найти несколько модификаций этого метода.

Постановка задачи. Необходимо увеличить отношение полезного сигнала к значению среднеквадратичного отклонения шумов за счёт построения фильтра, учитывающего изменение наблюдаемой формы объекта в процессе микросканирования при наличии коррелированной фоновой текстуры и некоррелированного шума. При этом в силу вычислительных ограничений сложность алгоритма не должна превышать нескольких операций на пиксел изображения.

Алгоритм фильтрации. Для известной формы объекта обработку можно провести следующим образом. Был применён изложенный в [11] метод подавления фоновой текстуры, полученный в предположении, что фон в пределах апертуры фильтра можно описать плоскостью. Данный алгоритм был выбран исходя из высокой вычислительной скорости и возможности эффективной реализации на различных процессорах. Процесс фильтрации в таком случае представляет собой свёртку обрабатываемого изображения с весовыми коэффициентами фильтра:

$$Y_{i,j} = \sum_{r=-m}^m \sum_{l=-n}^n h_{l,r} X_{i+l,j+r}.$$

Здесь $X_{i,j}$ и $Y_{i,j}$ — входное и выходное изображения, $h_{l,r}$ — весовые коэффициенты. Ко-

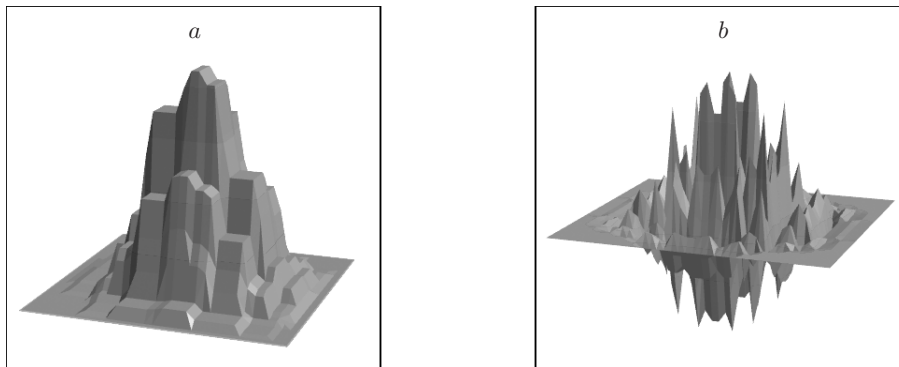


Рис. 2

эффиценты фильтра задаются следующим образом:

$$h_{l,r} = \begin{cases} h_{0,0} = 1, \\ h_{0,r} = -0,5(m+n)^{-1}, & r = -m, \dots, -1, 1, \dots, m, \\ h_{l,0} = -0,5(m+n)^{-1}, & l = -n, \dots, -1, 1, \dots, n, \\ h_{l,r} = 0, & l \neq 0, r \neq 0, \end{cases}$$

где $(2m+1) \times (2n+1)$ — размер окна фильтрации.

Был использован фильтр размером 5×5 пикселей, так как проведённые эксперименты показали, что дальнейшее увеличение размера практически не улучшает качества фильтрации.

Если фон хорошо описывается плоскостью в окне фильтра, то после этапа подавления фоновой составляющей шум на выходе фильтра в значительной степени близок к белому. Поэтому для задачи выделения полезного сигнала на фоне шумов применяется фильтр, имеющий форму объекта после обработки фильтром, который подавляет подстилающий фон. На рис. 2 показан объект до (a) и после (b) обработки фильтром, подавляющим текстуру фона. Полученный таким образом фильтр используется для заключительной обработки изображения.

Выбор фильтра с учётом изменения формы объекта. Выше был описан алгоритм фильтрации для некоторой фиксированной формы объекта. Наблюдаемая форма и максимальная яркость объекта, зарегистрированного системой микросканирования, зависят от положения проекции центра объекта относительно ячеек фотоприёмника (на момент начала цикла сканирования). Поэтому необходимо выбрать либо синтезировать фильтр, который в среднем даёт лучшие результаты для всех форм объекта. Для решения этой задачи опробован следующий подход. На подстилающую текстуру были нанесены 100 объектов таким образом, чтобы покрыть все возможные (с точностью до 0,1 отсчёта дискретной решётки) положения объекта относительно центра фотоприёмного элемента. Расстояния между объектами на изображении кратно превосходили размер объекта. Полученное вышеописанным способом изображение было обработано каждым фильтром, построенным из набора возможных форм объекта. Величина отклика A_j^i при обработке объекта с номером j фильтром, вычисленным по объекту с номером i , сохранялась в массив. После этого рассчитывалось среднее значение отклика для фильтра под номером i :

$$\bar{A}_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N A_j^i,$$

где A_j^i — отклик j -го объекта на i -й фильтр, $i = 1, 2, \dots, N$; N — число фильтров. В

