

УДК 621.383

## Анализ эффективности пространственной фильтрации сигналов на выходе фотоприемного устройства с режимом временной задержки и накопления

Б. Н. Дrajнников, К. В. Козлов, П. А. Кузнецов, В. Н. Соляков

*Произведен расчет оптимальных коэффициентов пространственного фильтра для выходных изображений многорядного фотоприемного устройства (ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН). Представлены результаты анализа эффективности пространственной фильтрации от величины матрицы фильтра, чувствительности и уровня шумов отдельных каналов ФПУ, размера изображения целевого источника излучения. Исследовано влияние оптимальной пространственной фильтрации выходных сигналов ФПУ на пространственное разрешение итогового изображения. Приведены результаты экспериментальных исследований эффективности оптимальной пространственной фильтрации изображений.*

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

*Ключевые слова:* ФПУ, ВЗН, МФЧЭ, БИС считывания, ЧКХ, точечный источник.

### Введение

Многорядные фотоприемные устройства (ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) [1—6] широко используются для достижения предельных значений по чувствительности и пространственному разрешению. В режиме ВЗН сигналы со всех фоточувствительных элементов (ФЧЭ) канала суммируются последовательно, что позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум (в случае идеального ВЗН-суммирования — в  $\sqrt{N}$  раз, где  $N$  — количество фоточувствительных элементов в составе ВЗН-канала), а также существенно снизить требования к числу дефектных ФЧЭ и разбросу их чувствительности. К другим преимуществам сканирующего ВЗН-ФПУ (по сравнению с матричным фотодетектором «смотрящего» типа) следует отнести возможности

увеличения частоты пространственной дискретизации изображения сцены (с помощью топологического перекрытия [7], микросканирования, повышения частоты считывания фотосигналов и т. д.), а также расширенное поле зрения.

Целью данной работы является анализ эффективности оптимальной пространственной фильтрации изображений ФПУ с режимом ВЗН.

### Исходные данные

В качестве исходных данных в работе используются выходные характеристики многорядного ФПУ формата 1024×10 с режимом ВЗН [7], предназначенного для регистрации точечных источников излучения в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне, а также результаты математического моделирования [4]. Топология матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) ФПУ состоит из 4 субматриц, смещенных друг относительно друга. Расстояния между соседними ФЧЭ в направлении сканирования и в направлении, перпендикулярном сканированию, равны соответственно 45 и 60 мкм. Период пространственной дискретизации изображения сцены в направлении сканирования и в направлении, перпендикулярном сканированию, равен 15 мкм за счет перекрытия субматриц и трех выборок значений сигналов за время перемещения пятна излучения между соседними ФЧЭ канала. В каждой входной ячейке большой интегральной схемы (БИС) считывания предусмотрена высоко-

---

Дrajнников Борис Николаевич, начальник подразделения<sup>1</sup>.  
Козлов Кирилл Владимирович, инженер 1 категории<sup>1</sup>, аспирант<sup>2</sup>.

Кузнецов Петр Александрович, главный специалист<sup>1</sup>.  
Соляков Владимир Николаевич, главный научный сотрудник<sup>1,2</sup>.

<sup>1</sup>АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ir.ru

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

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 27 октября 2015 г.

© Дrajнников Б. Н., Кузнецов П. А., Козлов К. В.,  
Соляков В. Н., 2015

частотная фильтрация для вычитания неинформативной фоновой составляющей (граничные частоты фильтров равны 35,5 Гц). Импульсная характеристика ФЧЭ, используемая при моделировании, определяется с помощью следующего выражения:

$$h_{pd}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } (|x| \leq pn_x) \wedge (|y| \leq pn_y) \\ \exp(-\alpha \cdot dist) & \text{иначе} \end{cases}$$

где  $pn_{x,y}$  — размер  $p$ - $n$ -перехода (принят равным 10 мкм по каждому из направлений),  $dist$  — наименьшее расстояние от области  $p$ - $n$ -перехода до точки с координатами  $(x,y)$ ,  $\alpha$  — параметр, определяемый в первую очередь диффузионной длиной носителей (равен  $\alpha = 0,2$  — получено экспериментально).

