

УДК 004.9

АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРИ КРУГОВОМ МИКРОСКАНИРОВАНИИ

В. С. Киричук^{1,2}, А. К. Шакенов¹

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

²*Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

E-mail: adil.shakenov@ngs.ru

Рассмотрена модель регистрации изображений в режиме кругового микросканирования. Предложен алгоритм, позволяющий получить изображение с большим числом отсчётов по набору кадров меньшего размера при известной геометрии движения сканирующей матрицы. Дана оценка изменений амплитуды малоразмерного объекта методом численного моделирования при статическом положении матрицы фотоприёмника и при микросканировании в режиме старт/стоп. Проведено исследование влияния на амплитуду объекта размера межэлементного промежутка и радиуса сканирования. Для матриц с различным размером межэлементного промежутка приведены результаты сравнения итогового отношения амплитуды объекта к уровню случайного шума при статическом накоплении и круговом микросканировании в режиме старт/стоп.

Ключевые слова: моделирование изображений, круговое микросканирование, малоразмерные объекты.

DOI: 10.15372/AUT20160102

Введение. В настоящее время для решения задачи дистанционного обнаружения движущихся объектов активно применяются камеры наблюдения, в которых регистрация данных осуществляется с помощью матрицы фотоприёмных элементов. Преимущество использования матрицы перед сканирующими системами заключается в возможности получения изображения всего поля кадра в единый момент времени. Ячейки фоточувствительных элементов располагаются в плоскости матрицы с межэлементными промежутками. При попадании изображения малоразмерного объекта в межэлементный промежуток регистрируемая интенсивность объекта уменьшается, что, в свою очередь, приводит к снижению характеристик системы обнаружения. В качестве одного из подходов к решению этой проблемы были предложены системы, использующие в процессе регистрации данных микросканирование [1, 2], т. е. движение фотоприёмной матрицы в плоскости, перпендикулярной к направлению оптического потока. Возможные способы реализации подобных систем изложены в [3]. В работе [4] приведены описание действующей системы регистрации данных, применяющей микросканирование, сравнение качества получаемого изображения при обычном способе регистрации и микросканировании, использующем четыре положения матрицы при регистрации одного кадра, а также экспериментальные результаты, показывающие улучшение обнаружения цели при таком подходе. В [5] предложен алгоритм синтеза изображения высокого разрешения по результатам микросканирования. Используемая модель предполагает, что изображения в процессе микросканирования могут отличаться сдвигом и поворотом. Параметры модели (углы поворота и величина сдвига) оцениваются алгоритмом в процессе обработки по исходным данным. В [6] рассмотрены

два алгоритма получения изображения повышенного разрешения по результатам микросканирования. В первом алгоритме при известном значении смещения матрицы строится изображение повышенного разрешения, влияние оптической системы не учитывается. Во втором случае параметры смещения оцениваются по исходным данным, а также проводится восстановление сигнала с учётом её влияния. Кроме того, показано, что использование микросканирования позволяет увеличить вероятность обнаружения цели по сравнению с обнаружением по исходным данным низкого разрешения.

При проектировании и разработке систем обнаружения объектов необходимо иметь качественные и количественные оценки влияния параметров регистрирующей аппаратуры на статистические характеристики выходного изображения. Например, в работе [7] для анализа пороговой чувствительности предложена модель инерционного фотоприёмного устройства, которая даёт возможность оценивать значения пеленгационной характеристики в зависимости от параметров устройства и скорости движения объекта.

Большинство микросканирующих систем использует сдвиг вдоль координат дискретной решётки изображения. В представленной работе рассматривается случай кругового микросканирования. Одним из подходов к обнаружению объектов по данным, полученным в результате микросканирования, является восстановление изображения, имеющего большее число отсчётов, чем исходные кадры. Предлагается простой в вычислительном плане алгоритм, позволяющий получить изображение с большим числом отсчётов по набору кадров меньшего размера при известной геометрии движения сканирующей матрицы. Задачи обнаружения объектов, как правило, критичны ко времени выполнения и вычислительным ресурсам. Рассмотренный алгоритм имеет высокую вычислительную эффективность в сравнении с алгоритмами повышения разрешения, основанными на оценке функции рассеяния точки (ФРТ).

