

УДК 621.383  
EDN: IXKXZS

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp



## Влияние шумов ВЗН-каналов на вероятность обнаружения малоразмерных объектов многорядными сканирующими фотоприемными устройствами

В. В. Абилов, В. А. Стрельцов

*Исследовано влияние аномальных по спектральной плотности мощности шума (СПМШ) ВЗН-каналов на вероятность обнаружения малоразмерных объектов сканирующими многорядными фотоприемными устройствами (ФПУ). Сгенерированы серии выходных изображений ФПУ, имитирующих сигналы ВЗН-каналов с 4 основными типами СПМШ, рассчитана вероятность обнаружения малоразмерного объекта и произведена оценка эффективности применения различных комбинаций линейных фильтров, применяемых во внутрикадровой обработке. Установлено, что ВЗН-каналы с низкочастотным шумом наиболее значительно влияют на вероятность обнаружения малоразмерного объекта, а последовательное применение адаптивного рекурсивного фильтра и квазисогласованного с сигналом оконного фильтра увеличивает её на 22 % даже при наличии 6 % аномальных ВЗН-каналов в ФПУ.*

**Ключевые слова:** многорядное фотоприёмное устройство, обнаружение малоразмерных объектов, аномальные ВЗН-каналы, неоднородность спектральной плотности мощности ВЗН-каналов.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-55-62

### Введение

Современные многорядные фотоприемные устройства (ФПУ) широко применяются для регистрации слабых оптических сигналов в ИК-диапазоне спектра [1–3]. Применение

таких ФПУ в сканирующей оптико-электронной системе позволяет достичь высокой равномерности пеленгационной характеристики при регистрации малоразмерных объектов (МО) [3], а за счет применения режима временной задержки и накопления (ВЗН) снижаются требования к дефектности фоточувствительных элементов (ФЧЭ) и повышается отношение сигнал/шум на выходе прибора. Режим сканирования, путём составления гибридных линеек из большого числа отдельных фотомодулей (ФМ), даёт возможность обеспечить большие форматы видеоизображения и одновременно высокое пространственное разрешение, недостижимые на текущий момент в классических многоэлементных ФПУ «смотрящего» типа. Высокая частота дискретизации позволяет более эффективно подавлять неравномерный фон с помощью алгоритма межкадровой обработки [1]. Также при сканировании существенно упрощается процедура получе-

Абилов Владислав Владимирович<sup>1</sup>, инженер 2 кат., аспирант.

Стрельцов Вадим Александрович<sup>1,2</sup>, инженер 1 кат., аспирант.

АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: s\_kpss@mail.ru

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет).

Россия, 141701, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 5.04.2023

Принята к публикации 27.04.2023

© Абилов В. В., Стрельцов В. А., 2023

ния многоспектральных изображений, т. к. ФЧЭ различных спектральных диапазонов могут быть пространственно разнесены, и при этом применение дополнительных оптических элементов (призм, светоделительных пластин и т. д.) для геометрического совмещения составляющих многоспектрального изображения не требуется.

Структурными элементами современных многорядных ИК-ФПУ являются ФМ формата  $1024 \times 10$  элементов, состоящие из матрицы фоточувствительных элементов на основе CdHgTe (КРТ) и большой интегральной схемы считывания (БИС считывания), осуществляющей накопление, предусиление, высокочастотную фильтрацию, ВЗН-суммирование, аналого-цифровое преобразование и коммутацию сигналов с ВЗН-каналов на выходы БИС. Шумы БИС считывания во многом определяют один из основных параметров, характеризующих качество ФМ – вероятность обнаружения малоразмерного объекта ( $P_D$ ) при фиксированной вероятности ложных тревог ( $P_{FA}$ ) [4]. Для его улучшения активно применяются различные виды линейной фильтрации выходных изображений. Так, в работе [5] рассматривалась квазисогласованная с точечным сигналом фильтрация с учетом разброса чувствительности и СКО шума ВЗН-каналов. Однако при моделировании выходных изображений ФПУ в данной работе предполагалось, что шум всех ВЗН-каналов имеет белый спектр, а изображение малоразмерного объекта аппроксимируется функцией Гаусса. Данные предположения не выполняются для ФМ, используемых для комплектации современных сканирующих ФПУ. Так спектры шумов, полученные при измерениях фотоэлектрических параметров образцов ФМ, значительно отличаются от белых, а форма сигнала от малоразмерного объекта заметно деформирована из-за применения высокочастотного фильтра в БИС считывания ФМ (так называемый режим АС) [6]. Вышеобозначенный режим используется для расширения динамического диапазона, а также позволяет снизить поканальную неравномерность постоянной составляющей сигнала («геометрический шум»). Одним из основных недостатков этого режима работы ФМ является уменьшение значения сигнала малоразмерного объекта. При использовании в БИС считывания фильтра верхних частот

