

**АЛГОРИТМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ
ДВИЖУЩИХСЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ
В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

В. С. Киричук, В. П. Косых, Т. Курманбек уулу

*Институт автоматизи и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: ilimelim@gmail.com*

Предлагается алгоритм обнаружения в последовательности изображений малоразмерных объектов, движущихся с известным вектором скорости, но неизвестными первоначальными положениями. Для подавления случайного шума применяется четырехканальная фильтрация, которая основывается на оценивании субпиксельных координат объектов в последовательности изображений. Приводятся результаты численных экспериментов зависимости вероятности обнаружения от уровней ложных тревог для разных размеров объекта и уровней входного шума.

Ключевые слова: обнаружение объектов, малоразмерные объекты, адаптивная фильтрация, многоканальная фильтрация, накопление изображений.

Введение. В данной работе рассматривается задача обнаружения движущихся с известной скоростью малоразмерных объектов, размеры которых соизмеримы с размером элемента фотоприемного устройства (ФПУ). На плоскости матрицы ФПУ регистрируемые сигналы от малоразмерных объектов имеют различную форму, зависящую от положения центра объекта относительно центра элемента ФПУ. Для надежного обнаружения таких объектов требуется адаптивный фильтр, который подстраивается под текущую форму сигнала от объекта. В работе [1] был предложен алгоритм адаптивной фильтрации, основанный на методе максимального правдоподобия. Как показали численные эксперименты [1], адаптивная фильтрация по сравнению с пространственно-инвариантной фильтрацией дает значительное увеличение отношения сигнал/шум (при попадании центра объекта на край элемента ФПУ до 1,5 раза, при попадании в угол элемента ФПУ почти в 2 раза), а также позволяет оценить координаты объекта с субпиксельной точностью даже для сравнительно малого отношения сигнал/шум входного изображения. Такой алгоритм требует значительных вычислительных затрат, поскольку субпиксельные координаты объекта оцениваются итерационным способом.

Вместо итерационной подстройки адаптивного фильтра для каждого положения объекта можно построить множество фильтров и затем выполнить процедуры многоканальной фильтрации [2, 3]. В [2] изложена лишь идея

многоканальной фильтрации, детального исследования и экспериментального моделирования проведено не было. В работе [3] используется набор согласованных фильтров для каждой возможной формы изображения объекта. Однако на практике такой подход не применим из-за вычислительной сложности, поскольку для обнаружения объекта необходимо каждый дискретный узел изображения обработать всем набором фильтров. Поэтому целесообразно ограничиться небольшим количеством фильтров.

Исходя из исследований, выполненных в работе [1], был реализован алгоритм четырехканальной фильтрации [4], где фильтр предлагается настраивать только на четыре положения объекта: в центре, на краях и в угловой точке элемента ФПУ. По сравнению с адаптивной фильтрацией такая процедура, во-первых, требует меньшего количества вычислительных операций при незначительном ухудшении качества фильтрации, во-вторых, может быть легко выполнена в целочисленной арифметике, что немаловажно при ее аппаратной реализации. Основной выигрыш достигается за счет исключения итерационной процедуры оценивания субпиксельных координат исследуемого объекта. В работе [5] экспериментально показано, что использование четырехканальной фильтрации по сравнению с пространственно-инвариантной фильтрацией в задаче обнаружения малоразмерных объектов по одному изображению дает более высокую вероятность обнаружения.

Целью исследований данной работы является создание алгоритмов, повышающих вероятность обнаружения движущихся малоразмерных объектов в последовательности изображений за счет корректного накопления нескольких кадров, учитывающего субпиксельное положение объекта на каждом кадре.

