УДК 621.383

Исследование частотных характеристик многоразрядного МФПУ с режимом ВЗН

К. В. Козлов, В. Н. Соляков, П. А. Кузнецов, А. В. Полесский, К. А. Хамидуллин, Н. А. Семенченко, Е. А. Бедарева

В статье представлена модель многорядного матричного фотоприемного устройства (МФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН), предназначенного для регистрации точечных источников оптического излучения в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне спектра. С использованием модели решены некоторые задачи метрологии, например расчет коэффициента ослабления амплитуды выходного сигнала ВЗН-МФПУ с фильтрами верхних частот на входе большой интегральной схемы (БИС) считывания при равномерной засветке матрицы фоточувствительных элементов (ФЧЭ) модулированным излучением абсолютно черного тела (АЧТ). Также произведена оценка формы выходного сигнала, создаваемого точечным источником оптического излучения при различных характеристиках электронного тракта МФПУ. Произведен расчет частотно-контрастных характеристик (ЧКХ) многорядных МФПУ с различными параметрами. Представлены выходные изображения модели при наличии в фокальной плоскости объектива цели и пространственно — неоднородного фонового изображения.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

Ключевые слова: МФПУ, ВЗН, МФЧЭ, БИС считывания, ЧКХ, нерекурсивный фильтр, точечная цель, пеленгационная характеристика, TDI FPA.

Введение

Многорядные матричные фотоприемные устройства (МФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) широко используются для достижения предельных значений по чувствительности и пространственному разрешению. Процесс сканирования с суммированием сигналов отдельных фоточувствительных элементов (ФЧЭ) в соседних линейках субматрицы МФПУ обеспечивает ряд важных преимуществ, таких как повышенное по сравнению с МФПУ «смотрящего» типа значение удельной обнаружительной способности, уменьшение влияния разброса чувствительности ФЧЭ и количества дефектных элементов на вероятность обнаружения цели [1], возможность создания топологического перекрытия [2] или организация микросканирования [1] для улучшения пеленгационной характеристики [3] и т. д.

На данный момент проблема регистрации точечных источников оптического излучения с использованием ВЗН МФПУ исследована недостаточно полно. При разработке новых образцов изделий возникает ряд вопросов, решение которых требует комплексного подхода. Таким подходом может стать компьютерное моделирование ВЗН МФПУ при различных параметрах входного оптического сигнала. Важным моментом является экспериментальная проверка результатов модели, а также их сравнение с результатами отдельных теоретических расчетов. Следующим шагом является определение области применения, т. е. необходимо строго задать диапазон изменения исходных параметров для предотвращения выхода за рамки тех предположений, на которых модель основана. Если эти два условия выполнены, то можно использовать модель для получения тех характеристик, которые пока не были измерены экспериментально. Именно по этому принципу выполнена представленная работа.

Козлов Кирилл Владимирович, инженер[1], аспирант[2].
Соляков Владимир Николаевич, главный научный сотрудник[1], профессор[2].
Кузнецов Петр Александрович, главный специалист[1]
Полесский Алексей Викторович, главный метролог[1]
Хамидуллин Камиль Алиевич, инженер 1 кат.[1]
Семенченко Наталья Александровна, инженер[1]
Бедарева Елизавета Александровна, инженер[1]
[1]ОАО «НПО «Орион».
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.
Тел. (495) 373-94-00.
E-mail: orion@orion-ir.ru
[2]Московский физико-технический институт.
Россия, 141700, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2014 г.

© Полесский А. В., Хамидуллин К. А., Семенченко Н. А., Бедарева Е. А., Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н., 2014

Вначале приведено описание основных математических соотношений, являющихся основой модели, и приведен допустимый диапазон входных параметров. Затем осуществлена экспериментальная проверка некоторых выходных характеристик модели. После этого модель использовалась для прогнозирования выходных характеристик будущих изделий.

Одним из решенных вопросов является определение амплитуды выходного сигнала МФПУ при равномерной засветке матрицы ФЧЭ модулированным излучением АЧТ с учетом параметров модулятора и частотного тракта большой интегральной схемы (БИС) считывания. Данный вопрос является важным для корректного измерения основных параметров ВЗН-системы по модулированному излучению. Другими важными вопросами, освещенными в работе, являются форма пеленгационной характеристики ВЗН-МФПУ и его частотно-контрастная характеристика (ЧКХ). Данные параметры в первую очередь определяют пространственное разрешение системы обнаружения и зависят от многих факторов. В конце работы представлены изображения на выходе ВЗН МФПУ, полученные при наличии в фокальной плоскости изображений точечной цели и пространственно-неоднородного фонового излучения.