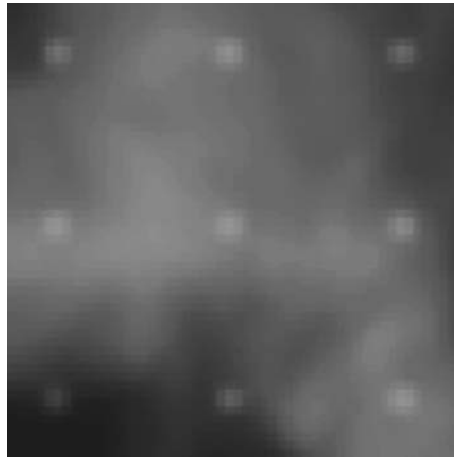


Рис. 3

данной работе $N = 100$. Затем по полученному множеству определялся номер фильтра $k = \arg \max_i (\bar{A}_i)$, который дал максимальный отклик.

Экспериментальные результаты. Изображения, использованные в экспериментах, были получены путём численного моделирования. Они содержали объекты, коррелированную фоновую составляющую (фон), имитирующую облачный покров и добавленный белый шум. В качестве коррелированной фоновой составляющей была взята текстура с яркостью, имеющей нормальное распределение. Радиус корреляции текстуры значительно превосходил размеры объектов. На рис. 3 показан фрагмент смоделированного изображения с нанесёнными объектами. Размер объектов после микросканирования и восстановления равен 30×30 пикселей.

Для исследования эффективности алгоритма подавления фоновой составляющей был проведён следующий эксперимент. На изображение, содержащее объекты и коррелированную фоновую составляющую, аддитивно добавлялся белый гауссов шум со среднеквадратичным отклонением от 0,5 до 2,0. Затем проводилась обработка описанным алгоритмом. В данном эксперименте использовалась форма объекта, выбранная случайным образом из набора смоделированных форм. Результаты представлены в табл. 1 (СКО фона равно 24,1). Взяты следующие обозначения: A_s и A_r — исходная амплитуда объектов и её среднее значение после обработки; $СКО_s$ и $СКО_r$ — оценённые среднеквадратичные отклонения шумов (сумма белого и фонового шумов) до обработки (оценка получена по фрагменту изображения, не содержащему объектов) и после неё. Значения в таблице приведены в отсчётах квантования исходного изображения.

Как видно из таблицы, в данном случае фильтрация с подавлением фона дала улучшение относительно исходного отношения сигнал/шум до 7 раз, что позволяет обнаруживать значительно менее яркие объекты. В основе рассмотренного алгоритма фильтрации лежит эвристическое предположение о том, что фон в границах фильтра можно описать плоскостью. Очевидно, что для реальных фонов это предположение выполняется лишь с

Таблица 1

СКО шума	$A_s/СКО_s$ (до обработки)	$A_r/СКО_r$ (после обработки)
0,5	1,393	9,33
1,0	1,392	9,28
1,5	1,391	9,19
2,0	1,388	9,08