Математическая модель. Если на входе оптической системы малоразмерный объект представить как дельта-функцию $\delta(x, y)$, то сигнал на выходе будет полностью определяться только ее функцией рассеяния точки (ФРТ). Оптическое изображение, проецируемое на плоскость матрицы ФПУ, имеет следующий дискретный вид:

$$D_{ij}(t) = b + A(t)f(x_i - x_0(t), y_i - y_0(t)) + \xi_{ij}, \quad (1)$$

где i, j ($i=1, \dots, N_x, j=1, \dots, N_y$) – координаты узла дискретной решетки; N_x, N_y – размер матрицы; $t=0, \dots, T$ – номер момента времени регистрации; T – количество кадров последовательности; b – постоянный фон; A – амплитуда объекта; f – форма объекта в момент времени t , определяемая ФРТ оптической системы; $x_0(t) \leq 1, y_0(t) \leq 1$ – субпиксельные координаты в момент времени t ; ξ_{ij} – случайная величина, подчиняющаяся нормальному распределению $N(0, \sigma^2)$.

Пусть объект в процессе наблюдения движется с постоянной и известной скоростью. Тогда субпиксельные координаты центра объекта меняются во времени согласно выражениям

$$x_0(t) = x_0 + v_x t; \quad y_0(t) = y_0 + v_y t, \quad (2)$$

где v_x, v_y – известные скорости объекта по соответствующим координатам.

Получив значения функции $f(x, y)$ на дискретном множестве точек (либо исходя из аналитического описания, либо в результате тестирования опти-

ческого тракта), представим ее в виде полиномиального разложения

$$f_{ij} = \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^m a_{kl} P_k(x_i) P_l(y_j),$$

где a_{kl} – коэффициенты разложения; $P_k(x)$, $P_l(y)$ – полиномы k -й и l -й степени по соответствующим координатам. В векторно-матричном представлении это разложение имеет вид

$$\mathbf{f} = \tilde{\mathbf{P}} \mathbf{a}. \quad (3)$$

Здесь \mathbf{f} – вектор, составленный из элементов f_{ij} ; $\tilde{\mathbf{P}}$ – матрица из полиномов $P_k(x_i)$, $P_l(y_j)$, при этом число отсчетов L функции f_{ij} должно быть, по крайней мере, не меньше числа коэффициентов a_{kl} .

Оценивая коэффициенты a_{kl} с помощью метода наименьших квадратов [6], получим

$$\hat{\mathbf{a}} = (\tilde{\mathbf{P}}^T \tilde{\mathbf{P}})^{-1} \tilde{\mathbf{P}}^T \mathbf{f}.$$

Матрица $(\tilde{\mathbf{P}}^T \tilde{\mathbf{P}})^{-1} q^2$ характеризует точность оценивания коэффициентов полинома, а величина $q^2 = \frac{(\mathbf{f} - \tilde{\mathbf{P}} \hat{\mathbf{a}})^T (\mathbf{f} - \tilde{\mathbf{P}} \hat{\mathbf{a}})}{L - K}$ – ошибку аппроксимации ФРТ

($K = (m+1)^2$ – число оцениваемых коэффициентов полинома). Отметим, что оценивание коэффициентов полинома является предварительной процедурой и для данного оптического тракта выполняется однократно.

Выполнив лексикографическое упорядочение отсчетов D_{ij} в области изменения i и j , выражение (1) можно представить в векторно-матричном виде

$$\mathbf{d}(t) = A(t) \mathbf{P}(x_0(t), y_0(t)) \mathbf{a} + \mathbf{b} \mathbf{e} + \Xi, \quad (4)$$

где \mathbf{d} – вектор, составленный из измерений D_{ij} ; $\mathbf{P}(x_0(t), y_0(t))$ – матрица, составленная из значений полиномов $P_k^*(i, x_0(t))$, $P_l^*(j, y_0(t))$; \mathbf{a} – вектор коэффициентов полинома; $\mathbf{e} = \left(\underbrace{1, \dots, 1}_N \right)^T$, $N = N_x \times N_y$; Ξ – вектор случайного шума.

