

УДК 004.932.2

СОГЛАСОВАННАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ, СОДЕРЖАЩИХ ПОСТОЯННУЮ ПРОСТРАНСТВЕННУЮ ПОМЕХУ

© Г. И. Громилин, В. П. Косых, Н. С. Яковенко

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: kosych@iae.nsk.su*

В работе рассматривается влияние пространственной неоднородности фотоэлектрических характеристик матричного фотоприёмного устройства (ФПУ) на качество обнаружения малоразмерных объектов в формируемом им изображении. Показано, что в условиях пространственно-неоднородного шума ФПУ традиционно применяемая двухточечная коррекция не является оптимальной для последующей согласованной фильтрации изображения, выполняемой с целью повышения надёжности обнаружения объектов. Предложен двухэтапный алгоритм построения линейного пространственно-инвариантного согласованного фильтра, обеспечивающего значительное повышение надёжности обнаружения слабых малоразмерных объектов на фоне некоррелированного шума в изображениях, содержащих помеху, обусловленную пространственной неоднородностью характеристик ФПУ.

Ключевые слова: матричные ФПУ, пространственная неоднородность фотоэлектрических характеристик, обнаружение малоразмерных объектов, надёжность обнаружения.

DOI: 10.15372/AUT20200415

Введение. Обнаружение малоразмерных объектов в изображениях, формируемых матричными фотоприёмными устройствами инфракрасного диапазона (ИК ФПУ), играет важную роль в задачах дистанционного зондирования Земли как гражданского, так и военного применения. Под малоразмерными подразумеваются объекты, размеры и форма изображений которых определяются функцией рассеяния точки (ФРТ) оптического канала ФПУ, которая зависит от параметров оптической системы, формирующей изображение на поверхности фотоприёмника, рассеяния света в фоточувствительном слое и топологии фоточувствительных элементов (ФЧЭ). К таким объектам, в частности, относятся практически все локальные около- и наземные источники излучения, регистрируемые космическими системами дистанционного зондирования Земли.

Одним из факторов, снижающих качество обнаружения, является пространственная неоднородность таких фотоэлектрических характеристик ФПУ, как уровень темновых сигналов, уровень шума ФЧЭ и чувствительность, проявляющаяся в формируемых изображениях в виде неизменной (или чрезвычайно медленно меняющейся) во времени пространственной помехи, маскирующей полезный сигнал. Традиционный способ повышения качества изображения, созданного таким приёмником, состоит в предварительной калибровке и последующей коррекции темновых сигналов и чувствительности ФЧЭ. Наиболее часто применяемая двухточечная коррекция [1] базируется на линейной модели формирования сигнала ФЧЭ в виде

$$s_{ij} = k_{ij}d_{ij} + c_{ij}.$$

Здесь d_{ij} — освещённость ij -го элемента (полезный сигнал), c_{ij} , k_{ij} — его темновой сигнал и чувствительность соответственно.

В процессе калибровки с применением образцового источника тестового освещения (как правило, равномерного) оцениваются и запоминаются параметры каждого ФЧЭ фотоприёмника \hat{c}_{ij} и \hat{k}_{ij} и скорректированный выходной сигнал представляется в виде

$$\hat{s}_{ij} = (s_{ij} - \hat{c}_{ij}) / \hat{k}_{ij}.$$

Достоинство этого метода заключается в его простоте и низких вычислительных затратах. К недостаткам относятся необходимость время от времени повторять процесс калибровки и коррекции из-за временного дрейфа параметров ФПУ и потребность в большом объеме памяти для хранения массивов \hat{c}_{ij} и \hat{k}_{ij} . Второй из недостатков становится существенным в сканирующих ФПУ, где в качестве фотоприёмников применяются линейки ФЧЭ, в т. ч. многорядные [2]. В более сложных способах двухточечной коррекции источника тестового освещения не применяются, а оценки параметров \hat{c}_{ij} и \hat{k}_{ij} вычисляются на основе анализа текущих изображений сцены, регистрируемых при разных ракурсах наблюдения, которые реализуются за счёт сканирования [3] или за счёт естественного смещения изображений, формируемых приёмником, размещённым на подвижной платформе [4–7]. Двухточечная коррекция в таком виде улучшает зрительное восприятие изображений, но не является оптимальной для задачи обнаружения сигналов от слабых малоразмерных объектов, наблюдаемых на постоянном фоне (такой режим характерен для ночного наблюдения Земли через безоблачную атмосферу) в сопровождении шума, основным источником которого являются элементы фотоприёмника, поскольку не учитывает пространственной неоднородности шума. Темой данной работы является исследование влияния пространственной неоднородности фотоэлектрических параметров матричного фотоприёмника на качество обнаружения малоразмерных объектов, регистрируемых в присутствии постоянного фона и случайного некоррелированного шума, генерируемого элементами приёмника, и её оптимальная по качеству обнаружения коррекция.