(ФВЧ) с граничной частотой  $f_{гр} = 50$  Гц (период дискретизации 261 мкс, частота дискретизации равна 3650 Гц) уменьшение величины сигнала составляет 13 % (величина полезного сигнала измеряется от постоянного уровня сигнала до максимума, см. рис. 3 в [6]). В то же время данный фильтр уменьшает низкочастотный шум на 2 %, что существенно ниже, чем уменьшение величины сигнала от малоразмерного объекта. Это приводит к уменьшению отношения сигнал/шум и, как следствие, уменьшению вероятности обнаружения в режиме АС.

В работе [6] была проведена классификация шумов ВЗН-каналов по СПМШ. Большая часть из них обладает похожим на белый спектром шума, что хорошо согласуется с аналитической моделью шумов БИС считывания. ВЗН-каналы, СПМШ которых значительно отличается от белых, можно считать аномальными. Наличие аномальных ВЗН-каналов также влияет на вероятность обнаружения, т. к. устанавливаемое значение порогового сигнала, которое необходимо, чтобы обеспечить заданные вероятности обнаружения зависит от временной реализации шума.

В данной работе ставилась цель определить степень влияния аномальных ВЗН-каналов (по СПМШ) и использования режима АС на вероятность обнаружения слабых сигналов малоразмерных объектов, а также оценить эффективность различных видов линейной фильтрации для повышения этого параметра.

### Генерация выходных изображений ФПУ

Выходные изображения сканирующих ИК ФПУ после проведения двухточечной коррекции представляют собой суперпозицию временных реализаций шума ВЗН-каналов и изображений малоразмерных объектов.

Для имитации сигнала от малоразмерного объекта было использовано изображение малоразмерного объекта, полученное на специализированном проекционном оптико-механическом измерительном стенде с коэффициентом концентрации энергии 83 % в кружке диаметром 30 мкм в плоскости матрицы фоточувствительных элементов, в режиме АС. Отличие сигнала от МО, полученного в режиме АС от исходного показано на рис. 1.