Накопление изображений с адаптивной фильтрацией. Алгоритм накопления изображений с адаптивной фильтрацией, используемый для обнаружения объектов, заключается в следующем. Предполагая в каждом (i, j) -м элементе анализируемых двух и более последовательных кадров $t=0, \dots, K-1$ наличие объекта, находим оценки фона \hat{b} , амплитуды \hat{A} и координат центра \hat{x}_0 , \hat{y}_0 , воспользовавшись методом максимального правдоподобия, который при условии нормальности и некоррелированности шума приводит к минимизации функционала

$$J = \sum_{t=0}^{K-1} [\mathbf{d}(t) - \mathbf{b} \mathbf{e} - A(t) \mathbf{P}(x_0(t), y_0(t)) \mathbf{a}]^T [\mathbf{d}(t) - \mathbf{b} \mathbf{e} - A(t) \mathbf{P}(x_0(t), y_0(t)) \mathbf{a}].$$

Параметры b и A линейно зависят от измерений, и их оценки получаются очевидным способом. Исключая эти параметры из функционала J , приходим к минимизации функционала

$$J = \sum_{t=0}^{K-1} \left[\mathbf{d}^T(t)\mathbf{d}(t) - \frac{(\mathbf{e}^T \mathbf{d}(t))^2}{N} \right] - \frac{\sum_{t=0}^{K-1} [\mathbf{a}^T \mathbf{P}^T(x_0(t), y_0(t))\mathbf{d}(t) - \mathbf{e}^T \mathbf{P}(x_0(t), y_0(t))\mathbf{a}(\mathbf{e}^T \mathbf{d}(t))/N]^2}{\sum_{t=0}^{K-1} [\mathbf{a}^T \mathbf{P}^T(x_0(t), y_0(t))\mathbf{P}(x_0(t), y_0(t))\mathbf{a}] - \sum_{t=0}^{K-1} [\mathbf{e}^T \mathbf{P}(x_0(t), y_0(t))\mathbf{a}]^2/N}$$

по параметрам x_0, y_0 . Поскольку функционал J^* зависит от параметров x_0, y_0 неквадратично и для их оценок не существует простых аналитических выражений, его минимизация осуществляется итерационным способом. В этом случае вектор $\mathbf{P}(x_0(t), y_0(t))\mathbf{a}$ по существу является искомым адаптивным фильтром, который подстраивается под текущее положение объекта.

Далее нормированной оценкой амплитуды $Q = \hat{A}/\sigma_A$ заполняется результирующее изображение, которое затем подвергается пороговой обработке. Недостаток данного алгоритма заключается в большом объеме вычислений, что ограничивает возможности работы системы дистанционного мониторинга в реальном времени.

Накопление изображений с пространственно-инвариантной фильтрацией. Для обнаружения объекта с помощью накопления двух или более изображений $t=0, \dots, K-1$ с пространственно-инвариантной фильтрацией выполняются следующие шаги. Предполагается, что на опорном ($t=0$) изображении (первый кадр) координаты центра объекта находятся в центре элемента ФПУ (в субпиксельных координатах $x_0=0, y_0=0$). С помощью выражений (2) вычисляется возможная траектория, т. е. рассчитываются координаты объекта для всех остальных кадров последовательности t . Далее находятся целочисленные смещения объектов $\Delta x(t)=[x_0(t)]$ и $\Delta y(t)=[y_0(t)]$, после чего все изображения последовательности суммируются, сдвигаясь относительно опорного на величины $\Delta x(t), \Delta y(t)$. В результате получается суммарное изображение

$$\tilde{D}_{ij} = \sum_{t=0}^{K-1} D_{i+\Delta x(t), j+\Delta y(t)}(t), \quad \Delta x(0)=0, \Delta y(0)=0, \quad (5)$$

которое фильтруется настроенным на центр ($x_0=0, y_0=0$) элемента ФПУ пространственно-инвариантным фильтром $\mathbf{P}(x_0(t), y_0(t))\mathbf{a}$. Отфильтрованное изображение подвергается пороговой обработке. Для обнаружения объекта на втором и последующих кадрах проводятся операции, аналогичные описанным выше, каждый раз со смещением на один кадр вперед.