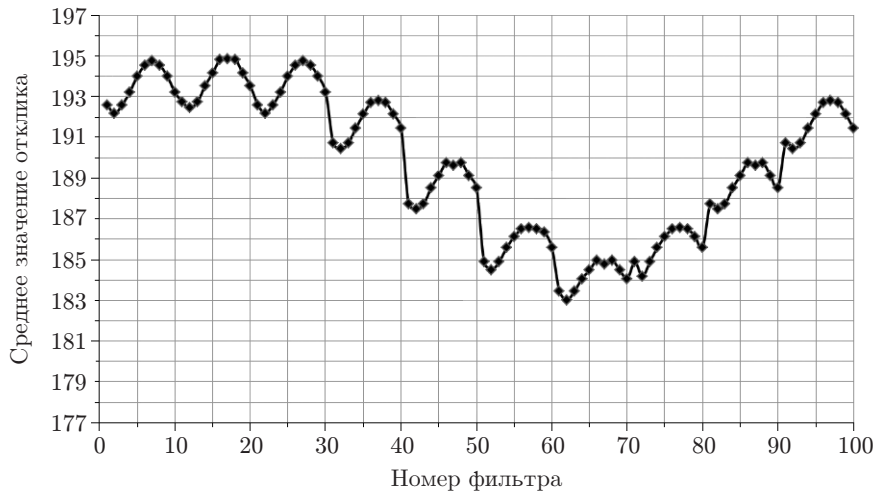


Рис. 4

некоторой точностью, что определяет качество работы и границы применимости данного алгоритма для конкретных фонов.

Для иллюстрации работы алгоритма выбора формы фильтра на рис. 4 приведён график зависимости среднего значения отклика на объекты при фильтрации различными фильтрами. Значения отклика приведены в отсчётах квантования исходных изображений. В процедуре выбора наилучшего фильтра использовались только изображения объектов при отсутствии в кадре фона и случайного шума. Из графика понятно, что в зависимости от формы фильтра средняя величина отклика значительно меняется.

Для анализа зависимости эффективности фильтрации от выбранной формы фильтра была построена гистограмма полученной величины (рис. 5). Из рисунка видно, что используемые фильтры разбиваются на несколько групп с различным качеством фильтрации (слева — наихудшее качество фильтрации, справа — наилучшее). Разбиение на группы характеризует неравнозначность изменения формы в процессе микросканирования данной системой наблюдения в зависимости от положения объекта относительно ячеек фотоприёмника на момент начала сканирования.

Для получения наилучшего результата фильтрации целесообразно применение фильтра, который дал в среднем максимальный отклик (на рис. 4 под номером 17). Чтобы оценить эффективность изложенного алгоритма при наличии фона и шума, был проведён следующий эксперимент. Выбор наилучшего и наихудшего фильтров осуществлялся с по-

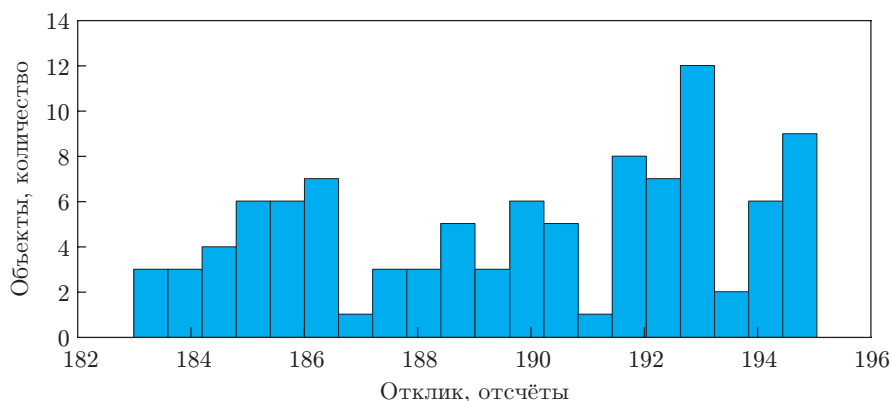


Рис. 5

Таблица 2

СКО шума	$A_{\max}/\text{СКО}_{\max}$	$A_{\min}/\text{СКО}_{\min}$
0,5	9,69	8,82
1,0	9,63	8,78
1,5	9,54	8,73
2,0	9,42	8,65

мощью вышеописанной процедуры, затем выполнялась фильтрация изображений, содержащих объекты, фоновую составляющую и белый шум. Результаты эксперимента сведены в табл. 2 (СКО фона равно 24,1, а значения приведены в отсчётах квантования исходных изображений). Были использованы следующие обозначения: A_{\max} и A_{\min} — средние значения амплитуды объектов после фильтрации наилучшим и наихудшим фильтром; СКО_{\max} и СКО_{\min} — оценённые СКО шумов после фильтрации наилучшим и наихудшим фильтром. Оценка СКО шумов проводилась по фрагменту изображения, не содержащему объектов. По результатам видно, что выигрыш при выборе формы фильтра составляет до 10 %.

