

УДК 004.932.2

ОСОБЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ФОРМИРУЕМЫХ МАТРИЧНЫМ ПРИЁМНИКОМ

В. А. Иванов¹, **В. С. Киричук**^{1,2}, **В. П. Косых**^{1,2},
В. В. Синельщиков³

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

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

³*ОАО «Корпорация "Комета"»,
115280, Москва, ул. Велозаводская, 5
E-mail: kosych@iae.nsk.su*

Проведён анализ эффективности обнаружения точечных объектов в изображениях, полученных с помощью фотоприёмной матрицы. Показано, что эффективность обнаружения зависит как от способа обработки изображения, так и от соотношения между размерами элементов матрицы, межэлементных промежутков и функции рассеяния точки оптической системы, формирующей изображение. Приведены результаты вычислительного эксперимента, показывающие существование оптимальных соотношений между этими параметрами.

Ключевые слова: матричный фотоприёмник, обнаружение точечных объектов, адаптивная фильтрация, фоточувствительный элемент, функция рассеяния точки.

DOI: 10.15372/AUT20160202

Введение. Матричные фотоприёмники в настоящее время — один из основных типов регистрирующих приборов в оптико-электронных системах видеонаблюдения, в том числе специального назначения. Характерной особенностью матричных «смотрящих» приборов является принципиальная невозможность пространственной дискретизации регистрируемого изображения с шагом меньше размера фоточувствительного элемента (ФЧЭ) приёмника. Когда основное применение прибора — обнаружение точечных объектов, выбор соотношения между размером изображения объекта и размером ФЧЭ определяется обычно необходимостью обеспечить максимальное отношение сигнал/шум (С/Ш) [1–3]. Под точечным здесь понимается объект, размер изображения которого в плоскости фотоприёмника сопоставим с размером ФЧЭ, а форма распределения освещённости задаётся в основном функцией рассеяния точки (ФРТ) оптической системы. При этом форма и амплитуда регистрируемых сигналов от таких объектов зависят от положения их изображений относительно элементов матрицы, вследствие чего эффективность обнаружения определяется не только максимальным отношением С/Ш, но и видом так называемой пеленгационной характеристики (ПХ) прибора [4]. Обоснование выбора оптимального соотношения размеров ФРТ и ФЧЭ с учётом изменчивости сигнала предложено в [5]. Детальному исследованию различных способов линейной фильтрации для обнаружения регистрируемых матричным приёмником точечных объектов и построения оптимального в среднем фильтра при условии равновероятного расположения объектов относительно фоточувствительного элемента посвящена работа [6]. Альтернативный вариант обработки — адаптивная фильтрация, когда фильтр подстраивается под форму объекта на основе оценки его положения, рассмотрен в [7].

Целью данной работы является исследование зависимости эффективности обнаружения точечных объектов в изображении, регистрируемом матричным фотоприёмником, от соотношения между размером изображения объекта и размером и шагом фоточувствительных элементов приёмника с учётом возможностей последующей обработки.

Постановка задачи. В процессе регистрации непрерывное входное изображение объектов сначала подвергается свёртке с ФРТ оптической системы, а затем накапливается в дискретно расположенных фоточувствительных элементах приёмника. Отсчёт изображения, содержащего K объектов, зарегистрированный i, j -м элементом приёмника, описывается выражением

$$D(i, j) = \sum_{m=1}^K A_m O_m(bi - x_m, bj - y_m) + \xi(i, j), \quad (1)$$

где b — шаг размещения ФЧЭ в матрице (здесь и далее шаг по обеим координатам предполагается одинаковым); $\xi(i, j)$ — некоррелированный шум с дисперсией σ^2 ; A_m — входная амплитуда объекта, определяемая энергетическим потоком, падающим от него на фотоприёмник; $O_m(x - x_m, y - y_m)$ — модель дискретного изображения объекта, геометрический центр которого имеет непрерывные координаты (x_m, y_m) .