Накопление изображений с четырехканальной фильтрацией. В отличие от предыдущего алгоритма здесь предполагается, что на опорном изображении ($t=0$) первоначально центр объекта может находиться в одном из четырех положений: в центре элемента ФПУ ($x_0^{(1)}=0, y_0^{(1)}=0$), на краях

$(x_0^{(2)} = 0, y_0^{(2)} = 0,5), (x_0^{(3)} = 0,5, y_0^{(3)} = 0)$ или в угловой точке $(x_0^{(4)} = 0,5, y_0^{(4)} = 0,5)$. С учетом заранее известных параметров v_x, v_y объекта для каждого из четырех начальных положений также рассчитываются четыре возможные траектории с помощью выражений (2) и вычисляются целочисленные и субпиксельные смещения объекта. Для каждой из четырех траекторий строится набор фильтров $\mathbf{P}(x_0^{(k)} + v_x t, y_0^{(k)} + v_y t) \mathbf{a}, k=1, \dots, 4$, и t -е изображение последовательности фильтруется четырьмя фильтрами, соответствующими времени t . Фильтрованные изображения накапливаются в четырех суммарных изображениях

$$\tilde{D}_{ij}^{(k)} = \sum_{t=0}^{K-1} D_{i+\Delta x^{(k)}(t), j+\Delta y^{(k)}(t)}^{(k)}(t).$$

Здесь $D_{ij}^{(k)}(t)$ – изображение $D_{ij}(t)$, подвергнутое фильтрации фильтром $\mathbf{P}(x_0^{(k)} + v_x t, y_0^{(k)} + v_y t) \mathbf{a}$. Далее из четырех суммарных изображений строится результирующее изображение \tilde{D}_{ij}^{\max} путем выбора максимального значения соответствующего i, j -го элемента каждого из четырех суммарных изображений, т. е. согласно выражению

$$\tilde{D}_{ij}^{\max} = \max(\tilde{D}_{ij}^{(1)}, \tilde{D}_{ij}^{(2)}, \tilde{D}_{ij}^{(3)}, \tilde{D}_{ij}^{(4)}).$$

Затем изображение \tilde{D}_{ij}^{\max} подвергается пороговой обработке с целью обнаружения объектов, а полученные оценки вероятности обнаружения относятся к первому кадру последовательности. Для всех кадров последовательности описанная процедура накопления с четырехканальной фильтрацией повторяется со смещением на один кадр.

Экспериментальные результаты. Для исследования эффективности предложенного алгоритма была смоделирована последовательность изображений, содержащая движущийся с известной скоростью объект и некоррелированный нормальный шум с нулевым средним. Размер полученных изображений 1024×1024 элемента. Для увеличения объема выборки на каждый кадр обрабатываемой последовательности наносилось 1600 объектов. Объект

описывался гауссоидой $\frac{1}{\sqrt{2\pi r^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2r^2}}$ с $r = 0,4$ элемента. Отношение сигнал/

шум на входе фильтра равнялось 3. Накопление осуществлялось по четырем последовательным кадрам, после чего выполнялась пороговая обработка. Порог определялся по гистограмме распределения яркости локальных экстремумов на основании заранее заданной величины допустимой вероятности ложных тревог [7]. Элементы отфильтрованного изображения, в которых амплитуда превышала порог, считались подозрительными на наличие объекта.

Кроме того, был проведен эксперимент по определению предельной вероятности обнаружения (условное название). Рассматривался идеальный случай, когда на всех изображениях последовательности центры объектов всегда находились в центре элемента ФПУ, чем обеспечивалась максималь-

ная амплитуда из всех возможных, а фильтрация проводилась фильтром, согласованным с центральным положением объекта.

Зависимости экспериментально оцененных вероятностей обнаружения от заданного уровня ложных тревог показаны на рис. 1–3 (● – теоретический предел, ◆ – четырехканальная фильтрация, × – пространственно-инвариантная фильтрация).