Основным параметром ФПУ [8—11], предназначенного для обнаружения слабых источников оптического излучения, является отношение амплитуды полезного фотосигнала  $U_a$  к среднеквадратичному отклонению (СКО) шума —  $\sigma_{ш} = \sqrt{U_{ш}^2}$ . Повышение отношения сигнал/шум на выходе обнаружителя производится путем оптимизации параметров оптико-электронного тракта ФПУ, а именно, спектральная полоса пропускания оптической системы, структура топологии МФЧЭ, частотная характеристика электронного тракта БИС считывания выбираются таким образом, чтобы обеспечить максимально эффективную передачу

полезного фотосигнала и подавление неинформативного фонового излучения и шума.

В ряде случаев пространственное распределение энергии целевого источника излучения является *априори* заданным, что позволяет производить дополнительную пространственную фильтрацию выходного изображения фотоприемного устройства с целью повышения отношений сигнал/шум (С/Ш) и сигнал/помеха.

### Теоретическое исследование

Матрицу сигналов изображения на выходе ФПУ обозначим  $S_{ij}$ , где  $(i,j)$  — позиция элемента изображения, а матрицу коэффициентов пространственного фильтра —  $M_{k,n}$ . Рассчитаем функцию взаимной корреляции сигналов изображения и коэффициентов фильтра для каждого элемента изображения  $(i_0, j_0)$  в следующем виде:

$$W_{i_0, j_0} = \frac{1}{\max(W)} \sum_{i=-\infty}^{\infty} \sum_{j=-\infty}^{\infty} M_{i+K/2, j+N/2} S_{i+i_0, j+j_0} \quad (1)$$

где  $W_{ij}$  — матрица сигналов на выходе фильтра,  $\max(W)$  — нормировочный коэффициент. Наглядно процесс фильтрации представлен на рис. 1: значение сигнала каждого из элементов изображения на выходе фильтра является результатом взвешенного суммирования сигналов соседних элементов исходного изображения.