Модель дискретного изображения точечного объекта, геометрический центр которого проектируется оптической системой в ФЧЭ с координатами (k, l) , можно представить выражением

$$O(i, j; \varepsilon, \delta) = \int_{bj - a/2}^{bj + a/2} \int_{bi - a/2}^{bi + a/2} h(x - bk - \varepsilon, y - bl - \delta) dx dy,$$

где a — линейный размер ФЧЭ; ε, δ — дробные смещения геометрического центра изображения объекта относительно центра ФЧЭ в пределах элемента ($|\varepsilon|, |\delta| < b/2$); $h(x, y) \geq 0$ — ФРТ оптической системы. Сохранение энергии, падающей от объекта на приёмник, обеспечивается выполнением условия

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) dx dy = 1.$$

Процедура обнаружения объектов состоит в проверке в скользящем по всему изображению окне Ω простой гипотезы $H_0: A = 0$ против её альтернативы $H_1: A > 0$, т. е. в получении в окне оценки амплитуды объектов и сравнении её с заданным порогом, определяемым вероятностью ложной тревоги. Эффективность обработки будем характеризовать минимальной входной амплитудой объекта, обнаруживаемого с вероятностью не ниже P_d при заданной вероятности ложной тревоги P_f . В связи с зависимостью формы и амплитуды сигнала от положения объекта рассмотрим два варианта определения минимальной амплитуды.

1. Интегральная оценка амплитуды для совокупности объектов при условии, что геометрические центры объектов с равной вероятностью могут занимать любое допустимое положение относительно центра ФЧЭ. При этом по всей совокупности объектов вероятность обнаружения будет не ниже заданной.

2. Оценка амплитуды объекта при условии, что его регистрация осуществляется в наихудших условиях (минимаксная оценка). Такой вариант гарантирует вероятность обнаружения не ниже заданной при любом положении объекта.

Область применения этих оценок определяется текущей задачей: при обнаружении статистически представительной совокупности объектов рационально использовать интегральную оценку, а при необходимости контролировать разовые появления объектов более оправдано применение минимаксной оценки.

Задача заключается в выяснении влияния соотношения между размером ФЧЭ, шагом матрицы, характерным размером ФРТ и способа обработки данных на эффективность обнаружения объектов, а также в выборе параметров, обеспечивающих минимальную вероятность пропуска.

Оценка амплитуды объекта. Оценим амплитуды объектов, воспользовавшись методом наименьших квадратов (МНК), в предположении, что объекты в (1) по кадру разнесены достаточно далеко и их взаимное влияние друг на друга отсутствует. В этом случае оценка амплитуды объекта находится минимизацией по параметрам A, ε, δ функционала

$$J = \sum_{i,j \in \Omega} \{D(i,j) - AO(i,j;\varepsilon,\delta)\}^2.$$

В векторно-матричном виде функционал J принимает вид

$$J = \{\mathbf{d} - \mathbf{Ao}(\varepsilon, \delta)\}^T \{\mathbf{d} - \mathbf{Ao}(\varepsilon, \delta)\}. \quad (2)$$

Здесь векторы \mathbf{d} и $\mathbf{o}(\varepsilon, \delta)$ получены некоторым упорядочением отсчётов области Ω .

Оптимальные в смысле МНК оценки параметров получаются из решения системы уравнений

$$\frac{\partial J}{\partial A} = 0; \quad \frac{\partial J}{\partial \varepsilon} = 0; \quad \frac{\partial J}{\partial \delta} = 0. \quad (3)$$

Из решения первого (линейного) уравнения имеем оценку амплитуды m -го объекта

$$\hat{A}_m = \mathbf{d}^T \mathbf{o}(\hat{\varepsilon}_m, \hat{\delta}_m) / \mathbf{o}^T(\hat{\varepsilon}_m, \hat{\delta}_m) \mathbf{o}(\hat{\varepsilon}_m, \hat{\delta}_m), \quad (4)$$

а оценки дробных смещений $\hat{\varepsilon}_m, \hat{\delta}_m$ определяются из решения системы двух последних (нелинейных) уравнений (3).