Кривые на рис. 1, *a* соответствуют начальному положению объекта в первом кадре последовательности, совпадающему с центром элемента ФПУ, при этом вектор скорости имеет составляющие $v_x = 0,5$, $v_y = 0,5$. Из рисунка видно, что накопление с четырехканальной фильтрацией позволяет с большей вероятностью обнаруживать объект, чем накопление с пространственно-инвариантной фильтрацией. Но увеличение вероятности обнаружения составляет не более 0,05, поскольку объект во всех кадрах находится в наилучшем для четырехканальной фильтрации положении.

Когда же начальное положение объекта на первом кадре последовательности соответствовало угловой точке элемента ФПУ, а вектор скорости составлял $v_x = 1$, $v_y = 1$ (в этом случае объект на каждом кадре последовательности находился в угловой точке элемента ФПУ и поэтому имел наимень-

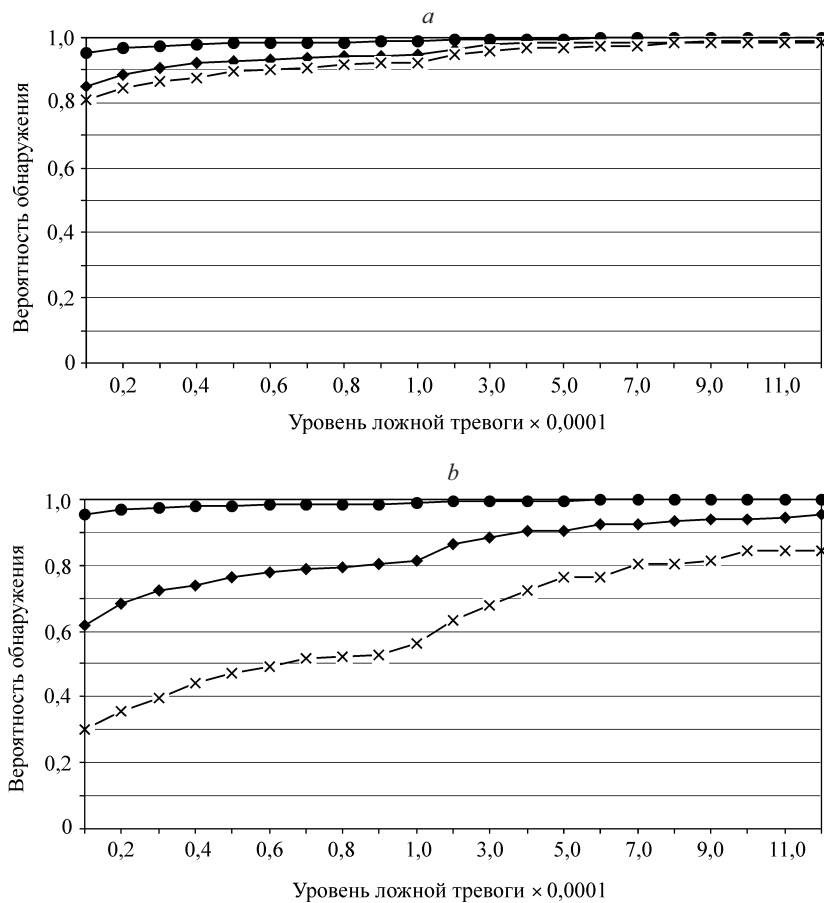


Рис. 1

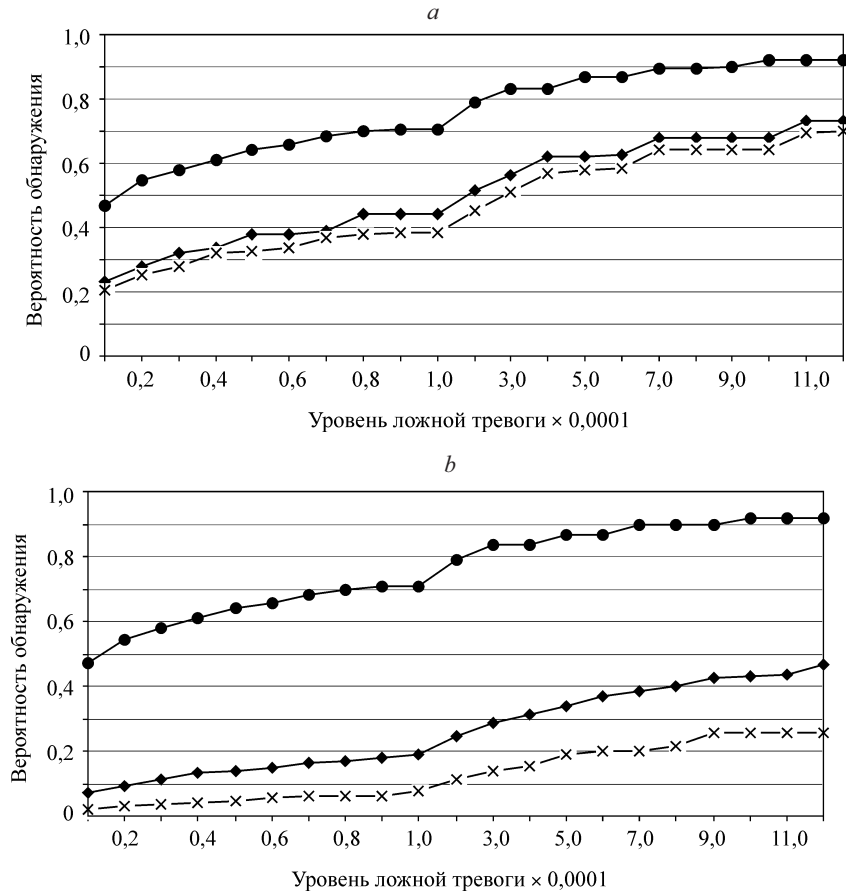


Рис. 2

шую амплитуду по сравнению с любыми другими положениями объекта), эффективность четырехканальной фильтрации существенно увеличивалась. В таком случае оценки вероятности обнаружения при накоплении с четырехканальной фильтрацией лежат в диапазоне 0,60–0,95, а при накоплении с пространственно-инвариантной фильтрацией – в диапазоне 0,30–0,85 (рис. 1, *b*). Из этого следует, что при малых уровнях ложных тревог четырехканальная фильтрация обеспечивает двухкратное увеличение вероятности обнаружения.

На рис. 2, *a, b* приведены аналогичные ситуации при наличии в ФПУ значительных межэлементных промежутков, которые составляют 20 % от шага дискретизации. Здесь также наблюдается высокая обнаружительная способность алгоритма накопления с четырехканальной фильтрацией по сравнению с накоплением с пространственно-инвариантной фильтрацией (увеличение вероятности обнаружения составляет 0,3).

Дальнейший рост вероятности обнаружения объектов возможен при увеличении количества кадров, используемых для накопления. На рис. 3, *a, b* приведены оценки вероятностей обнаруженных объектов при накоплении изображений с четырехканальной фильтрацией, когда последовательность изображений сгенерирована так, что объект смещается на 0,1 шага дискрети-