Заключение. Известная топология сканирующего устройства позволяет провести предварительный расчёт различных наблюдаемых форм объекта, определяемых данной системой сканирования, с учётом субпиксельного положения проекции объекта относительно элементов фотоприёмной матрицы. Результаты проведённых экспериментов показали необходимость принимать во внимание изменения наблюдаемой формы объекта, обусловленные рассматриваемой системой сканирования. Для создания фильтра был предложен подход, заключающийся в комбинации алгоритма подавления фона, метода согласованной фильтрации и предварительного моделирования системы сканирования. Такой подход позволил построить набор возможных форм объектов и выбрать из него фильтр, дающий в среднем наилучшие результаты. Для рассмотренных данных выигрыш от применения этого подхода составил 10 %. Дальнейшие исследования могут заключаться в использовании методов нелинейной фильтрации для решения данной задачи, а также в синтезе оптимального фильтра по набору его возможных форм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cabanski W., Breiter R., Mauk K.-H.** Miniaturized high performance staring thermal imaging system // Proc. SPIE. 2000. **4028**. P. 208–219.
2. **Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г.** Некоторые пути совершенствования тепловизионных систем // Специальная техника. 2004. № 2. С. 11–19.
3. **Киричук В. С., Шакенов А. К.** Алгоритм восстановления изображений в задаче обнаружения объектов при круговом микросканировании // Автометрия. 2016. **52**, № 1. С. 15–21.
4. **Yousef A., Li J., Karim M. A.** Mathematical model development of super-resolution image Wiener restoration // Opt. Eng. 2012. **51**, N 3. 037007.
5. **Yousef A. M., Rahman Z., Karim M.** On the restoration of the microscanned images captured from unmanned airborne vehicles // Proc. SPIE. 2011. **8056**. 80560D.
6. **Иванов В. А., Киричук В. С., Косых В. П.** Формирование изображения повышенного разрешения по серии взаимно смещенных изображений посредством оптимального линейного прогноза // Автометрия. 2009. **45**, № 2. С. 3–13.
7. **Косых В. П.** Коррекция импульсного отклика системы видеорегистрации при накоплении серии взаимно смещенных изображений // Автометрия. 2009. **45**, № 5. С. 3–8.
8. **Иванов В. А., Киричук В. С., Косых В. П. и др.** Быстродействующие алгоритмы построения изображений с повышенной частотой дискретизации // Автометрия. 2009. **45**, № 5. С. 9–13.

9. **Lopez-Martinez J. L., Kober V.** Fast image restoration algorithm based on camera micro-scanning // Proc. SPIE. 2009. **7443**. 744310.
10. **Прэтт У.** Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. Т. 2. С. 582–584.
11. **Артемьев В. М., Наумов А. О., Кохан Л. Л.** Обнаружение точечных объектов на изображениях в условиях неопределенности // Информатика. 2010. **2**, № 26. С. 15–24.
12. **Шакенов А. К., Будеев Д. Е.** Фильтрация изображений малоразмерных объектов в системах с круговым микросканированием // Автометрия. 2017. **53**, № 4. С. 120–126.
13. **Bae T.-W., Sohng K.-I.** Small target detection using bilateral filter based on edge component // Journ. Infrared Milli. Terahz. Waves. 2010. **31**, N 6. P. 735–743.
14. **Bae T.-W., Lee S.-H., Sohng K.-I.** Small target detection using the bilateral filter based on target similarity index // IEICE Electron. Express. 2010. **7**, N 9. P. 589–595.
15. **Barnett J.** Statistical analysis of median subtraction filtering with application to point target detection in infrared backgrounds // Proc. SPIE. 1989. **1050**. P. 10–18.
16. **Deshpande S. D., Er M. H., Ronda V., Chan Ph.** Max-mean and max-median filters for detection of small-targets // Proc. SPIE. 1999. **3809**. P. 74–83.
17. **Шакенов А. К.** Алгоритмы подавления фона в задаче обнаружения точечных объектов по изображениям // Автометрия. 2014. **50**, № 4. С. 81–87.

Поступила в редакцию 31 мая 2018 г.