Основы модели

При регистрации «точечных» источников излучения в фокальной плоскости формируется распределение интенсивности (пятно) излучения, которое не зависит от размеров источника излучения, а определяется свойствами оптической системы и трассы прохождения излучения. Если минимальный размер пятна ограничен дифракционным пределом оптической системы, то распределение энергии излучения в пятне описывается функцией Эйри:

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{2J_1(ka\sin\theta)}{ka\sin\theta} \right)^2, \qquad (1)$$

где J_1 — первая функция Бесселя, I_0 — интенсивность в центре пятна (в фотонах/м^2), k — волновой вектор, a — апертура объектива.

Если количество независимых факторов, определяющих распределение интенсивности в пятне, достаточно велико, то в большинстве случаев это распределение можно аппроксимировать Гауссовой функцией:

$$I(R) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2 \cdot R^2} \right), \qquad (2)$$

где I_0 — интенсивность излучения в центре пятна (в фотонах/м^2), R — радиус пятна (в метрах). На расстоянии R от центра пятна интенсивность составляет $\approx 0{,}6 \times I_0$, причем 80 % энергии пятна содержится в области радиусом $1{,}8 \cdot R$.

При моделировании используется одно из данных распределений в зависимости от параметров системы.

Значение сигнала (в электронах), полученное за время интегрирования $T_н$, вычисляется в соответствии с выражением:

$$Q(t) = \bar{\eta} \int_{t_0+t}^{t_0+t+T_н} \left(\int_{Vt-a/2}^{Vt+a/2} \int_{-b/2}^{b/2} I(r)\,dxdy \right) dt, \qquad (3)$$

где t_0 — начальный момент времени (в секундах), V — скорость движения пятна излучения по матрице ФЧЭ (в м/с), a — эффективный размер ФЧЭ в направлении сканирования (в метрах), b — эффективный размер ФЧЭ в направлении, перпендикулярном сканированию (в метрах), $I(r)$ — значение интенсивности на расстоянии r от центра пятна (вычисляется в соответствии с выражением (1) или (2)), $\bar{\eta}$ — среднее значение квантовой эффективности (при всех дальнейших вычислениях принято равным 1). В рамках представленной модели чувствительность ФЧЭ равномерна в пределах указанного эффективного размера и нулевая за его пределами.

В режиме ВЗН пятно излучения последовательно регистрируется всеми элементами канала при его перемещении по матрице в процессе сканирования. Затем накопленные сигналы фильтруются, усиливаются и суммируются в заданной последовательности. На окончательном этапе производится коммутация и усиление сигналов в выходных каскадах БИС считывания. В рамках модели все коэффициенты усиления заданы равными 1. Обычно количество фаз ВЗН на время перемещения изображения на расстояние между соседними фоточувствительными элементами больше 1 (как правило, 2 на ФЧЭ). Данный параметр определяется топологией ФЧЭ. В направлении, перпендикулярном сканированию, также применяются различные конструктивные решения, увеличивающие пространственное разрешение, например, создание топологического перекрытия, т. е. расположение нескольких субматриц с различными сдвигами в направлении, перпендикулярном сканированию. Данный подход позволяет не использовать микросканирование.

В целях исследования смоделировано ВЗН МФПУ формата 1024×10, топология которого состоит из 4 субматриц, смещенных друг относительно друга. Размер фоточувствительного элемента равен 30 мкм, расстояния между соседними ФЧЭ в направлении сканирования и в направле-

нии, перпендикулярном сканированию, равны, соответственно, 45 мкм и 60 мкм. Период пространственной дискретизации изображения 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.

Согласно модели, частотный тракт каждой входной ячейки [4] канала МФПУ ограничен двумя значениями частот, а именно $f_н$ и $f_в$ (в Гц) по уровню ≈0,7. Спад (подъем) частотной характеристики происходит по закону RC-фильтров нижних (верхних) частот. Нижняя граничная частота обычно задается разработчиком оптико-электронной аппаратуры в соответствии с решаемой задачей обнаружения. Верхняя граничная частота в схемах с накоплением определяется интегратором и вычисляется в соответствии с выражением:

$$f_в = \frac{1}{2T_н}. \qquad (4)$$

Фильтрация накопленных сигналов в модели производится с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ) с прямоугольной оконной функцией.