Постановка задачи. Пусть на площади ij -го ФЧЭ формируется освещённость

$$e_{ij} = a o_{ij} + b, \quad (1)$$

где o_{ij} — форма сигнала от объекта, определяемая ФРТ оптического канала ФПУ; a — интенсивность излучения объекта; b — равномерный фон. Элемент ij фотоприёмника формирует сигнал

$$s_{ij} = k_{ij} e_{ij} + c_{ij} + \xi_{ij} = a k_{ij} o_{ij} + k_{ij} b + c_{ij} + \xi_{ij}.$$

Здесь ξ_{ij} — некоррелированный случайный шум с нулевым средним и дисперсией σ_{ij}^2 (подстрочные индексы у дисперсии указывают на различие уровня шума разных ФЧЭ).

После того, как в результате двухточечной калибровки получены оценки \hat{c}_{ij} и \hat{k}_{ij} , постоянный фон в каждом текущем кадре можно, пренебрегая вкладом от объектов, оценить как

$$\hat{b} \approx \sum_{i,j} (s_{ij} - \hat{c}_{ij}) / \sum_{i,j} \hat{k}_{ij}$$

и получить сигнал без темновой и фоновой компонент:

$$s'_{ij} = a k_{ij} o_{ij} + k_{ij} (b - \hat{b}) + c_{ij} - \hat{c}_{ij} + \xi_{ij} \approx a k_{ij} o_{ij} + \xi_{ij}, \quad (2)$$

который и будет представлять предмет дальнейшего анализа. Заметим, что по данным двухточечной калибровки, по которым вычисляются оценки \hat{c}_{ij} и \hat{k}_{ij} , может быть вычислена и оценка σ_{ij}^2 . Задача работы заключается в построении линейного фильтра, обеспечивающего наивысшую вероятность обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги в скорректированном таким образом изображении.

Согласованная фильтрация при пространственной неоднородности чувствительности и уровня шума ФПУ. Если выполнена предварительная коррекция темновой и фоновой составляющих и в окрестности Ω_{ij} ij -го элемента содержится изображение объекта, то ФЧЭ, принадлежащие этой окрестности, сформируют сигналы

$$s'_{i+m,j+n} = ak_{i+m,j+n}o_{mn} + \xi_{i+m,j+n}, \quad m, n \in \Omega_{ij},$$

и результатом линейной фильтрации будет сигнал

$$\tilde{s}_{ij} = a \sum_{m,n} k_{i+m,j+n} o_{mn} f_{mn} + \sum_{m,n} \xi_{i+m,j+n} f_{mn}, \quad (3)$$

где f_{mn} — весовые коэффициенты фильтра, действующего на окрестность Ω_{ij} .

Строго говоря, для построения оптимального фильтра, обеспечивающего наилучшее в соответствии с избранным критерием качество обнаружения, необходимо точное знание функций распределения шума и структурной помехи, но поскольку в реальных условиях это практически не реализуемо, коэффициенты фильтра выберем так, чтобы на выходе максимизировать отношение сигнал/шум (С/Ш). Для этого достаточно знания вышеуказанных характеристик сигнала, шума и помехи.