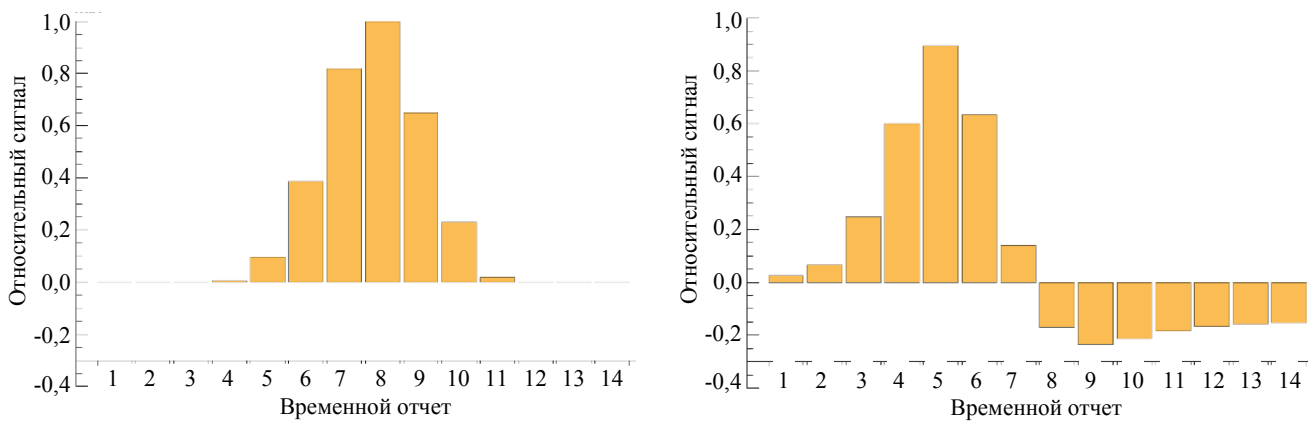


Рис. 1. Исходная форма сигнала от МО и с использованием ФВЧ (режим АС)

Для исследования влияния на характеристики обнаружения аномальных ВЗН-каналов использовалась генерация временных реализаций шумов со спектрами, измеренными экспериментально и представленных в [6]. Моделирование временных реализаций шума с неравномерным распределением СПМШ про-

водилось путем фильтрации рекурсивным фильтром с заданной амплитудно-частотной характеристикой белого шума с СКО равным 1 усл. ед. Амплитудно-частотные характеристики фильтров для генерации временных реализаций аномальных ВЗН-каналов до частоты Найквиста представлены на рис. 2.