Основными параметрами, задаваемыми в модели, являются:

– характер источника оптического сигнала (функция Гаусса, функция Бесселя, модулированное излучение, равномерно засвечивающее МФЧЭ, многоточечная диафрагма, прямоугольная мира, синусоидальная мира);

– характер фонового излучения (смоделированные изображения части земной поверхности, градиентные излучения, функция Пуассона, отсутствие фонового излучения);

– количество сумматоров БИС считывания;

– количество выборок за время перемещения пятна излучения между соседними ФЧЭ канала;

– скорость сканирования;

– частота опроса;

– граничная частота фильтра верхних частот (для режима АС);

– исходное положение пятна излучения;

– тип и параметры топологии ФЧЭ;

– величина разброса параметров ФЧЭ.

Модель работает в диапазоне оптического излучения 2—5 мкм (при размере ФЧЭ не менее 15 мкм по уровню 0,5) для ФПУ с передаточной характеристикой, близкой к линейной в пределах динамического диапазона.

Проверка модели и определение коэффициента ослабления

Экспериментальная проверка представленной модели производилась с использованием многорядного МФПУ с режимом ВЗН формата 1024×10, работающего в ближнем ИК-диапазоне спектра [4]. Представленное устройство может работать в двух основных режимах: DC — с нулевой нижней граничной частотой и АС — с нижней граничной частотой, равной 35 Гц. Высокочастотная фильтрация производится для уменьшения неинформативной постоянной составляющей сигнала. Количественная проверка осуществлялась в режимах АС и DC с использованием модулированного излучения АЧТ, равномерно засвечивающего матрицу ФЧЭ. Для расчетов использовался коэффициент передачи МФПУ, определенный экспериментально. Частота модуляции оптического сигнала была выбрана равной 20 Гц, модулятор расположен в непосредственной близости от диафрагмы АЧТ. Диаметр диафрагмы АЧТ равен 0,8 мм. Соответственно, фронт нарастания оптического сигнала в режиме модуляции равен ≈0,25 мс при времени накопления ≈0,26 мс. Таким образом, является корректным рассмотрение фронта нарастания оптического излучения как вертикального. На рис. 1, *а* представлена временная характеристика канала МФПУ в режиме АС при равномерной засветке матрицы ФЧЭ модулированным излучением (получена с помощью модели). Значение времени накопления во всех последующих расчетах и измерениях было выбрано равным 261 мкс. В результате расчетов полученная амплитуда сигнала совпала со значением, измеренным контрольно-измерительной системой при известном коэффициенте передачи МФПУ. Подробные расчеты приведены в работе [5].

На рис. 1, *б* представлен сигнал с канала МФПУ в режиме DC. Амплитуда сигнала примерно в 2 раза больше соответствующей амплитуды в режиме АС при $f_н$ = 35 Гц, что также хорошо согласуется с экспериментом.

На рис. 1, *в* представлен сигнал с канала МФПУ в режиме DC при продолжительности фронта нарастания сигнала, равной 10 мс. Фронт сигнала моделируется следующей функцией [6].

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \pi\frac{(t - t_0)}{2T_c}\right), \qquad (5)$$

где T_c — продолжительность фронта, $t - t_0$ — текущий момент времени.

В режиме АС ($f_н$ = 35 Гц) заметен спад амплитуды сигнала более чем в 2,5 раза (рис. 1, *г*).

На рис. 1, *д* представлена аналогичная 1, *а* характеристика, но только для случая $f_н$ = 200 Гц. В данном случае коэффициент ослабления сигнала равен ≈6,3 (по сравнению с режимом DC).