Из (3) следует, что амплитуда полезного сигнала в точке ij имеет вид

$$A_{ij} = a \sum_{m,n} k_{i+m,j+n} o_{mn} f_{mn},$$

дисперсия шума (при условии, что входной шум некоррелирован)

$$\tilde{\sigma}_{ij}^2 = \sum_{m,n} \sigma_{i+m,j+n}^2 f_{mn}^2,$$

а отношение С/Ш, определённое как $A_{ij}/\tilde{\sigma}_{ij}$, —

$$\text{SNR}_{ij} = a \sum_{m,n} k_{i+m,j+n} o_{mn} f_{mn} / \left(\sum_{m,n} \sigma_{i+m,j+n}^2 f_{mn}^2 \right)^{1/2}. \quad (3')$$

Нетрудно проверить, что максимального значения (3') достигает при

$$f_{mn} = \frac{k_{i+m,j+n}}{\sigma_{i+m,j+n}^2} o_{mn} \quad (4)$$

(похожий результат, но без выделения чувствительности в качестве отдельного параметра, приведён в [8]). Поскольку коэффициенты фильтра определены с точностью до скалярного множителя, при постоянных значениях чувствительности и уровня шума ($k_{ij} = k$, $\sigma_{ij} = \sigma$), фильтр (4) переходит в классический согласованный фильтр для «белого» шума (см., например, [9, п. 19.4]):

$$f_{mn} = o_{mn}. \quad (5)$$

Для общего случая (4) отношение С/Ш принимает вид

$$\text{SNR}_{ij} = a \left(\sum_{m,n} \frac{k_{i+m,j+n}^2}{\sigma_{i+m,j+n}^2} o_{mn}^2 \right)^{1/2}, \quad (4')$$

а для постоянных значений чувствительности и уровня шума —

$$\text{SNR} = \frac{ak}{\sigma} \left(\sum_{m,n} o_{mn}^2 \right)^{1/2}. \quad (5')$$

Если же чувствительность и уровень шума изменяются от канала к каналу, а применяется пространственно-инвариантный фильтр (5), то

$$\text{SNR}_{ij} = a \sum_{m,n} k_{i+m,j+n} o_{mn}^2 / \left(\sum_{m,n} \sigma_{i+m,j+n}^2 o_{mn}^2 \right)^{1/2}. \quad (6)$$

Выражение (4) на первый взгляд свидетельствует о том, что при наличии пространственной неравномерности в чувствительности и уровне собственного шума ФЧЭ фильтр, максимизирующий отношение С/Ш, становится пространственно-зависимым и его прямое применение приводит к существенному увеличению вычислительных затрат. Заметим, однако, что следующие друг за другом двухточечная коррекция (2), выравнивающая чувствительность всех ФЧЭ, и фильтрация пространственно-инвариантным фильтром (5) также могут быть представлены как применение пространственно-неинвариантного фильтра

$$f_{mn} = \frac{1}{k_{i+m,j+n}} o_{mn} \quad (7)$$

с отношением С/Ш

$$\text{SNR}_{ij} = a \sum_{m,n} o_{mn}^2 / \left(\sum_{m,n} \frac{\sigma_{i+m,j+n}^2}{k_{i+m,j+n}^2} o_{mn}^2 \right)^{1/2}. \quad (7')$$

Соответственно и использование фильтра (4) можно представить в виде двухэтапной процедуры: предварительного поэлементного умножения исходного сигнала ij -го ФЧЭ на множитель $k_{i+m,j+n}/\sigma_{i+m,j+n}^2$ и последующей свёртки полученного изображения с пространственно-инвариантным фильтром (5), что существенно упрощает вычисления.

Завершающим этапом процедуры обнаружения является сравнение полученного после фильтрации сигнала с порогом, который определяется избранным критерием обнаружения. Как следует из (3'), в присутствии пространственно-неоднородной помехи дисперсия шума на выходе любого из фильтров (4), (5) или (7) также оказывается пространственно-зависимой. В частности, на выходе фильтра (4) будем иметь

$$\tilde{\sigma}_{ij}^2 = \sum_{m,n} \frac{\sigma_{i+m,j+n}^2}{k_{i+m,j+n}^2} o_{mn}^2.$$

Поэлементное умножение результата фильтрации на коэффициенты $\tilde{\sigma}_{ij}^{-1}$ обеспечивает пространственную независимость порога обнаружения. Заметим, что эти коэффициенты могут быть вычислены для каждого ФЧЭ заранее по результатам калибровки.