Постановка задачи. Необходимо разработать эффективный в вычислительном плане алгоритм синтеза изображения повышенного разрешения по входному набору данных микросканирования, улучшающий отношение сигнал/шум. Для предложенного алгоритма методом численного моделирования необходимо получить оценки изменения амплитуды наблюдаемого точечного объекта и отношения сигнал/шум при регистрации изображений в режиме кругового микросканирования с различными параметрами.

Модель процесса регистрации изображений с использованием микросканирования. Процесс регистрации изображения в режиме микросканирования можно представить в виде схемы, приведённой на рис. 1. На вход оптической системы поступает непрерывное поле интенсивности. Численное моделирование этого поля проводилось на основе изображения размером, в 10 раз превышающим размер матрицы фотоприёмника. Таким образом, для расчёта значений одного пикселя моделируемого изображения использовалось 100 точек входного изображения.

В рассмотренной модели предполагалось, что функция рассеяния точки одинакова по всему полю кадра. Применялась модель оптической системы с ФРТ в виде функции Гаусса. В этом случае выходное изображение $I_{\text{opt}}(x, y)$ получается из входного изображения $I_1(x, y)$ путём свёртки с функцией рассеяния точки $f(x, y)$:

$$I_{\text{opt}}(x, y) = f(x, y) \otimes I_1(x, y).$$

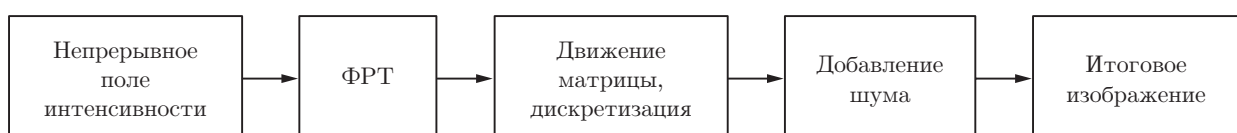


Рис. 1

Здесь

$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right).$$

Поскольку входной оптический поток моделировался дискретным изображением, для численного моделирования оптической системы строился дискретный фильтр, имеющий размер 31×31 элемент подробной решётки, при этом использовалось значение параметра σ равное 4.

При микросканировании в режиме старт/стоп матрица фотоприёмника движется по кругу и измерение интенсивности и считывание данных происходят в K позициях. Результатом процедуры микросканирования являются K изображений. Положение матрицы фотоприёмника в плоскости оптического изображения при плоскопараллельном круговом движении однозначно задаётся координатами верхнего левого угла матрицы. Так как входное воздействие имитировалось изображением высокого разрешения, достаточно задать положение матричной решётки относительно этого изображения. Координаты положения решётки при моделировании k -го изображения описываются следующим образом:

$$X(k) = 10R \cos(2\pi k/K), \quad Y(k) = 10R \sin(2\pi k/K),$$

где R — радиус сканирования в элементах отсчёта матрицы. В проведённых экспериментах было рассмотрено микросканирование, использующее 10 изображений низкого разрешения ($K = 10$).

Пусть $g(x, y)$ — функция, которая задаёт интенсивность излучения в точке (x, y) плоскости фотоприёмника, а ячейка фотоприёмника (i, j) определяется множеством точек $\{(x, y) \mid a_i < x < b_i, c_j < y < d_j\}$. Тогда значение сигнала в ячейке $D(i, j)$ вычисляется как

$$D(i, j) = \frac{1}{(b_i - a_i)(d_j - c_j)} \int_{a_i}^{b_i} \int_{c_j}^{d_j} g(x, y) dy dx. \quad (1)$$

Для моделирования межэлементных промежутков в (1) целесообразно использовать функцию

$$\tilde{g}(x, y) = \begin{cases} 0, & (x, y) \in \text{межэлементному промежутку,} \\ g(x, y) & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Поскольку входное воздействие имитировалось дискретным изображением, модель (1) была записана в виде

$$D^k(i, j) = \frac{1}{N^2} \sum_{t=iN+X(k)}^{t < (i+1)N+X(k)} \sum_{s=jN+Y(k)}^{s < (j+1)N+Y(k)} I_{\text{opt}}(t, s) B(t, s),$$