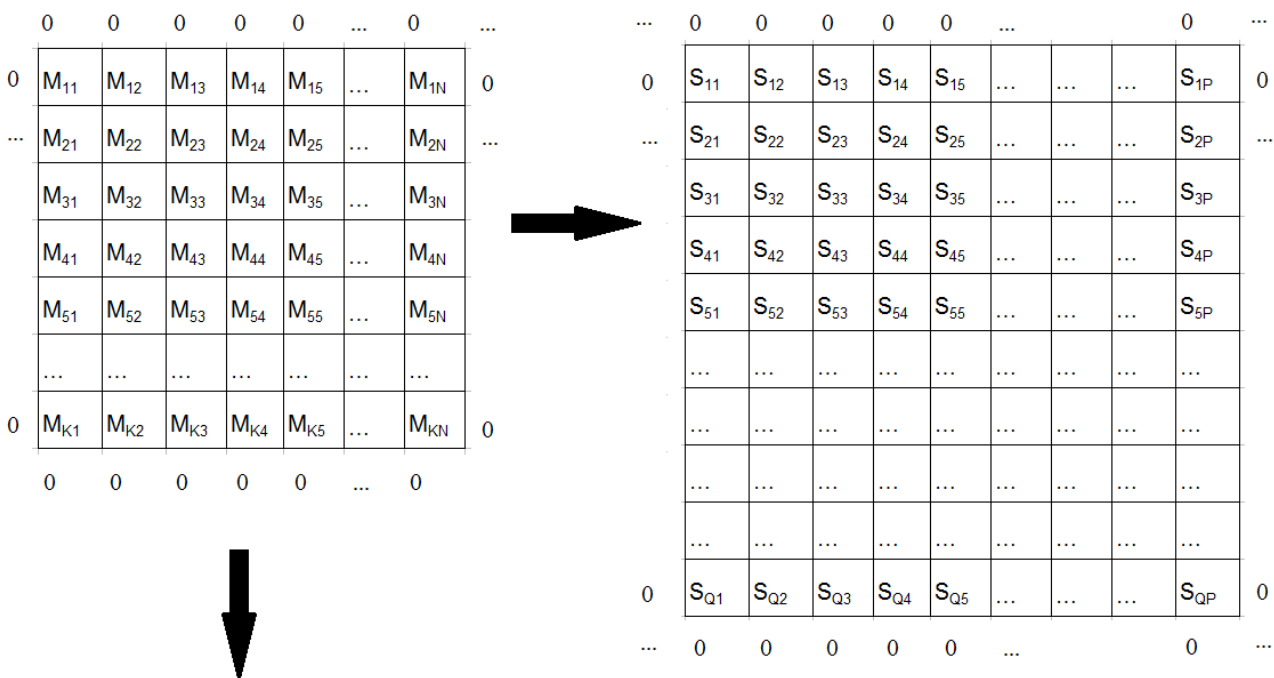


Рис. 1. Наглядное представление процесса пространственной фильтрации сигналов изображения ( $S_{ij}$ )

Представим значения  $S_{i,j}$  и  $W_{i,j}$  с помощью следующих двух выражений:

$$S_{i,j} = T_{i,j}^0 + N_{i,j}^0 + B_{i,j}^0, \quad (2)$$

$$W_{i,j} = T_{i,j} + N_{i,j} + B_{i,j}, \quad (3)$$

где  $T_{i,j}^0$ ,  $B_{i,j}^0$  и  $N_{i,j}^0$  — значения полезного, фонового сигналов и шума соответственно элемента  $(i,j)$  до фильтрации, а  $T_{i,j}$ ,  $B_{i,j}$  и  $N_{i,j}$  — после фильтрации. В дальнейшем будем рассматривать случай равномерной фоновой засветки МФЧЭ. Все случайные составляющие сигналов элементов  $(i,j)$  будем считать независимыми. Обозначим шумовую составляющую сигнала элемента изображения  $(i,j)$  до фильтрации при  $T_{i,j}^0 = 0$  как  $n_{i,j}^0$ . Согласно свойствам дисперсии:  $D(\alpha x) = \alpha^2 D(x)$ , где  $\alpha$  — постоянная величина,  $x$  — случайная величина, т. е.  $\sigma^2(\alpha x) = \alpha^2 \sigma^2(x)$  и  $D(x_1 + x_2) = D(x_1) + D(x_2)$ , или  $\sigma^2(x_1 + x_2) = \sigma^2(x_1) + \sigma^2(x_2)$ , где  $x_1$  и  $x_2$  — независимые случайные величины. Отношение сигнал шум элемента изображения  $(i,j)$ , полученное в результате суммирования полезных составляющих сигналов  $T_1^0 + T_2^0$  и шумов  $n_1^0 + n_2^0$  ( $n_1^0$  соответствует  $\sigma_1^0$ , а  $n_2^0 - \sigma_2^0$ ), выразим с помощью выражения:

$$\left( \frac{C}{\Pi} \right)_{i,j} = \frac{M_1 T_1^0 + M_2 T_2^0}{\sqrt{M_1^2 (\sigma_1^0)^2 + M_2^2 (\sigma_2^0)^2}}. \quad (4)$$

Данная функция достигает максимального значения при выполнении следующего условия:

$$\left( \frac{M_1}{M_2} \right)_{\text{опт}} = \frac{T_1^0 (\sigma_2^0)^2}{T_2^0 (\sigma_1^0)^2}. \quad (5)$$

Таким образом, оптимальные значения элементов матрицы фильтра  $M$  определяются с помощью такого выражения:

$$\frac{M_{i1+K/2, j1+N/2}}{M_{i2+K/2, j2+N/2}} = \frac{T_{i1+i0, j1+j0}^0 (\sigma_{i2+i0, j2+j0}^0)^2}{T_{i2+i0, j2+j0}^0 (\sigma_{i1+i0, j1+j0}^0)^2}, \quad (6)$$

где  $(i_0, j_0)$  — текущая координата изображения.