Нижняя граница дисперсии оценки \hat{A} получается при условии, что смещения ε_m, δ_m известны (согласованный фильтр):

$$\sigma_A^2 = \frac{\sigma^2}{\mathbf{o}^T(\varepsilon_m, \delta_m) \mathbf{o}(\varepsilon_m, \delta_m)}. \quad (5)$$

При оценивании ε_m, δ_m из двух последних уравнений (3) дисперсия оценки амплитуды несколько увеличивается и приобретает вид

$$\sigma_A^2 = \sigma^2 \left[\mathbf{o}^T \mathbf{o} - \frac{(\mathbf{o}^T \mathbf{x})^2 \mathbf{y}^T \mathbf{y} + (\mathbf{o}^T \mathbf{y})^2 \mathbf{x}^T \mathbf{x} - 2(\mathbf{o}^T \mathbf{x})(\mathbf{o}^T \mathbf{y})(\mathbf{x}^T \mathbf{y})}{(\mathbf{x}^T \mathbf{x})(\mathbf{y}^T \mathbf{y}) - (\mathbf{x}^T \mathbf{y})^2} \right]^{-1}, \quad (6)$$

$$\text{где } \mathbf{o} = \mathbf{o}(\varepsilon = \hat{\varepsilon}_m, \delta = \hat{\delta}_m); \quad \mathbf{x} = \left. \frac{\partial \mathbf{o}}{\partial \varepsilon} \right|_{\varepsilon = \hat{\varepsilon}_m, \delta = \hat{\delta}_m}; \quad \mathbf{y} = \left. \frac{\partial \mathbf{o}}{\partial \delta} \right|_{\varepsilon = \hat{\varepsilon}_m, \delta = \hat{\delta}_m}.$$

Построение фильтра с оцениванием смещения из уравнений (3) в каждой точке изображения (адаптивная фильтрация) — задача, достаточно трудоёмкая в вычислительном плане [7]. Альтернативой этому решению могут быть следующие варианты.

1. Пренебрежение зависимостью формы объекта от его положения, что приводит к замене в функционале (2) модели объекта $\mathbf{o} = \mathbf{o}(\varepsilon, \delta)$ не зависящей от ε, δ моделью $\mathbf{o} = \tilde{\mathbf{o}}$. В этом случае импульсный отклик фильтра принимает вид

$$\mathbf{f} = \tilde{\mathbf{o}}/\tilde{\mathbf{o}}^T \tilde{\mathbf{o}}, \quad (7)$$

оценка амплитуды —

$$\hat{A}_m = \mathbf{d}^T \tilde{\mathbf{o}}/\tilde{\mathbf{o}}^T \tilde{\mathbf{o}}, \quad (8)$$

а дисперсия оценки —

$$\sigma_A^2 = \sigma^2/(\tilde{\mathbf{o}}^T \tilde{\mathbf{o}}). \quad (9)$$

В частности, в качестве модели может быть взята $\tilde{\mathbf{o}} = \mathbf{o}(0, 0)$ — форма дискретного изображения объекта, проецируемого в центр ФЧЭ.

2. Многоканальная фильтрация [5, 8, 9], которая фактически сводится к приближённому решению системы уравнений (3) посредством выбора оценок дробного смещения $\hat{\varepsilon}, \hat{\delta}$ из конечного набора допустимых значений. В работах [8, 10] на основе численного эксперимента показано, что в условиях, когда характерный размер объекта сравним с шагом матрицы, максимизация функционала (2) выбором $\hat{\varepsilon}, \hat{\delta}$ всего из четырёх вариантов $\{0, 0; 0, b/2; b/2, 0; b/2, b/2\}$ обеспечивает оценивание амплитуды объекта с дисперсией, близкой к (6).

Функция, характеризующая зависимость в дискретном изображении (1) отношения сигнал/шум от положения объекта на ФЧЭ, имеет вид

$$R(\varepsilon, \delta) = \frac{A}{\sigma} \max_{i, j \in \Omega} \{O(i, j; \varepsilon, \delta)\} = \frac{A}{\sigma} U(\varepsilon, \delta).$$

По аналогии с радиолокацией характеристику оптико-электронного прибора $U(\varepsilon, \delta)$ принято называть пеленгационной [4, 11]. Для рассмотренных выше оценок амплитуды объекта определим через отношение С/Ш пеленгационную характеристику на выходе соответствующего фильтра как

$$R(\varepsilon, \delta) = \frac{E\{\hat{A}\}}{\sigma_A} = \frac{A}{\sigma} U(\varepsilon, \delta).$$