Таким образом, алгоритм фильтрации, обеспечивающий наиболее высокое отношение С/Ш в изображениях малоразмерных объектов на постоянном фоне, искажённых известной (оценённой в результате калибровки) пространственно-неоднородной помехой, сводится к следующим шагам:

- подавление постоянного фона посредством преобразования (2);
- поэлементное умножение изображения на коэффициенты $k_{i+m,j+n}/\sigma_{i+m,j+m}^2$;
- свёртка с фильтром (5);
- поэлементное умножение результата фильтрации на коэффициенты $\tilde{\sigma}_{ij}^{-1}$.

Экспериментальная проверка алгоритма фильтрации. Наиболее экономичным по необходимым вычислительным ресурсам является применение предлагаемого алгоритма к изображениям, формируемым сканирующими ФПУ, состоящими из многорядных фотоприёмников, таких, например, как [10]. Для них в отличие от «смотрящих» ФПУ требуются сравнительно небольшие объёмы таблиц корректирующих коэффициентов. Проверка алгоритма заключается в сравнении рабочих характеристик [11, п. 2.2.2] обнаружителя, использующего различные варианты коррекции, предшествующей фильтрации, при одних и тех же значениях амплитуды подлежащих обнаружению объектов, параметрах шума и пространственно-неоднородной помехи. Для расчёта рабочих характеристик выполнен вычислительный эксперимент, состоящий в имитационном моделировании представительной серии зашумлённых изображений объектов, сопровождаемых пространственно-неоднородной помехой, последующей их фильтрации фильтрами (4), (5) и (7), и подсчёте обнаруженных при различных порогах локальных максимумов. Моделирование выполнено с применением программных средств [12] и заключается в формировании сканирующей линейкой с фоточувствительными элементами, обладающими различной чувствительностью и разным уровнем собственного шума, изображений сцены, содержащей в заданных координатах множество объектов известной формы.

Зависимость чувствительности и уровня шума от номера ФЧЭ реализована при моделировании в виде

$$k_i = k(1 + \kappa_i), \quad \sigma_i = \sigma(1 + \varepsilon_i),$$

где κ_i и ε_i — независимо распределённые случайные величины с нулевым средним значением, удовлетворяющие условию $|\kappa_i| < 1$, $|\varepsilon_i| < 1$.

Вероятности обнаружения ($P_{\text{обн}}$) и ложной тревоги ($P_{\text{лт}}$) оценивались по количеству превысивших заданный порог локальных максимумов в серии тестовых изображений после фильтрации:

$$P_{\text{обн}} = \frac{nob_{\text{обн}}}{Nob}, \quad P_{\text{лт}} = \frac{nbг}{Nbg}.$$

Здесь Nob — количество объектов в серии (известно), $nob_{\text{обн}}$ — количество превысивших порог локальных максимумов в области, объединяющей малые окрестности всех объектов (при моделировании эта область известна), Nbg — полное количество локальных максимумов фона вне окрестностей объектов, $nbг$ — количество превысивших порог локальных максимумов фона вне окрестностей объектов. Достоверность построенных характеристик обеспечена большим объёмом моделируемых данных: в каждом эксперименте серия состояла из 1000 изображений форматом 1024×1024 отсчёта, содержащих по 1560 малоразмерных объектов, равномерно размещённых по всем столбцам изображений, сформированным разными фоточувствительными элементами.

Разброс чувствительности и уровня шума ИК ФПУ. Для матричных и линейчатых приёмников ИК-диапазона характерны достаточно большие значения разброса чувствительности и уровня шума ФЧЭ. Так, в матричном ИК-приёмнике [13] разброс чувствительности составляет $\pm 35\%$ от среднего значения (характер распределения не указан), в крупноформатной матрице ИК-диапазона [14] среднеквадратичное отклонение (СКО) чувствительности составляет примерно 10% , а СКО уровня шума — примерно 15%

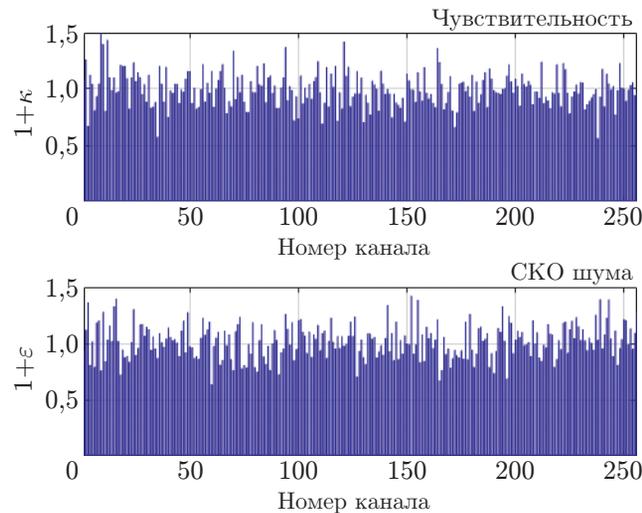


Рис. 1. Зависимость значений чувствительности и СКО шума от номера канала сканирующего ФПУ