В дальнейшем под термином отношение сигнал/шум системы будем понимать следующее выражение:

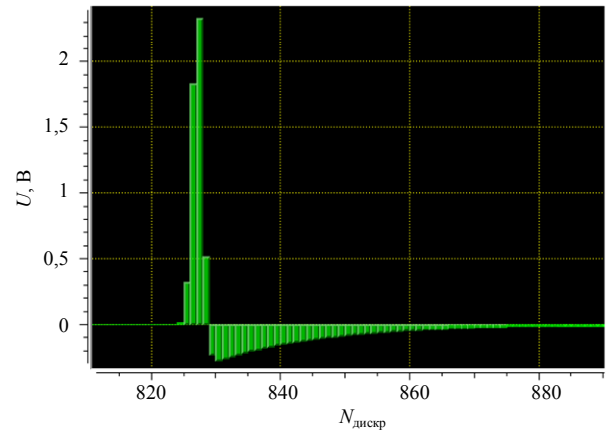
$$\frac{C}{\Pi} = \frac{\max(T_{i,j})}{\max(\sigma_{i,j})}. \quad (7)$$

Наличие в знаменателе не среднего, а максимального значения шума обусловлено тем, что решается задача обнаружения сигнала заданной формы.

Рассмотрим случай, когда все каналы ВЗН ФПУ идентичны с точки зрения шумовых и сигнальных характеристик. Оптимальные параметры фильтра (размера  $5 \times 5$ ) для точечной цели диаметра 30 мкм (по уровню 0,8 функции концентрации энергии), распределенной по Гауссу, представлены на рис. 2, а (траектория движения изображения точечной цели в режиме сканирования проходит через центр ФЧЭ первой субматрицы топологии). Характеристики цели в направлении сканирования до процедуры пространственной обработки показаны на рис. 2, б.

0.009	0.075	0.138	0.075	0.009
0.035	0.381	0.786	0.381	0.035
0.042	0.474	1.000	0.474	0.042
0.013	0.118	0.222	0.118	0.013
-0.004	-0.047	-0.100	-0.047	-0.004

а



б

Рис. 2. Параметры фильтра и характеристики цели: а) коэффициенты оптимального пространственного фильтра размера  $5 \times 5$ ; б) выходные характеристики канала, соответствующие максимуму интенсивности точечной цели, по горизонтали — номер периода дискретизации в направлении сканирования; по вертикали — сигнал на выходе ФПУ

Пусть СКО шума на выходе каждого из каналов равно 1 мВ. Тогда отношение сигнал/шум на выходе ФПУ, рассчитанное в соответствии с (7), составит 2330. В результате обработки отношение сигнал/шум повышается до 3680 (сигнал равен 5,80 В, а шум — 1,58 мВ), т. е. на 58 % (в дальнейшем будем называть данную величину эффективностью фильтрации  $\eta$ ). Характеристика цели в направлении сканирования после процедуры пространственной фильтрации представлена на рис. 3.

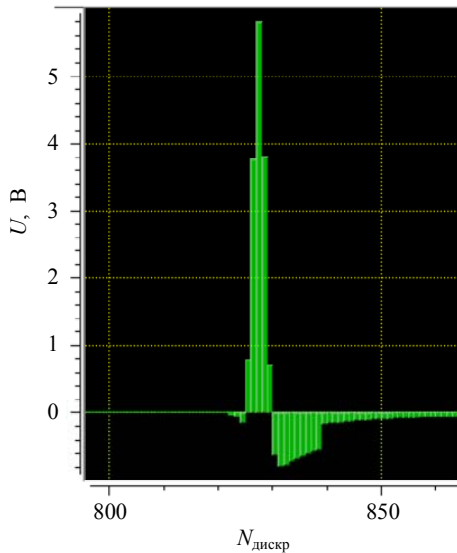


Рис. 3. Характеристика цели на выходе пространственно-го фильтра: по вертикали – сигнал на выходе фильтра, по горизонтали — номер периода дискретизации в направлении сканирования

Увеличение размера фильтра с  $5 \times 5$  до  $30 \times 30$  позволило повысить эффективность фильтрации до  $\eta = 62\%$ , а уменьшение размера с  $5 \times 5$  до  $3 \times 3$  привело к снижению эффективности фильтрации до  $\eta = 57\%$ . Таким образом, эффективность пространственной фильтрации в рассматриваемом случае слабо зависит от размера матрицы  $M$  при  $K \geq 3, N \geq 3$ .