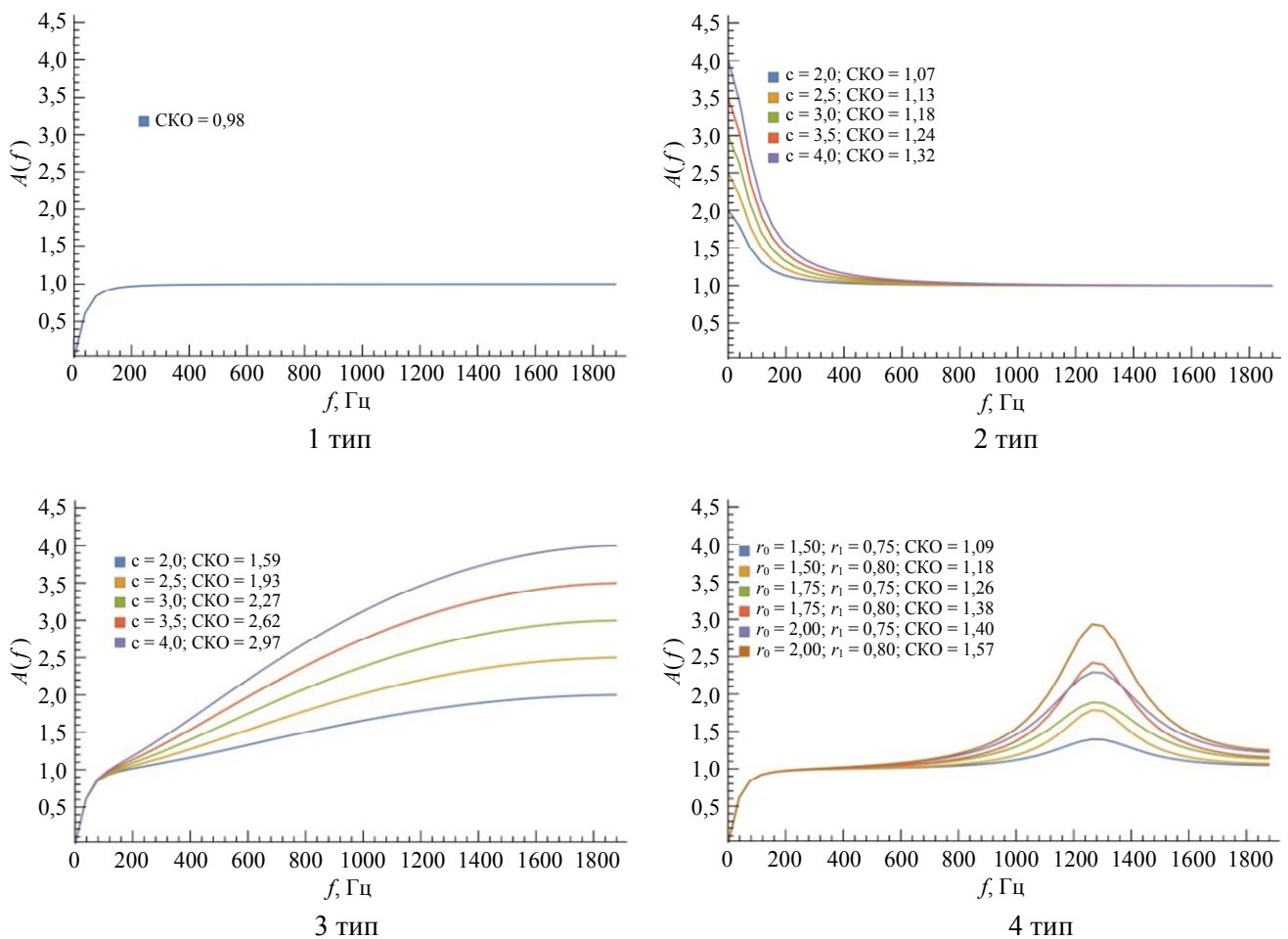


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики фильтров, используемых для имитации различных типов шумов

В данной работе рассматривается влияние 4 основных типов шумов на вероятность обнаружения МО:

1. Шум стандартных ВЗН-каналов. В выходном сигнале присутствует низкочастотный шум, но ФВЧ внутри входной ячейки БИС подавляет его, что видно на рис. 16 в работе [2]. Для имитации АС режима использовался рекурсивный фильтр 1 порядка с граничной частотой  $f_{гр} = 50$  Гц ( $b_1 = 0,921$ )

$$y[n] = \frac{1+b_1}{2}x[n] - \frac{1+b_1}{2}x[n-1] + b_1y[n-1]. \quad (1)$$

2. Шум с избыточными низкочастотными составляющими после АС фильтрации. Генерация данного вида временной реализации производилась с помощью рекурсивного фильтра с параметром  $c$ , равномерно распределенным в диапазоне [2; 4],  $b_1 = 0,9$

$$y[n] = \frac{c(1-b_1) + (1+b_1)}{2}x[n] + \frac{c(1-b_1) - (1+b_1)}{2}x[n-1] + b_1y[n-1]. \quad (2)$$

3. Шум с преобладающей высокочастотной составляющей. Случай аналогичен предыдущему. Параметр  $c$  равномерно распределен в диапазоне [2; 4],  $b_1 = 0,9$

$$y[n] = \frac{(1-b_1) + c(1+b_1)}{2}x[n] + \frac{(1-b_1) - c(1+b_1)}{2}x[n-1] + b_1y[n-1]. \quad (3)$$

4. Шум с подъёмом в окрестности 1/3 частоты дискретизации. Моделирование временных реализаций данного вида шума производилось с использованием рекурсивного фильтра, нули которого равны  $\pm r_0 \exp\left(\frac{2\pi i}{3}\right)$ , а полюса –  $\pm r_1 \exp\left(\frac{2\pi i}{3}\right)$ . Параметр  $r_0$  равномерно распределен в диапазоне [1,5; 2], а  $r_1$  – [0,75; 0,8].

$$y[n] = \frac{1 - 2r_1 \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + r_1^2}{1 - 2r_0 \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) + r_0^2} \times \left( x[n] - 2r_0 \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)x[n-1] + r_0^2x[n-2] \right) + 2r_1 \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right)y[n-1] - r_1^2y[n-2]. \quad (4)$$

Для определения влияния аномальных ВЗН-каналов (2, 3, 4 тип) на вероятность обнаружения МО были сгенерированы положения этих каналов (их количество от 0 до 60 с шагом 20) и тип спектра шума. В каждом случае происходила генерация 250 кадров с шумом, на которые потом накладывались изображения малоразмерных объектов. Величина положительного отклика составляла 2,5 усл. ед.