от их средних значений при близких к нормальному распределений этих параметров. В многорядных ИК ФПУ, представленных в [15], СКО чувствительности составляет 5 % от номинального значения. Поэтому в обсуждаемом эксперименте неравномерность чувствительности и уровня шума моделировалась в виде последовательности независимых случайных величин с двумя типами распределений: равномерным с размахом $\pm 25\%$ и нормальным с СКО, равным 15 % от среднего значения. На рис. 1 представлены фрагменты равномерного распределения чувствительности и СКО шума по каналам в одной из модельных реализаций сканирующего ФПУ.

Форма изображений объектов при моделировании задана функцией

$$o_{ij} = \exp\left(-\frac{i^2 + j^2}{2r^2}\right),$$

которая является достаточно хорошим приближением ФРТ, обусловленной дифракцией и aberrациями оптической системы, рассеянием света в фоточувствительном слое и топологией ФЧЭ. Как показано в [16], при формировании матричным фотоприёмником изображения объекта с фиксированной энергией излучения размер r , обеспечивающий наиболее надёжное обнаружение после согласованной фильтрации, должен лежать в пределах 0,4–0,6 от шага дискретизации, равного расстоянию между центрами ФЧЭ. В сканирующих ФПУ на основе многорядных фотоприёмников шаг дискретизации может быть меньше расстояния между элементами. Так, шаг дискретизации в ФПУ [10] вдвое меньше расстояния между ФЧЭ и, в принципе, может быть сделан ещё меньше за счёт добавления рядов. Поэтому в эксперименте рабочие характеристики обнаружителя строились для размеров изображений объектов $r = 1$ и $r = 1,5$ шага дискретизации.

Исходное отношение C/Π ak/σ выбиралось таким образом, чтобы при вероятности ложной тревоги, лежащей в диапазоне $10^{-5} < P_{лт} < 10^{-4}$, можно было сопоставить эффективность фильтров вида (4), (5) и (7) при малых ($P_{обн} < 0,5$), средних ($0,5 < P_{обн} < 0,8$) и сравнительно высоких ($P_{обн} > 0,8$) значениях вероятности обнаружения. В качестве эталона рассчитывались также рабочие характеристики пространственно-инвариантного фильтра (5) при постоянных значениях чувствительности и уровня шума ($k_i = k$, $\sigma_i = \sigma$).

На рис. 2 приведены рабочие характеристики действующих в присутствии пространственно-неоднородной помехи обнаружителей, основанных на фильтрах: кривые