Допустим, что СКО шума на выходе одного из каналов ФПУ превышает 1 мВ и равно  $n_{i,j}^0$  (все остальные каналы по-прежнему идентичны и  $n_{i,j}^0 = 1$  мВ,  $j \neq j_0$ ). Назовем данный канал «аномальным шумящим». На рис. 4 представлена зависимость эффективности оптимальной пространственной фильтрации сигналов изображения  $\eta$  от величины шума «аномального шумящего» канала. Сплошная линия (кривая 1) соответствует величине фильтра, равной  $5 \times 5$ , а пунктирная (кривая 2) —  $30 \times 30$ . Заметим, что при высоких значениях шума ( $>3$  мВ) эффективность фильтрации приближается к  $\eta = 100\%$ . Убедимся, что увеличение размера фильтра с  $5 \times 5$  до  $30 \times 30$  и в данном случае позволяет повысить его эффективность примерно на 5%.

Вернемся к случаю идентичных элементов  $(i,j)$  с точки зрения шумовых характеристик ( $n_{i,j}^0 = 1$  мВ). Исследуем влияние снижения чувствительности одного из каналов (назовем его «аномальным с пониженной чувствительностью») на эффективность пространственной фильтрации сигналов. Будем считать, что сигнал на выходе «аномального» канала понижается в  $k$  раз, где  $k$  — «коэффициент чувствительности». На рис. 5 пред-

ставлена зависимость эффективности фильтрации от значения коэффициента чувствительности для двух случаев: 1) максимум распределения энергии пятна излучения целевого объекта приходится на «аномальный канал» (сплошная линия), 2) максимум распределения энергии пятна излучения целевого объекта приходится на соседний к «аномальному» (пунктирная линия). Расчеты проводились при величине фильтра, равной  $5 \times 5$ . Данные зависимости подчеркивают эффективность использования оптимальной пространственной фильтрации при наличии разброса чувствительности каналов — эффективность  $\eta$  может достигать 110%. К тому же представленная процедура фильтрации помогает восстановить структуру исходного объекта при наличии дефектных каналов ФЧЭ с нулевой чувствительностью, что продемонстрировано на рис. 6.

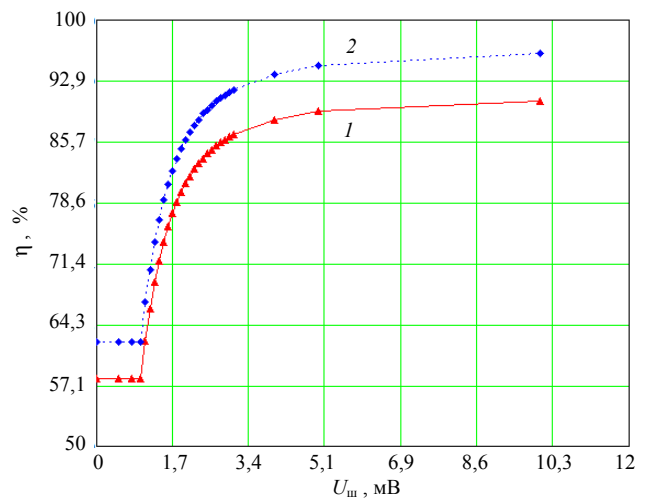


Рис. 4. Зависимость эффективности фильтрации сигналов изображения от величины шума  $U_{ш}$  «аномально шумящего» одного из каналов ФПУ