С учётом (4)–(9) для согласованного фильтра ПХ примет вид

$$U(\varepsilon, \delta) = \sqrt{\mathbf{o}^T(\varepsilon, \delta)\mathbf{o}(\varepsilon, \delta)}, \quad (10)$$

для адаптивного фильтра —

$$U(\varepsilon, \delta) = \left[\mathbf{o}^T \mathbf{o} - \frac{(\mathbf{o}^T \mathbf{x})^2 \mathbf{y}^T \mathbf{y} + (\mathbf{o}^T \mathbf{y})^2 \mathbf{x}^T \mathbf{x} - 2(\mathbf{o}^T \mathbf{x})(\mathbf{o}^T \mathbf{y})(\mathbf{x}^T \mathbf{y})}{(\mathbf{x}^T \mathbf{x})(\mathbf{y}^T \mathbf{y}) - (\mathbf{x}^T \mathbf{y})^2} \right]^{1/2}, \quad (11)$$

а для фильтра с приближённой моделью $\mathbf{o} = \tilde{\mathbf{o}}$, не зависящей от смещений ε, δ , —

$$U(\varepsilon, \delta) = \frac{\mathbf{o}^T(\varepsilon, \delta)\tilde{\mathbf{o}}}{\sqrt{\tilde{\mathbf{o}}^T \tilde{\mathbf{o}}}}. \quad (12)$$

Эффективность обнаружения. В предположении нормальности шума до и после фильтрации отношение С/Ш $R = E\{\hat{A}\}/\sigma_A$ подчиняется распределению

$$p_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right),$$

если справедлива гипотеза H_0 , или распределению

$$p_1(z; A, \sigma, \varepsilon, \delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(z - AU(\varepsilon, \delta)/\sigma)^2}{2}\right],$$

если справедлива гипотеза H_1 , и в этом случае, как следует из (10)–(12), зависит от дробных смещений. Порог обнаружения T , обеспечивающий заданную вероятность ложных тревог, определяется соотношением

$$\int_T^\infty p_0(z) dz = P_f. \quad (13)$$

Значение минимальной амплитуды объекта обусловлено выбранным видом оценки. Для минимаксной оценки эта амплитуда находится из уравнения

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_T^\infty \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(z - \frac{A_d}{\sigma} \min_{\varepsilon, \delta} U(\varepsilon, \delta)\right)\right]^2\right\} dz = P_d, \quad (14)$$

а для интегральной — из уравнения

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_\Theta w(U) \int_T^\infty \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(z - \frac{A_d}{\sigma} U\right)\right]^2\right\} dz dU = P_d, \quad (15)$$

где $w(U)$ — плотность распределения U ; Θ — область возможных значений U .

Вычислительный эксперимент. Цель вычислительного эксперимента состояла в получении количественных оценок зависимости эффективности обнаружения точечного объекта от соотношений размера объекта, размера ФЧЭ, расстояния между соседними элементами приёмника и способа обработки входных данных. Непрерывная функция, определяющая изображения объекта, задавалась в виде гауссоиды

$$h(x, y; r) = \frac{1}{2\pi r^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r^2}\right), \quad (16)$$

которая в вычислительных экспериментах часто используется в качестве модели ФРТ оптической системы [1, 2, 4, 5].

На первом этапе эксперимента размер ФРТ r в (16) был выбран так, что энергия, падавшая на ФЧЭ единичного размера, составляла 80 % от всей энергии точечного объекта, центр которого совпадал с центром элемента.

Влияние способа обработки на пеленгационную характеристику. В табл. 1 приведены значения ПХ при различных ε, δ , характеризующие отношение С/Ш в исходном изображении и после применения различных режимов фильтрации. Шаг матрицы равен размеру ФЧЭ (межэлементные промежутки в фотоприёмнике пренебрежимо малы по сравнению с