где N — количество узлов ($N = 10$) подробной решётки, моделирующей непрерывное входное воздействие в пределах одного элемента матрицы; $B(t, s)$ — функция, характеризующая принадлежность узла подробной решётки к межэлементному промежутку:

$$B(t, s) = \begin{cases} 0, & (t, s) \in \text{межэлементному промежутку,} \\ 1 & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Алгоритм восстановления изображения. При регистрации изображений в режиме кругового микросканирования входными данными является набор изображений низкого разрешения, полученных в течение одного полного оборота матрицы. Существуют различные алгоритмы восстановления изображения высокого разрешения по входному набору. В работах [8, 9] развит подход к решению этой задачи на основе винеровской фильтрации. В [10, 11] рассмотрены алгоритмы на основе оптимального линейного прогноза. Ряд быстрых итеративных и рекуррентных алгоритмов приведён в [12–14]. В данной работе предложен и исследован следующий алгоритм восстановления изображения повышенного разрешения. Синтезировалось изображение, имеющее такой же размер, как и входное изображение, моделирующее непрерывное оптическое поле. Пусть $I(x, y)$ — синтезируемое изображение, имеющее такой же размер, как и изображение $I_{\text{opt}}(x, y)$. Величина $D^k(i, j)$, $k = 1, \dots, K$, — множество зарегистрированных изображений низкого разрешения. Обозначим через $\Omega_{i,j}^k$ множество узлов изображения $I_{\text{opt}}(x, y)$, по которым рассчитывалось значение $D^k(i, j)$. Для каждого пиксела $D^k(i, j)$ это множество можно однозначно восстановить, поскольку геометрия микросканирования и расположение фоточувствительных элементов известны. Обозначим через $W(x, y)$ счётчик, имеющий такой же размер, как и изображение $I(x, y)$. Для синтеза изображения использовался следующий алгоритм.

1. Инициализация $I(x, y)$, $W(x, y)$ нулевыми значениями.
2. Для всех $k = 1, \dots, K$ выполнялась процедура накопления следующим образом:

$$\forall (x, y) \in \Omega_{i,j}^k: I(x, y) = I(x, y) + D^k(i, j), \quad W(x, y) = W(x, y) + 1.$$

$$3. I(x, y) = \begin{cases} I(x, y)/W(x, y), & W(x, y) \neq 0, \\ 0, & W(x, y) = 0. \end{cases}$$

Результаты численного моделирования. Результаты прохождения фрагмента телевизионной таблицы через тракт моделирования и синтеза изображения представлены на рис. 2 (a — исходное изображение, b — одно из изображений в процессе сканирования (увеличенное), c — синтезированное). Приведённая иллюстрация позволяет визуально оценить изменения при восстановлении изображения высокого разрешения по серии изображений низкого разрешения.

При наблюдении малоразмерного объекта камерой его зарегистрированная форма и амплитуда зависят от положения проекции центра объекта в плоскости фотоприёмной матрицы относительно фоточувствительных элементов. Для исследования влияния микросканирования на амплитуду объектов на исходное изображение наносилось 100 изображений объектов. Объекты были разнесены по полю кадра с шагом, значительно превыша-