### Цифровая обработка сгенерированных изображений

Для увеличения вероятности обнаружения МО используется дополнительная цифровая фильтрация для увеличения отношения сигнал/шум. Если в системе присутствуют только шумы с белым спектром, то передаточная характеристика фильтра должна повторять передаточную характеристику полезного сигнала. В противном случае необходимо сначала применить фильтрацию, приводящую спектр шума к белому [4]. Ввиду ограничения вычислительных мощностей обрабатывающих систем применяется только квазисогласованная фильтрация – корреляция с ядром размера  $5 \times 5$ , образованным из изображения с малоразмерным объектом в окрестности максимума (далее – Ф1). Для сравнения вероятности обнаружения при белом и аномальном шуме ВЗН-каналов в работе приводятся ROC-кривые (receiver operating characteristic, рабочая характеристика приёмника) для случая, если до Ф1 приводить спектр шума к белому спектру (далее – Ф2). Для каждого ВЗН-канала коэффициенты фильтра (в частотной области) определялись с помощью спектральной плотности мощности шума этого ВЗН-канала:

$$out[n] = F^{-1} \left( F(in[n])[\omega] \times \frac{1}{\sqrt{PSD[\omega]}} \right) [n], \quad (5)$$

где  $in[n]$  – входной сигнал ВЗН-канала;

$out[n]$  – выходной сигнал ВЗН-канала;

$PSD[\omega]$  – СПМШ ВЗН-канала;

$F, F^{-1}$  – прямое и обратное Фурье преобразование соответственно.

Ввиду того, что шумы ВЗН-каналов ФМ могут быть разделены по виду СПМШ на ограниченное количество групп [6], рациональным будет использование вместо Ф2 рекурсивных фильтров 1-го и 2-го порядка, которые подавляют соответствующие типы шумов (далее – Ф3). Спектр шума можно

классифицировать, например, с помощью нейронных сетей. Шумы с СПМШ 1-го типа, присущие большинству ВЗН-каналов, дополнительно не обрабатываются (для уменьшения вычислительных затрат). Шумы с СПМШ 2-го типа обрабатываются фильтром (2) с параметрами  $c = 1/3, b_1 = 0,9$ ; типа 3 – фильтром (3) с  $c = 1/3, b_1 = 0,05$ , типа 4 – фильтром (4) с параметрами  $r_0 = 1,2, r_1 = 0,6$ . Таким образом, фильтр Ф3 представляет собой адаптивный рекурсивный фильтр, АЧХ которого зависит от СПМШ ВЗН-канала к которому он применяется. Амплитудно-частотные характеристики фильтра Ф3 приведены на рис. 3. Следует заметить, что данные фильтры не позволяют получить идеально белый спектр шума, а только приближают спектр шума после фильтрации к белому спектру.

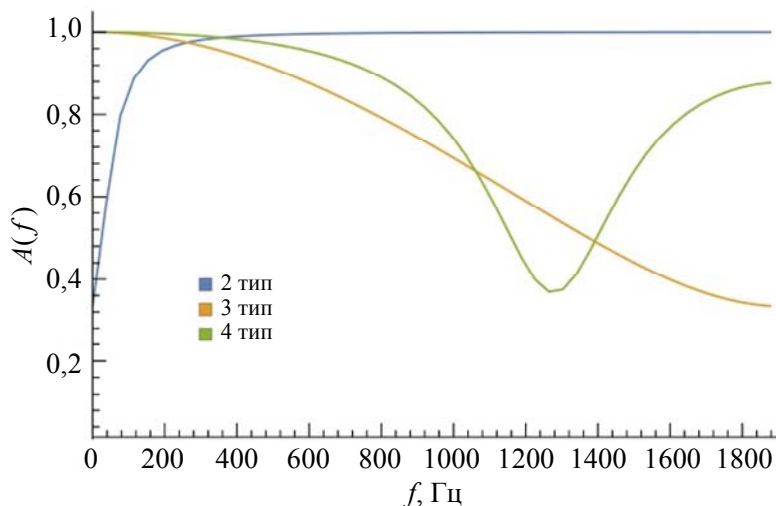


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики рекурсивных фильтров, подавляющие аномальные шумы соответствующих типов