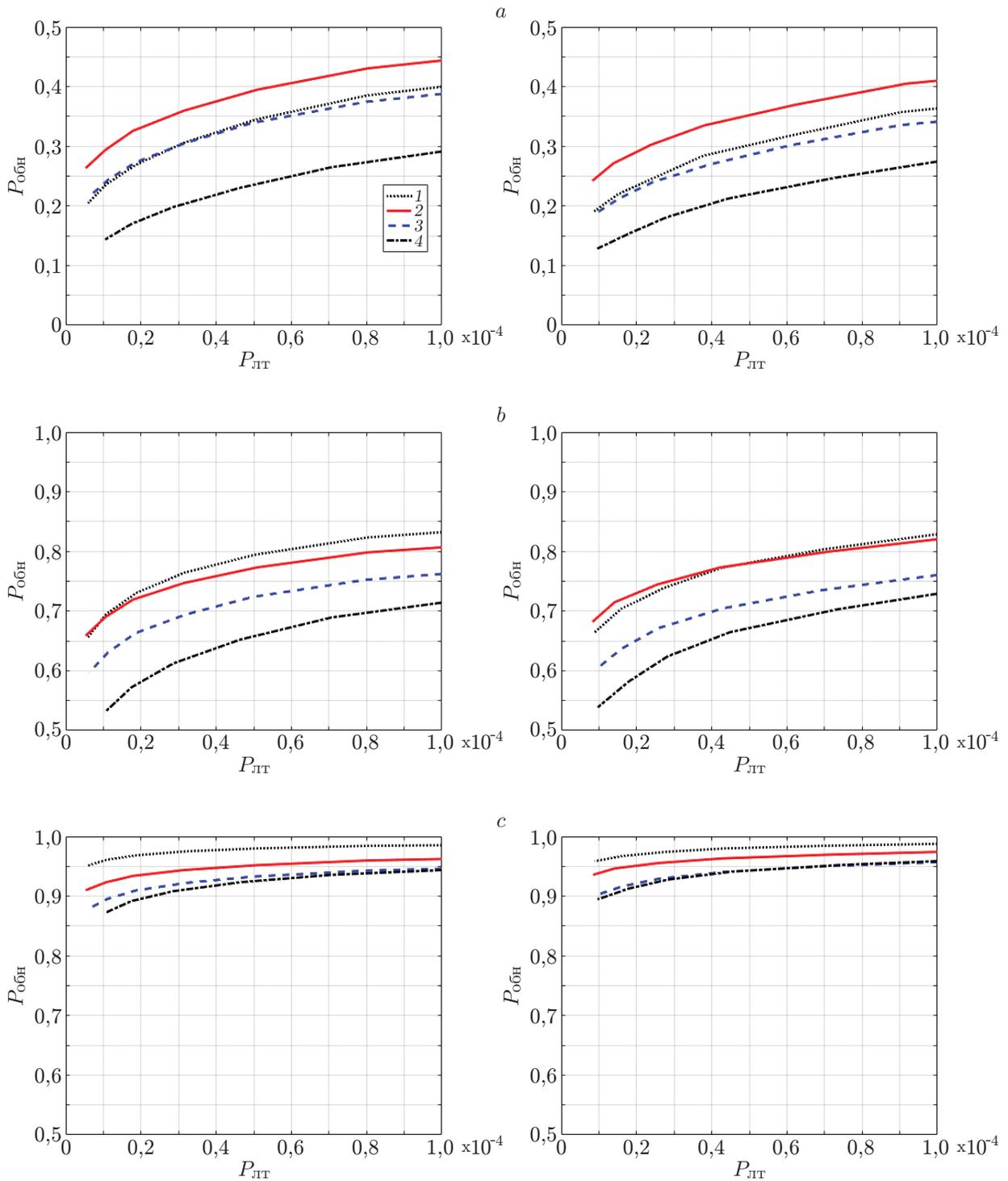


Рис. 2. Рабочие характеристики обнаружителей малоразмерных объектов, основанных на различных фильтрах при разных отношениях C/Π в исходных изображениях: слева — для объектов с $r = 1,0$, справа — для объектов с $r = 1,5$; *a* — для низких, *b* — для средних, *c* — для высоких вероятностей обнаружения

2 — на предлагаемом фильтре (4), 3 — на фильтре (7), учитывающем только неравномерность чувствительности, 4 — на фильтре (5), игнорирующем неоднородность чувствительности и уровня шума. Кривая 1 — эталонная рабочая характеристика обнаружителя с фильтром (5) при не зависящих от номера ФЧЭ значениях чувствительности и уровня шума. Эти характеристики показывают, что предлагаемый способ коррекции-фильтрации, учитывающий не только пространственную неоднородность чувствительности, но и неоднородность уровня шума, обеспечивает более эффективное обнаружение слабых малоразмерных объектов, чем фильтрация после коррекции только чувствительности, тогда как применение пространственно-инвариантного фильтра (5) без учёта пространственной неоднородности фотоэлектрических параметров ФПУ приводит к значительному снижению качества обнаружения. При фиксированной вероятности ложной тревоги с ростом отношения С/Ш различия в вероятности обнаружения при разных способах фильтрации, как и следовало ожидать, уменьшаются, но соотношения $P_{\text{обн } 2} > P_{\text{обн } 3}$ и $P_{\text{обн } 2} > P_{\text{обн } 4}$ сохраняются (цифры соответствуют номеру кривой на графиках).