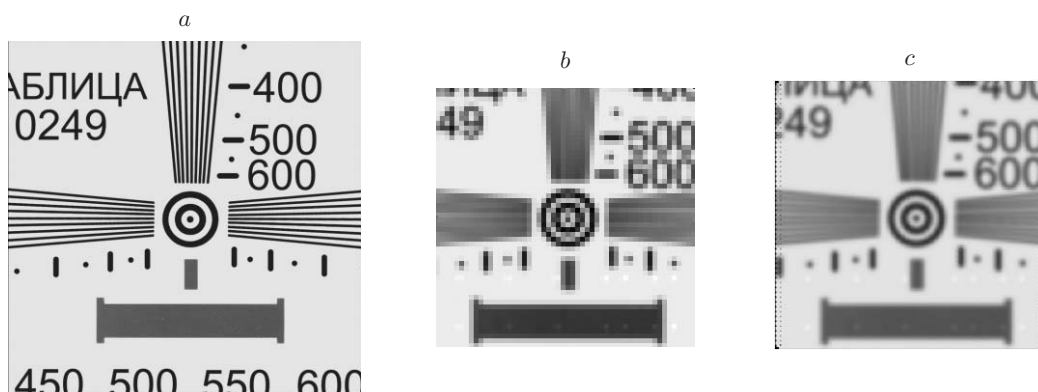


Рис. 2

Таблица 1

Межэлементный промежуток 10 %				Межэлементный промежуток 20 %				Межэлементный промежуток 30 %			
Радиус	A_{\min}	A_{avg}	A_{\max}	Радиус	A_{\min}	A_{avg}	A_{\max}	Радиус	A_{\min}	A_{avg}	A_{\max}
0	3,94	7,99	11,04	0	3,8	6,67	9,31	0	2,29	5,29	7,72
0,75	8,14	8,93	10,07	0,75	7,12	7,91	8,44	0,75	5,92	6,65	7,12
1,0	8,37	9,28	10,41	1,0	7,64	8,25	8,82	1,0	6,01	6,84	7,72
1,5	8,13	8,97	9,76	1,5	7,21	7,69	8,17	1,5	5,63	6,74	7,09
2,0	6,16	9,21	10,83	2,0	5,68	8,02	9,31	2,0	4,19	6,60	7,72
2,5	7,79	9,32	10,20	2,5	6,88	7,94	8,56	2,5	5,15	6,64	7,32

ющим размер пятна рассеяния оптической системы. При этом объекты наносились таким образом, чтобы положение центра проекции объекта относительно фоточувствительного элемента покрывало все возможные положения внутри фотоприёмной ячейки (с точностью до отсчёта подробной решётки моделирования). Поскольку размер проекции объекта в десятки раз меньше размера ячейки, на входном изображении объект моделировался дельта-функцией с заданной амплитудой.

Очевидно, что при статическом накоплении объект, расположенный в межэлементном промежутке, значительно теряет амплитуду. При микросканировании и восстановлении изображения повышенного разрешения амплитуда объектов и их форма выравниваются.

В табл. 1 для разных значений межэлементных промежутков (10, 20 и 30 % линейного размера ячейки) представлены минимальные (A_{\min}), средние (A_{avg}) и максимальные (A_{\max}) значения амплитуды объектов при микросканировании и статическом накоплении (радиус равен 0). Начальная амплитуда объекта (после моделирования оптической системы) имела значение 20 отсчётов шкалы квантования. Моделирование проводилось при микросканировании с различным радиусом вращения матрицы. Значения радиуса вращения приведены в пикселах сканирующей матрицы.

Из таблицы видно, что при микросканировании увеличиваются минимальное и среднее значения амплитуды объектов. В проведённых экспериментах было зафиксировано увеличение минимального значения амплитуды до 2,6 раза, среднего — до 1,3 раза, а также установлено, что наилучшим с точки зрения повышения минимальной и средней регистрируемых амплитуд объекта является сканирование с радиусом вращения равным 1 пикселу используемой матрицы.

В табл. 2 даны значения отношения сигнал/шум при статическом накоплении и микросканировании для матриц с различным линейным размером межэлементного промежутка. В процессе моделирования к регистрируемым изображениям добавлялся шум таким образом, чтобы значение СКО шума σ при статическом накоплении равнялось единице. При этих же входных воздействиях измерялось значение СКО шума после микросканирования σ^{ms} . В таблице приведены соответствующие отношения для минимальной, средней и максимальной амплитуд объекта для статического накопления и микросканирования (радиусом вращения равным 1 пикселу регистрирующей матрицы).

Из таблицы видно, что отношение минимального значения амплитуды объекта к СКО шума увеличилось до 1,86 раза, а отношение среднего значения уменьшилось до 1,18 раза. При этом для 10 %-ного межэлементного промежутка отношение среднего значения амплитуды объекта к СКО шума возрастает в 1,02 раза.