В данной работе оценивается эффективность последовательного применения адаптивного рекурсивного фильтра и квазисогласованного с сигналом оконного фильтра (Ф3 + Ф1) по сравнению с последовательным приведением шума к белому спектру и оконной фильтрации (Ф2 + Ф1), использующие гораздо больше памяти и вычислительных мощностей.

### Определение вероятности обнаружения малоразмерного объекта на сгенерированных изображениях

Вероятности обнаружения МО и ложной тревоги оценивались по количеству превы-

сивших заданный порог локальных максимумов в серии тестовых изображений после фильтрации:

$$P_D = \frac{nob_{обн}}{Nob}, \quad P_{FA} = \frac{nbг}{Nbg}. \quad (6)$$

Здесь  $Nob$  – количество объектов в серии (известно),  $nob_{обн}$  – 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 объемом моделируемых данных: в каждом эксперименте серия состояла из 250 изображений форматом 1024×1024 отсчета, содержащих по 1560 малоразмерных объектов, равномерно размещенных по всем

столбцам изображений, сформированным разными фоточувствительными элементами.

Результаты вычисления вероятности обнаружения с различными видами фильтрации представлена на рис. 4.

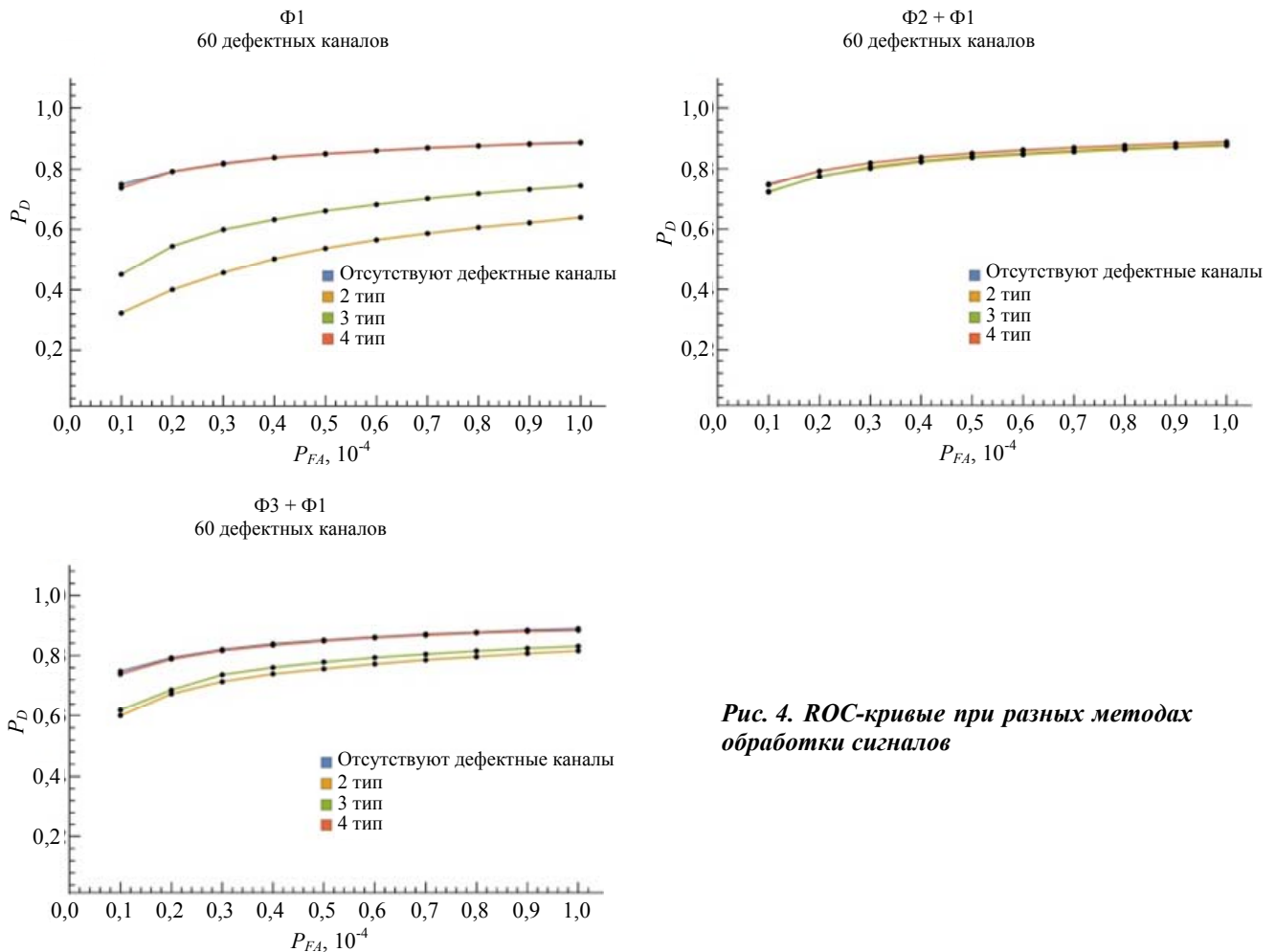


Рис. 4. ROC-кривые при разных методах обработки сигналов

Из полученных характеристик можно сделать следующие выводы:

1. Шум со спектром 2-го типа (низкочастотный) наиболее значительно влияет на вероятность обнаружения МО. При применении только Ф1 наличие в ФМ даже 2 % ВЗН-каналов с таким спектром существенно уменьшает вероятность обнаружения. При вероятности ложных тревог  $P_{FA0} = 0,5 \times 10^{-4}$  вероятность обнаружения МО  $P_D$  снижается на 18 %.