Таблица 1

Пеленгационные характеристики

Без обработки (исходный кадр)							После согласованной фильтрации						
ε	$\delta = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$						ε	$\delta = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$					
0,0	0,86	0,84	0,79	0,71	0,59	0,46	0,0	0,86	0,85	0,80	0,74	0,68	0,66
0,1	0,84	0,83	0,78	0,69	0,58	0,45	0,1	0,85	0,83	0,79	0,73	0,67	0,64
0,2	0,79	0,78	0,73	0,65	0,55	0,43	0,2	0,80	0,79	0,75	0,69	0,63	0,61
0,3	0,71	0,69	0,65	0,58	0,49	0,38	0,3	0,74	0,73	0,69	0,64	0,59	0,56
0,4	0,59	0,58	0,55	0,49	0,41	0,32	0,4	0,68	0,67	0,63	0,59	0,54	0,52
0,5	0,46	0,45	0,43	0,38	0,32	0,25	0,5	0,66	0,64	0,61	0,56	0,52	0,50
После центральной фильтрации $\tilde{\mathbf{o}} = \mathbf{o}(0, 0)$							После четырёхканальной фильтрации						
ε	$\delta = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$						ε	$\delta = 0,0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$					
0,0	0,86	0,85	0,80	0,71	0,61	0,48	0,0	0,86	0,73	0,67	0,64	0,63	0,66
0,1	0,85	0,83	0,78	0,70	0,59	0,47	0,1	0,73	0,64	0,59	0,55	0,54	0,55
0,2	0,80	0,78	0,74	0,66	0,56	0,44	0,2	0,67	0,59	0,54	0,51	0,49	0,51
0,3	0,71	0,70	0,66	0,59	0,50	0,40	0,3	0,64	0,55	0,51	0,48	0,47	0,48
0,4	0,61	0,59	0,56	0,50	0,43	0,34	0,4	0,63	0,54	0,49	0,47	0,46	0,48
0,5	0,48	0,47	0,44	0,40	0,34	0,27	0,5	0,66	0,55	0,51	0,48	0,48	0,50

размером ФЧЭ). Ввиду центральной симметрии модели (16) представлены данные только для положительных значений ε, δ .

Из таблицы следует, что в исходном изображении, формируемом приёмником, отношение С/Ш сильно зависит от положения объекта: при перемещении объекта из центра ФЧЭ в угол оно падает более чем в 3 раза.

После согласованной фильтрации (смещения ε, δ известны) ситуация могла бы значительно улучшиться: отношение С/Ш уменьшается менее чем в 1,8 раза. Адаптивная фильтрация с оцениванием смещений приводит к некоторому ухудшению отношения С/Ш. При этом максимальное и минимальное отношения С/Ш остаются такими же, как и при согласованной фильтрации.

Использование фильтра, единого для всех положений объекта, не даёт заметного положительного эффекта. Рассматривались три фильтра. Фильтр, настроенный на объект, расположенный в центре элемента, приводит к повышению отношения С/Ш незначительному относительно исходного — максимум на 8 % для объекта, расположенного в углу ФЧЭ (после центрального фильтра). Экзотический фильтр с центром между соседними по диагонали элементами даёт, что естественно, значимое увеличение отношения С/Ш в углу элемента (до $0,5A/\sigma$), но существенно ослабляет его в центре элемента (практически в 2 раза). Несколько лучшие значения обеспечивает усреднённый фильтр:

$$\tilde{\mathbf{o}} = \frac{1}{b^2} \int_{-b/2}^{b/2} \int_{-b/2}^{b/2} \mathbf{o}(\varepsilon, \delta) d\varepsilon d\delta.$$

Минимальное отношение С/Ш повышается с $0,25A/\sigma$ до $0,38A/\sigma$ и при этом значимо меньше по сравнению с адаптивным фильтром во всех остальных положениях.

Анализ пеленгационной характеристики четырёхканального фильтра показывает, что по отношению С/Ш такой фильтр практически не уступает адаптивному, имея преимущество в простоте реализации.

Таблица 2

**Эффективность различных режимов обработки
(фотоприёмник без межэлементных промежутков)**

Параметры обнаружения	Исходный	Согласованный	Адаптивный	Центральный	Угловой	Усреднённый	Четырёхканальный
A_{mm}	23,64	11,82	11,82	21,89	12,74	17,80	11,82
A_{int}	11,62	9,05	10,76	11,19	12,06	10,35	9,49
P_m	0,1	0,0131	0,0813	0,0841	0,2239	0,0540	0,0234

Влияние режима обработки на эффективность обнаружения. Эффективность обнаружения характеризовалась минимальной амплитудой объектов, выявленных при уровне шума $\sigma = 1$ с вероятностью ложной тревоги $P_f = 10^{-5}$ и вероятностью пропуска $P_m = 1 - P_d = 0,05$ в исходном изображении и после всех рассмотренных видов фильтрации (такие значения P_f и P_m свойственны задачам, где высока цена ложной тревоги).