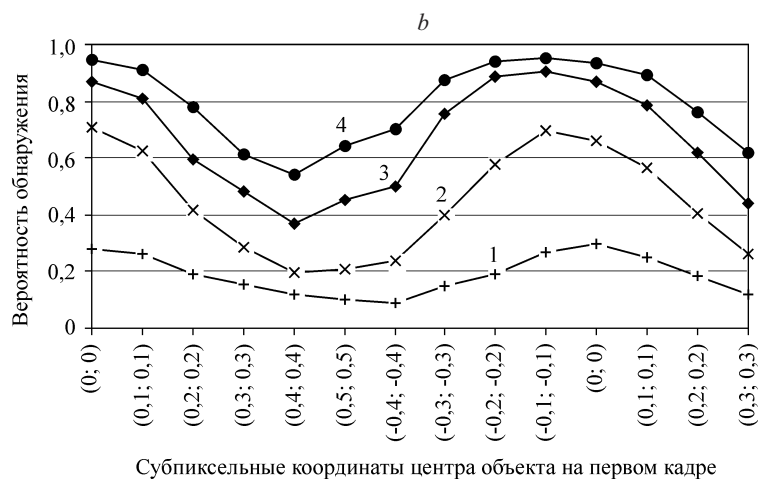
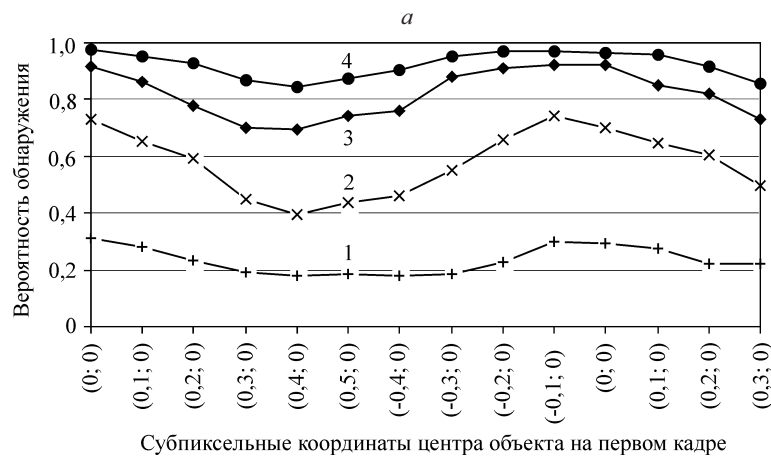


Рис. 3

зации за кадр в направлении угловой точки элемента ФПУ и на его край соответственно. Рассматривалось обнаружение объекта по одному, двум, трем и четырем кадрам (кривые 1–4). Из рисунка видно, что с увеличением количества изображений, используемых для накопления, оценки вероятности обнаружения возрастают. Наблюдается симметричность оценок, когда субпиксельные координаты объекта находятся в следующем элементе ФПУ.

Заключение. Результаты, полученные при численном моделировании, показали, что предлагаемый в данной работе алгоритм накопления с четырехканальной фильтрацией даже для малого отношения полезного сигнала к шуму обеспечивает более высокую вероятность обнаружения по сравнению с накоплением с пространственно-инвариантной фильтрацией. Как и следовало ожидать, накопление с четырехканальной фильтрацией обеспечивает более высокую вероятность обнаружения, чем четырехканальная фильтрация без накопления. Тем самым подтверждается целесообразность применения четырехканальной фильтрации в задаче обнаружения движущихся малогабаритных объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Киричук В. С., Косых В. П., Курманбек уулу Т.** Адаптивная фильтрация с субпиксельным оцениванием координат точечных объектов // Автометрия. 2006. **42**, № 1. С. 3–12.
2. **Киричук В. С.** Многоканальная линейная фильтрация // Автометрия. 1988. № 3. С. 84–87.
3. **Kosykh V. P.** Subpixel estimating coordinates of point targets // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-7-2004). St. Peterburg: SPbETU, 2004. Vol. 3. P. 744–747.
4. **Курманбек уулу Т.** Модификация алгоритма адаптивной фильтрации изображений точечных объектов // Автометрия. 2007. **43**, № 1. С. 44–48.
5. **Киричук В. С., Курманбек уулу Т.** Обнаружение точечных объектов с помощью модифицированного алгоритма адаптивной фильтрации // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент. Астана: Изд-во ЕНУ, 2006. Том 2. С. 266–270.
6. **Рао С. Р.** Линейные статистические методы и их применения. М.: Наука, 1968.
7. **Бакут П. А., Колмогоров Г. С., Ворновицкий И. Э.** Сегментация изображений: методы пороговой обработки // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. № 10. С. 6–24.

Поступила в редакцию 29 сентября 2008 г.