2. Шум со спектром 3-го типа (высокочастотный) в меньшей степени влияет на вероятность обнаружения МО по сравнению

с шумом 2-го типа, из-за квазисогласованной с сигналом от МО низкочастотной фильтрации Ф1.

3. Шум со спектром 4-го типа (на частоте 1/3 частоты дискретизации) практически не влияет на вероятность обнаружения МО.

4. Применение последовательности обработок Ф3 + Ф1 позволяет увеличить вероятность обнаружения МО, даже при наличии в ФМ 6 % аномальных каналов. При вероятности ложных тревог  $P_{FA0}$  вероятность обнаружения увеличивается на 22 % и на 11 % для ВЗН-каналов с шумами 2-го и 3-го типа соответственно.

### Заключение

В результате исследования были проанализированы спектры шумов фотомодулей, используемых для комплектации современных широкоформатных ИК-ФПУ сканирующего типа, определены ВЗН-каналы которые можно признать аномальными (ВЗН-каналы, СПМШ которых значительно отличается от спектра белого шума). Для оценки влияния аномальных ВЗН-каналов на вероятность обнаружения МО были сгенерированы серии кадров, имитирующие выходные данные структурной единицы ФПУ – ФМ. Сгенерированные кадры учитывают применение ФВЧ, и наличие в ФМ до 6 % аномальных каналов трёх основных типов. Для оценки эффективности различных видов линейной фильтрации, применяемой для улучшения вероятности обнаружения МО, полученные серии кадров подвергались трём видам внутрикадровой обработки:

1) Широко используемая в настоящее время квазисогласованная с сигналом от малоразмерного объекта оконная фильтрация.

2) Последовательное приведение спектра шума к белому, требующее больших затрат памяти и вычислительных мощностей, и квазисогласованная оконная фильтрация.