Табл. 2 содержит данные об эффективности обнаружения при разных режимах обработки: исходный — без обработки; согласованный — после согласованной фильтрации; адаптивный — после адаптивной фильтрации; центральный — после фильтрации, настроенной на объект, проецируемый в центр ФЧЭ; угловой — после фильтрации, настроенной на объект, находящийся в позиции $(b/2, b/2)$; усреднённый — после фильтрации, полученной путём усреднения изображений объекта по всем возможным позициям; четырёхканальный — после фильтрации, выбирающей одну из четырёх позиций объекта: $\{(0, 0); (0, b/2); (b/2, 0); (b/2, b/2)\}$. В первой строке (A_{mm}) таблицы приведены рассчитанные согласно выражениям (13) и (14) амплитуды объектов, обнаруживаемых в наихудшей для выбранного режима обработки позиции. Во второй строке даны рассчитанные согласно выражениям (13) и (15) для интегральных оценок амплитуды (A_{int}) объектов, обнаруживаемых при равновероятном их размещении в пределах ФЧЭ.

Естественно, что наилучшим режимом является согласованная фильтрация, обеспечивающая снижение минимальной оценки амплитуды обнаруживаемого объекта более чем в 2 раза (11,82 σ против 23,64 σ в исходном изображении). Важно, что по этой оценке такую же эффективность дают адаптивный и четырёхканальный фильтры. Эффективность интегральной оценки, наиболее близкую к согласованному фильтру, также обеспечивает четырёхканальный фильтр. У всех фильтров, не предполагающих подстройки под положение объекта, эффективность заметно ниже.

Третья строка таблицы показывает, как изменяется от режима фильтрации вероятность пропуска P_m объекта (по минимаксной оценке), если его амплитуда на исходном изображении соответствует вероятности пропуска $P_m = 0,1$. Четырёхканальный фильтр обеспечивает минимальную по сравнению с другими фильтрами (за исключением согласованного) вероятность пропуска.

Наличие в реальных матричных приёмниках межэлементных промежутков существенно ухудшает эффективность обнаружения. Для межэлементного промежутка, составляющего 10 % от размера ФЧЭ, значения обнаруживаемых амплитуд в зависимости от используемой процедуры обработки сигналов приведены в табл. 3. Значения амплитуд, соответствующих минимаксной оценке, увеличились на 35–40 % практически для всех видов обработки. При этом наилучшие результаты, помимо согласованной, даёт четырёхканальная фильтрация. Эффективность адаптивного фильтра хуже ($A = 17,80\sigma$ и $A = 15,78\sigma$) из-за увеличения дисперсии оценок смещений, получаемых из уравнений (3). Из третьей строки таблицы следует, что применение четырёхканального фильтра позволяет умень-

Таблица 3

**Эффективность различных режимов обработки
(фотоприёмник с межэлементными промежутками)**

Параметры обнаружения	Исходный	Согласованный	Адаптивный	Центральный	Угловой	Усреднённый	Четырёхканальный
A_{mm}	32,12	16,06	17,80	31,10	16,06	25,47	16,06
A_{int}	13,63	10,78	15,78	13,42	14,40	12,45	11,38
P_m	0,1	0,0249	0,3637	0,0945	0,2765	0,0691	0,0397

шить вероятность пропуска более чем в 2 раза по сравнению с обнаружением объекта в исходном изображении.