Заключение. В работе исследовано влияние пространственной неоднородности фотоэлектрических параметров ИК ФПУ на качество обнаружения слабых малоразмерных объектов в формируемых ими изображениях. Предложен новый алгоритм обработки изображений, учитывающий пространственную неоднородность шума ФЧЭ и сводящийся за счёт правильного порядка процедур коррекции неоднородности к пространственно-инвариантной фильтрации. Результаты вычислительного эксперимента подтверждают, что предлагаемый алгоритм обеспечивает более высокую эффективность обнаружения объектов, чем применение согласованного с формой объекта фильтра после традиционной двухточечной коррекции чувствительности.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственная регистрация № АААА-А17-117052410034-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Helfrich R.** Programmable compensation technique for staring arrays // SPIE. 1979. **178**. P. 110–121.
2. **Бочков В. Д., Дrajников Б. Н., Кузнецов П. А. и др.** Пространственно-временное преобразование информации в многорядных матричных ФПУ // Успехи прикладной физики. 2014. **2**, № 1. С. 71–76.
3. **Борзов С. М., Козик В. И., Потатуркин О. И.** Коррекция тепловизионных изображений на основе статистической обработки реальных данных // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. **52**, № 6. С. 11–17.
4. **Hardie R. C., Hayat M. M., Armstrong E., Yasuda B.** Scene-based nonuniformity correction with video sequences and registration // Appl. Opt. 2000. **39**, N 8. P. 1241–1250.
5. **Zuo Ch., Chen Q., Gu G., Sui X.** Scene-based nonuniformity correction algorithm based on interframe registration // JOSA A. 2011. **28**, N 6. P. 1164–1176.
6. **Bhavana D., Rajesh V., Ravi Tej D. et al.** Scene based two-point nonuniformity correction of thermal images // Intern. Journ. Eng. and Technol. 2013. **5**, N 2. P. 1748–1755.
7. **Rong Sh.-H., Zhou H.-X., Qin H.-L. et al.** Guided filter and adaptive learning rate based non-uniformity correction algorithm for infrared focal plane array // Infrar. Phys. & Technol. 2016. **76**. P. 691–697.
8. **Дражников Б. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А., Соляков В. Н.** Анализ эффективности пространственной фильтрации сигналов на выходе фотоприёмного устройства с режимом временной задержки и накопления // Успехи прикладной физики. 2015. **3**, № 6. С. 566–572.

9. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982. 790 с.
10. Кузнецов П. А., Моцев И. С., Сало В. В., Кошанцев Н. Ф. Фотоприёмные модули с режимом ВЗН для мониторинга земной поверхности в ИК-диапазоне // Успехи прикладной физики. 2014. **2**, № 6. С. 635–638.
11. Ван Трис Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции. М.: «Сов. радио», 1972. 744 с.
12. Громилин Г. И., Иванов В. А., Косых В. П., Попов С. А. Особенности процесса сканирования с использованием матричного фотоприёмника в режиме ВЗН // Вычислительные технологии. 2016. **21**, № 1. С. 60–89.
13. Предеин А. В., Сидоров Ю. Г., Сабина И. В. и др. Высококачественные длинноволновые инфракрасные ФПУ формата 320×256 элементов на основе слоёв CdHgTe, выращенных методом МЛЭ // Автометрия. 2013. **49**, № 5. С. 78–85.
14. Базовкин В. М., Варавин В. С., Васильев В. В. и др. Мегапиксельное матричное фотоприёмное устройство среднего ИК-диапазона // Успехи прикладной физики. 2018. **6**, № 6. С. 501–505.
15. Яковлева Н. И., Болтарь К. О., Никонов А. В., Егоров А. В. Многорядные фотоприёмные устройства на основе гетероэпитаксиальных структур HgCdTe коротковолнового ИК-диапазона спектра // Успехи прикладной физики. 2017. **5**, № 3. С. 265–270.
16. Иванов В. А., Киричук В. С., Косых В. П., Синельщиков В. В. Особенности обнаружения точечных объектов в изображениях, формируемых матричным приёмником // Автометрия. 2016. **52**, № 2. С. 10–19. DOI: 10.15372/AUT20160202.

Поступила в редакцию 15.04.2020

После доработки 25.05.2020

Принята к публикации 01.06.2020