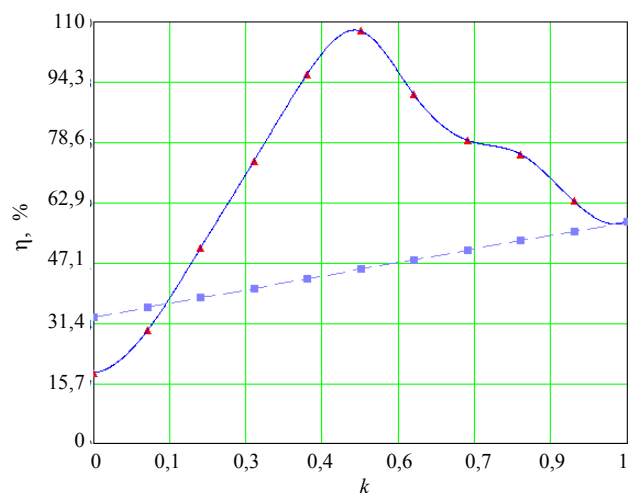


Рис. 5. Зависимость эффективности фильтрации сигналов  $\eta$  от коэффициента чувствительности канала  $k$  для двух случаев (по тексту)

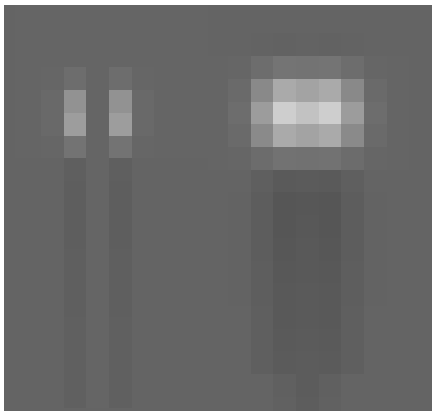


Рис. 6. Изображение пятна при попадании его центра на канал с нулевой чувствительностью до фильтрации (слева) и после (справа)

Недостатком рассматриваемого метода оптимальной двумерной фильтрации изображений является существенное снижение пространственного разрешения. На рис. 7 показаны частотно-контрастные характеристики сигналов ФПУ в направлении, перпендикулярном сканированию. Пунктиром обозначена характеристика, рассчитанная с учетом пространственного фильтра по прямоугольному миру, а сплошной линией — функция передачи тракта оптическая система — МФЧЭ, рассчитанная по гармоническому входному воздействию. Таким образом, используемый вид фильтрации приводит к снижению значения пространственной частоты по уровню 0,2 функции передачи контраста с 24 до 18 пар линий/мм.

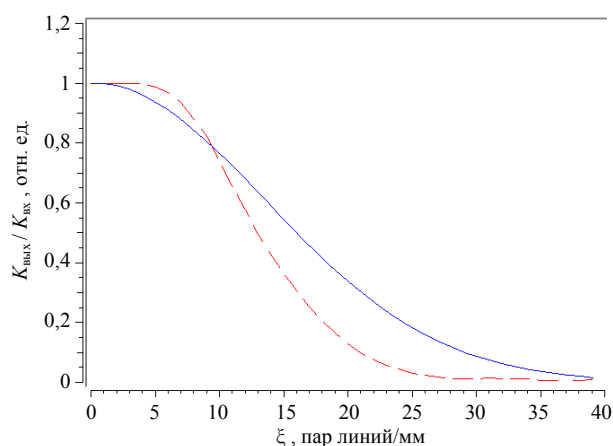


Рис. 6. Частотно-контрастные характеристики оптоэлектронного тракта в направлении, перпендикулярном сканированию, для двух случаев (по тексту). По горизонтали — пространственная частота  $\xi$  в единицах (пар линий)/мм, по вертикали — отношение выходного контраста к входному контрасту  $K_{\text{вых}} / K_{\text{вх}}$

Пусть один из каналов ФПУ имеет повышенные значения шумов.

Вернемся к случаю идентичных каналов ФПУ с точки зрения сигнальных и шумовых характеристик. Исследуем зависимость эффективности фильтрации от размера изображения цели (см. рис. 7) при неизменных параметрах топологии МФЧЭ (напомним, что в данной работе используется топология, обеспечивающая шаг пространственной дискретизации 15 мкм). Радиус пятна излучения определяется по уровню 0,8 функции концентрации энергии. При расчетах использовался фильтр размера  $40 \times 40$  периодов дискретизации. На основании представленной зависимости сделаем вывод о необходимости обеспечивать максимально возможную частоту пространственной дискретизации изображения сцены при решении задач обнаружения малых источников оптического излучения — при увеличении частоты дискретизации в 4 раза, эффективность фильтрации точечной цели  $\eta$  возросла с 57 до 332 %.