3) Последовательное применение адаптивного рекурсивного фильтра (меняющего свою АЧХ в зависимости от СПМШ аномального ВЗН-канала) и квазисогласованная оконная фильтрация

По прошедшим внутрикадровую обработку сериям кадров были рассчитаны рабо-

чие характеристики фотоприёмника, после анализа которых было выявлено, что наибольшее негативное влияние на вероятность обнаружения МО оказывают ВЗН-каналы с низкочастотным шумом, в виду низкой эффективностью подавления низкочастотных шумов стандартной оконной фильтрацией. Применение же перед оконной фильтрацией адаптивного рекурсивного фильтра значительно улучшает вероятность обнаружения МО (до 22 %) и при этом не требует больших затрат памяти и вычислительных мощностей, которые необходимы для предварительного приведения спектра шума всех ВЗН-каналов к белому.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В. А., Киричук В. С., Косых В. П., Синельников В. В. / Труды всероссийской конференции «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов». – Республика Алтай, с. Усть-Сема, 2015. С. 84–90.
2. Кузнецов П. А., Моцев И. С., Хромов С. С. / Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
3. Чишко В. Ф., Касаткин И. Л., Бурлаков И. Д., Лопухин А. А., Пономаренко В. П., Филачёв А. М. / Прикладная физика. 2007. № 2. С. 64.
4. Филачёв А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2005.
5. Громили Г. И., Косых В. П., Яковенко Н. С. / Автометрия. 2020. Т. 4 С. 145–153.
6. Стрельцов В. А., Абилов В. В., Филиппов С. О. / Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 3. С. 267–276.

## Influence of TDI-channels with anomalous noises on the probability of detecting small-sized objects by multiple row scanning photo-detectors

V. V. Abilov<sup>1</sup> and V. A. Streltsov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Orion R&P Association, JSC  
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia  
E-mail: s\_kpss@mail.ru

<sup>2</sup> Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institutskiy per., Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia

Received 5.04.2023; accepted 27.04.2023

*The effect of anomalous TDI channels in terms of noise power spectral density (PSD) on the probability of detecting small objects by scanning multirow photodetectors (FPA) is considered. A series of FPA output images simulating the signals of TDI channels with 4 main types of PSD were generated, the probability of detecting a small object was calculated, and the effectiveness of various combinations of linear filters used in intraframe processing was evaluated. It was found that TDI channels with low-frequency noise most significantly affect the probability of detecting a small object, and the successive application of an adaptive recursive filter and a window filter quasi-matched to the signal increases it by 22 % even in the presence of 6 % anomalous TDI channels in the FPA.*

*Keywords:* multi-row photodetector, detection of small-sized objects, abnormal TDI- channels, inhomogeneity of the power spectral density of TDI channels.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-55-62

### REFERENCES

1. Ivanov V. A., Kirichuk V. S., Kosykh V. P. and Sinelshchikov V. V. Proc. All-Russian Meeting on Processing of spatial data in the tasks of monitoring natural and anthropogenic processes. Ust-Sema, Republic of Altai, 2015, pp. 84–90 [in Russian].
2. Kuznetsov P. A., Moshchev I. S. and Khromov S. S., Usp. Prikl. Fiz. **1** (5), 606 (2013) [in Russian].
3. Chishko V. F., Kasatkin I. L., Burlakov I. D., Lopukhin A. A., Ponomarenko V. P. and Filachev A. M., Applied Physics, № 2, 64 (2007) [in Russian].
4. Filachev A. M., Taubkin I. I. and Trishenkov M. A., Tverdotelnaya photoelectronica. Physicheskie osnovi, Moscow, Fizmatkniga, 2005.
5. Gromilin G. I., Kosykh V. P. and Yakovenko N. S., Avtometriya **4**, 145–153 (2020) [in Russian].
6. Streltsov V. A., Abilov V. V. and Filippov S. O., Usp. Prikl. Fiz. **7** (3), 267–276 (2019) [in Russian].