Полученные экспериментальные данные показывают, что применение предложенного алгоритма увеличивает минимальное и среднее значения амплитуды наблюдаемого объек-

Таблица 2

Межэлементный промежуток, %	σ	A_{\min}/σ	A_{avg}/σ	A_{\max}/σ	σ^{ms}	$A_{\min}^{\text{ms}}/\sigma^{\text{ms}}$	$A_{\text{avg}}^{\text{ms}}/\sigma^{\text{ms}}$	$A_{\max}^{\text{ms}}/\sigma^{\text{ms}}$
10	1,0	3,94	7,99	11,04	1,14	7,34	8,14	9,13
20	1,0	3,8	6,67	9,31	1,31	5,83	6,30	6,73
30	1,0	2,29	5,29	7,72	1,52	3,95	4,50	5,08

та. Кроме того, при рассмотренном способе синтеза изображения высокого разрешения наряду с увеличением среднего значения амплитуды возрастает и СКО случайного шума. В результате отношение минимального значения амплитуды объекта к СКО шума, которое и определяет в основном вероятность пропуска объекта, увеличивается, а отношение среднего значения амплитуды к СКО шума может уменьшиться.

Заключение. Вследствие проведённых экспериментов установлено, что использование предложенного алгоритма приводит к повышению минимального и среднего значений амплитуды наблюдаемого объекта, а также увеличивает отношение минимального значения амплитуды объекта к СКО шума, что подтверждает перспективность применения микросканирования при разработке систем обнаружения малоразмерных объектов. В то же время полученные численные данные показали необходимость создания алгоритмов восстановления изображения с учётом изменения случайной помехи для повышения отношения среднего значения амплитуды к СКО шума. Кроме того, при микросканировании объект имеет стабильную форму, которую можно будет использовать в алгоритме обнаружения. Разработка таких алгоритмов с учётом формы объекта, характерной для рассмотренного режима микросканирования и алгоритма восстановления, является одним из направлений дальнейших исследований в рамках данной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г.** Некоторые пути совершенствования тепловизионных систем // Специальная техника. 2004. № 2. С. 11–19.
2. **Cabanski W., Breiter R., Mauk K.-H.** Miniaturized high performance staring thermal imaging system // Proc. SPIE. 2000. **4028**. P. 208–219.
3. **Pat. 5774179 US.** Method and system for fast microscanning /P. Chevrette, J. Fortin. Publ. 1998.
4. **Wiltse J. M., Miller J. L.** Imagery improvements in staring infrared imagers by employing subpixel microscan // Opt. Eng. 2005. **44**, N 5. 056401.
5. **Hardie R. C., Barnard K. J., Bognar J. G. et al.** High-resolution image reconstruction from a sequence of rotated and translated frames and its application to an infrared imaging system // Opt. Eng. 1998. **37**, N 1. P. 247–260.
6. **Fanning J. D., Reynolds J. P.** Target identification performance of superresolution versus dither // Proc. SPIE. 2008. **6941**. 69410N.
7. **Иванов В. А., Киричук В. С.** Модель инерционного фотоприёмного устройства для анализа пороговой чувствительности в задаче обнаружения движущегося точечного объекта // Автометрия. 2013. **49**, № 1. С. 3–10.
8. **Yousef A., Li J., Karim M. A.** Mathematical model development of super-resolution image Wiener restoration // Opt. Eng. 2012. **51**, N 3. 037007.
9. **Yousef A. M., Rahman Z., Karim M.** On the restoration of the microscanned images captured from unmanned airborne vehicles // Proc. SPIE. 2011. **8056**. 80560D.

10. **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.
11. **Косых В. П.** Коррекция импульсного отклика системы видеорегистрации при накоплении серии взаимно смещенных изображений // Автометрия. 2009. **45**, № 5. С. 3–8.
12. **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.
13. **Lopez-Martinez J. L., Kober V.** Fast image restoration algorithm based on camera microscanning // Proc. SPIE. 2009. **7443**. 74431O.
14. **Lopez-Martinez J. L., Kober V.** Accuracy of image restoration using microscanning image system // Proc. SPIE. 2011. **8135**. 81351F.

Поступила в редакцию 30 марта 2015 г.