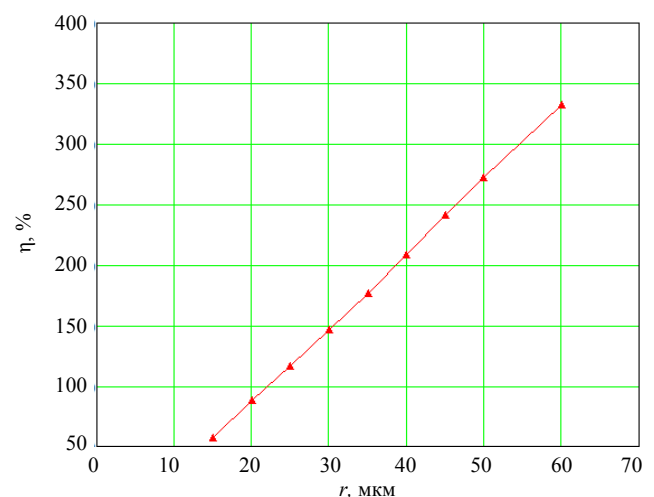


Рис. 7. Влияние размера целевого объекта  $r$  (радиус пятна излучения) на эффективность фильтрации  $\eta$  при неизменном шаге пространственной дискретизации (15 мкм)

### Экспериментальное исследование

Характеристики точечной цели, полученные экспериментально, при радиусе пятна излучения 15 мкм (по уровню 0,8 функции концентрации энергии) представлены на рис. 8.

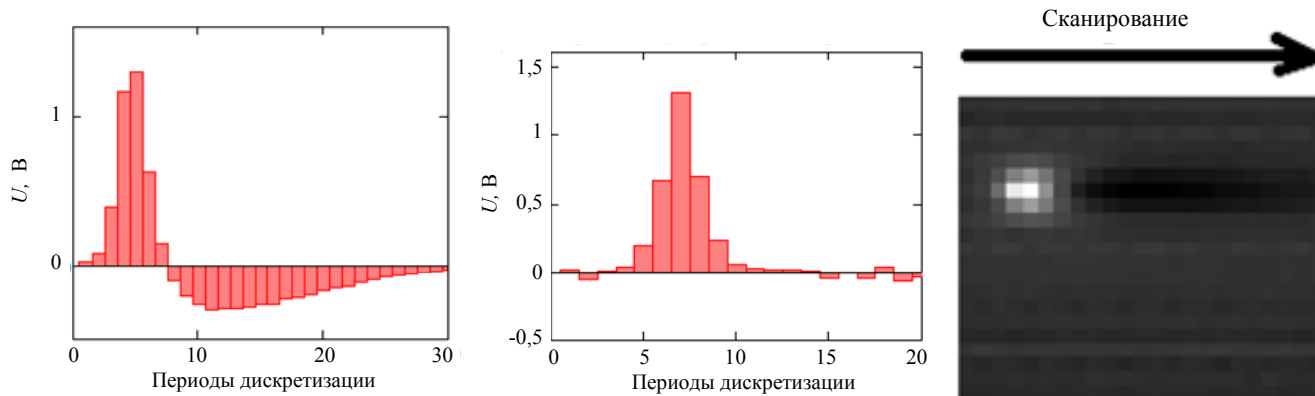


Рис. 8. Сигнал (напряжение  $U$  на выходе) от точечного источника излучения (на равномерном фоне), полученный на основе экспериментальных данных. Гистограмма слева — сигнал в направлении сканирования, гистограмма в центре — сигнал в направлении, перпендикулярном сканированию, изображение справа — направление сканирования.

Отметим, что форма экспериментальных временных характеристик в направлении сканирования несколько отличается от результатов моделирования. Причиной данного отличия являются дополнительные эффекты, указанные в [12]. С помощью представленного изображения был составлен оптимальный фильтр размера  $20 \times 5$ . Эффективность фильтрации  $\eta$  экспериментально полученных изображений оказалась выше соответствующих теоретических результатов и составила в среднем 95 % за счет большей ширины пятна и большего обратного выброса. При расчете шумов не учитывались «аномальные шумящие» каналы (СКО шума которых более чем в 2 раза превышает среднее СКО шума по матрице), как потенциально отключаемые с помощью процедуры деселекции.