Зависимость эффективности обнаружения от размера ФРТ. На этом этапе эксперимента были рассчитаны оценки минимальной амплитуды объекта, обнаруживаемого согласно минимаксной оценке при различных способах обработки и различных размерах ФРТ (параметр r в (16) изменялся в диапазоне 0,23–0,68 размера ФЧЭ; как и в предыдущем эксперименте, $\sigma = 1$). Результаты расчёта для фотоприёмника с шагом матрицы, равным размеру ФЧЭ, приведены на рис. 1. Из графиков следует, что во всём рассматриваемом диапазоне наилучшей эффективностью обладает четырёхканальный фильтр, значительно более низкой — усреднённый и центральный. Причём если для адаптивного и четырёхканального фильтров (графики 4 и 5), как и при обнаружении в исходном сигнале (график 1), выгодно иметь ФРТ малого размера, то для центрального и усреднённого фильтров (графики 2 и 3) оптимальный размер ФРТ лежит в диапазоне $r \approx 0,40$ – $0,50$.

Зависимость минимальной амплитуды обнаруживаемого объекта от размеров ФРТ для фотоприёмника с 10-процентными межэлементными промежутками иллюстрирует рис. 2 (обозначения графиков см. на рис. 1). В этом случае амплитуда объектов, обнаруживаемых на исходном изображении и после адаптивного и четырёхканального фильтров, принимает минимальное значение в промежутке $0,4 < r < 0,45$, тогда как для центрально-

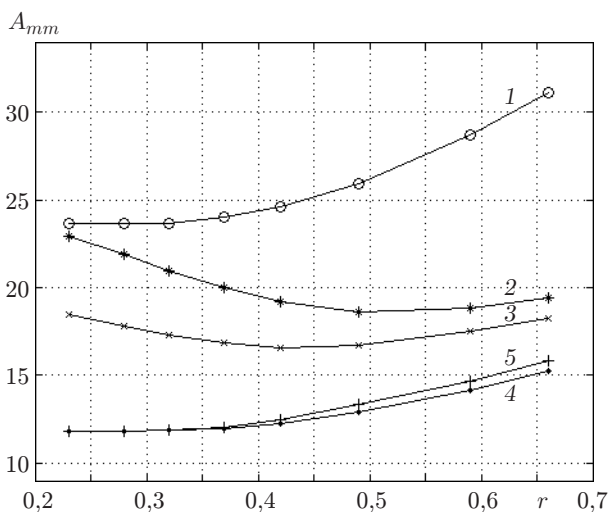


Рис. 1. Минимальная обнаруживаемая амплитуда для фотоприёмника без межэлементных промежутков

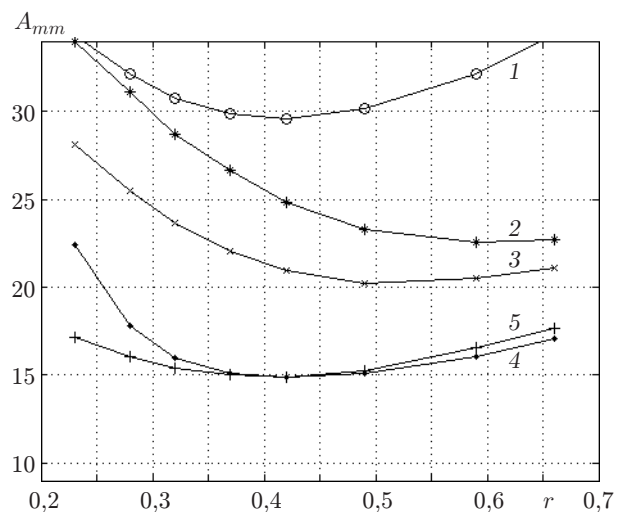


Рис. 2. Минимальная обнаруживаемая амплитуда для фотоприёмника с межэлементными промежутками

го и усреднённого фильтров минимум смещается к большим размерам ФРТ ($r \approx 0,5-0,6$). Следует отметить резкое ухудшение эффективности адаптивного фильтра при малом размере ФРТ (график 4).

Минимальная амплитуда обнаруживаемого объекта, рассчитанная в соответствии с интегральной оценкой, монотонно повышается с увеличением размера ФРТ при всех способах обработки, кроме адаптивной фильтрации, эффективность которой при малых размерах ФРТ резко ухудшается, особенно для фотоприёмника с межэлементными промежутками. Асимптотически при увеличении размера ФРТ эффективность обнаружения при всех способах обработки сходится к эффективности обнаружения после центрального фильтра.