### Заключение

Произведен расчет параметров оптимального пространственного фильтра выходных изображений ФПУ с режимом ВЗН при радиусе пятна излучения 15 мкм (по уровню 0,8 функции концентрации энергии). Показано, что увеличение размера фильтра с  $5 \times 5$  до  $30 \times 30$  позволяет повысить эффективность фильтрации до 62 %, а уменьшение размера с  $5 \times 5$  до  $3 \times 3$  снижает эффективность фильтрации до 57 %. Таким образом, эффективность пространственной фильтрации в рассматриваемом случае слабо зависит от размера матрицы  $M$  при  $K \geq 3$ ,  $N \geq 3$ .

Показаны преимущества оптимальной пространственной фильтрации при наличии дефектных и шумящих каналов: эффективность использования оптимальной пространственной фильтрации в рассматриваемом случае может достигать 110 %.

Проведено обоснование необходимости обеспечивать максимально возможную частоту про-

странственной дискретизации изображения сцены при решении задач обнаружения малых источников оптического излучения — при увеличении частоты дискретизации в 4 раза эффективность фильтрации точечной цели возросла с 57 до 332 %.

Показано, что используемый вид фильтрации приводит к снижению значения пространственной частоты по уровню 0,2 функции передачи контраста с 24 до 18 пар линий/мм.

Использование предложенного в работе алгоритма фильтрации для обработки результатов эксперимента позволило добиться увеличения отношения сигнал/шум примерно в 2 раза.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ НШ-2787.2014.9

### ЛИТЕРАТУРА

1. Трищенко М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992.
2. Флачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2011.
3. Соляков В. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А. // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 54.
4. Кузнецов П. А., Моцев И. С., Хромов С. С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
5. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 1. С. 71.
6. Бочков В. Д., Дрожников Б. Н., Кузнецов П. А. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 53.
7. Кузнецов П. А., Хромов С. С., Зайцев А. А. // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 95.
8. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 38.

9. Патрашин А. И. Метод расчета фоновой облученности МФПУ с холодной диафрагмой произвольной формы. / Тез. докл. XX Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: ФГУП «НПО «Орион», А02, 2008.

10. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М. и др. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 61.

11. Васильев В. Н., Дмитриев И. Ю., Дразников Б. Н. и др. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 5. С. 486.

## The analysis of TDI FPA images dimensional filtration efficiency

*B. N. Draznikov<sup>1</sup>, K. V. Kozlov<sup>1,2</sup>, P. A. Kuznetsov<sup>1</sup>, and V. N. Solyakov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Orion R&P Association, Inc.  
9 Kosinskaya str., Moscow, 11538, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology  
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

*Received October 27, 2015*

***The optimal coefficients of the spatial filter for TDI FPA were calculated. Consideration was given to a dependence between of the spatial filtering effectiveness and the size of target source of energy, the sensitivity and noise level of FPA channels. The spatial resolution of the output image was calculated. The experimental results have been showed.***

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

**Keywords:** TDI, FPA, photodetector, multiplexer.

### REFERENCES

1. M. A. Trishenkov, Photoreceivers and CCD (Radio Svyaz', Moscow, 1992) [in Russian].

2. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Foundations*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].

3. V. N. Solyakov, K. V. Kozlov, and P. A. Kuznetsov, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 54 (2014).

4. P. A. Keznetsov, I. S. Moshchev, and S. S. Khromov, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 606 (2013).

5. P. A. Keznetsov and I. S. Moshchev, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **3**, 71 (2015).

6. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Keznetsov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 53 (2014).

7. P. A. Kuznetsov, S. S. Khromov, and A. A. Zaitsev, *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 95 (2012).

8. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 38 (2014).

9. A. I. Patrashin, in *Proc. XX Intern. Conf. Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, 2008). A02.

10. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 61 (2012).

11. V. N. Vasil'ev, I. Yu. Dmitriev, B. N. Drazhnikov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **3**, 486 (2015).