Заключение. Показано, что существенным фактором при поиске точечных объектов в изображениях, формируемых матричным фотоприёмным устройством, является зависимость формы сигнала от положения изображения объекта относительно центра фоточувствительного элемента. Классические методы фильтрации единственным фильтром дают в этих условиях существенно меньшую эффективность обнаружения, чем адаптивный или четырёхканальный фильтр. Применение таких фильтров обеспечивает обнаружение объектов с амплитудой в 2 раза меньше, чем при пороговой обработке исходного изображения, и примерно в 1,3 раза меньше, чем после фильтра, согласованного с усреднённым изображением объекта.

Для матрицы без межпиксельных промежутков увеличение размеров ФРТ приводит к ухудшению эффективности обнаружения при квазиоптимальных способах обработки (адаптивный и четырёхканальный фильтры) и, как следовало ожидать, асимптотически стремится к эффективности центрального фильтра.

Выявлена зависимость эффективности обнаружения от соотношения между размерами ФЧЭ, межэлементных промежутков фотоприёмника и ФРТ оптической системы, формирующей изображение. Для межэлементных промежутков меньше 10 % от размера ФЧЭ обнаружено существование оптимального соотношения r между размерами ФЧЭ и ФРТ. Соотношение зависит от размера промежутков, применяемого способа обработки и лежит в диапазоне $0,4 < r < 0,6$.

Интегральная оценка амплитуды обеспечивает значимо большую эффективность, чем минимаксная, при этом выигрыш составляет свыше 20 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Winik К. А.** Cramer — Rao lower bounds on the performance charged-coupled-device optical position estimator // JOSA A. 1986. **3**, N 11. P. 1809–1815.
2. **Березин В. В., Цыцулин А. К.** Обнаружение и оценивание координат изображений точечных объектов в задачах астронавигации и адаптивной оптики // Вестн. ТОГУ. 2008. № 1(8). С. 11–20.
3. **Винецкий Ю. Р., Герасимов И. В.** Как выбирать размер пиксела ИК-матрицы тепловизора при произвольной функции рассеяния оптической системы // Тр. 22 Междунар. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: НПО «Орион», 2012. С. 85–86.
4. **Гридин А. С., Дмитриев И. Ю., Васильев В. Н.** Влияние пеленгационных характеристик и разброса чувствительности элементов фотоприёмника на распределение пороговой чувствительности оптико-электронного прибора // Тр. VII Междунар. конф. «Прикладная оптика-2006». С.-Пб.: ГИТМО (ТУ), 2007. Т. 1. С. 139–144.
5. **Фираго В. А.** Определение оптимального радиуса гауссовой функции рассеяния объектива при обнаружении точечных объектов системами с дискретным представлением изображения // Вестн. БГУ. Сер. 1. Физика. Математика. Информатика. 2006. № 1. С. 28–33.

6. **Samson V., Champagnat F., Giovannelli J.-F.** Point target detection and subpixel position estimation in optical imagery // *Appl. Opt.* 2004. **43**, N 2. P. 257–263.
7. **Киричук В. С., Косых В. П., Курманбек уулу Т.** Адаптивная фильтрация с субпиксельным оцениванием координат точечных объектов // *Автометрия.* 2006. **42**, № 1. С. 3–12.
8. **Киричук В. С., Косых В. П.** Построение многоканального фильтра для обнаружения точечных объектов в изображении, формируемом матричным приёмником // *Автометрия.* 2012. **48**, № 5. С. 82–92.
9. **Горохин В. Н., Крашенинников В. Р., Ташлинский А. Г.** Конвейерная система обнаружения малоразмерных объектов // *Распознавание образов и анализ изображений: новые информационные технологии (РОАИ-2-95): Тез. докл. 2-й Всеросс. с участием стран СНГ конф.* Ульяновск: УлГТУ, 1995. Ч. 3. С. 76–77.
10. **Курманбек уулу Т.** Модификация алгоритма адаптивной фильтрации изображений точечных объектов // *Автометрия.* 2007. **43**, № 1. С. 44–48.
11. **Козлов К. В., Соляков В. Н., Кузнецов П. А. и др.** Исследование частотных характеристик многоуровневого МФПУ с режимом ВЗН // *Успехи прикладной физики.* 2014. **2**, № 5. С. 528–538.

Поступила в редакцию 2 июня 2015 г.