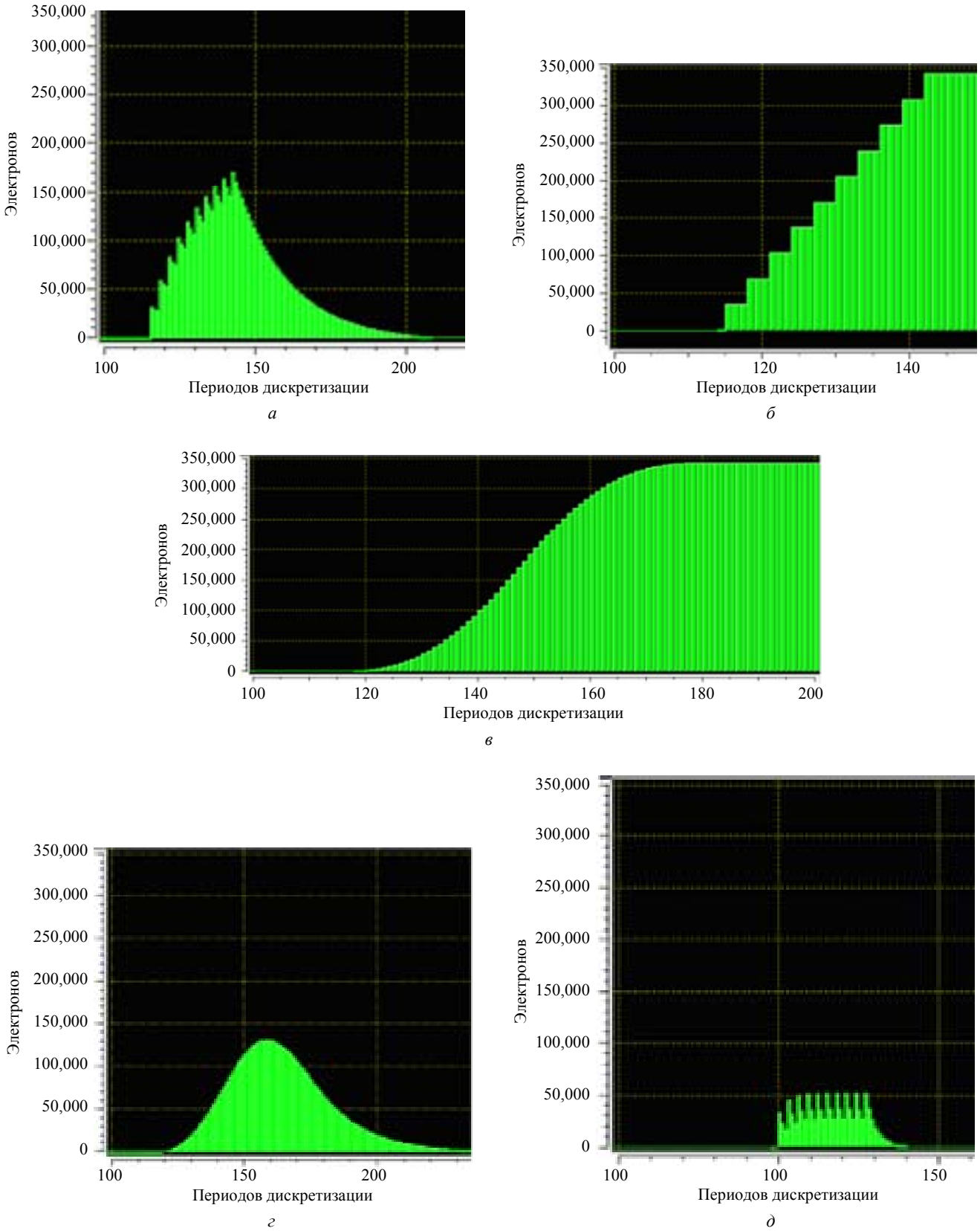


Рис. 1. Выходные характеристики модели при равномерной засветке матрицы ФЧЭ модулированным излучением АЧТ

Представленные характеристики демонстрируют возможность модели производить пересчет значений сигналов, полученных на выходе МФПУ при равномерной засветке МФЧЭ модулированным излучением АЧТ, в соответствующие отклики от точечной цели в режиме сканирования. Необходимость данной процедуры возникает при измерении параметров ВЗН систем, в которых производится дополнительная высокочастотная фильтрация сигналов, т. е. при $f_н \neq 0$. Дело в том,

что фильтр верхних частот гораздо слабее влияет на форму сигнала от точечной цели (это влияние также учитывается) в режиме сканирования, чем на форму выходных характеристик при равномерной засветке МФЧЭ модулированным излучением АЧТ. Таким образом, измеренную (по «модулятору») амплитуду следует домножить на некий коэффициент, который бы сделал новое значение амплитуды равным отклику от точечной цели в режиме сканирования. Операцию «пересчета» можно производить для любых параметров контрольно-измерительного оборудования, обеспечивающих заданное значение отношения сигнал/шум и любого тракта ВЗН — МФПУ. Это позволяет в ряде случаев не использовать сложные сканирующие системы для измерения основных параметров приемника.

Исследование пространственных характеристик

Важной характеристикой оптико-электронной системы является частотно-контрастная характеристика (*ЧКХ*), характеризующая способность системы воспроизводить детали исходного изображения. В случае ВЗН МФПУ итоговое значение *ЧКХ* системы получается путем перемножения *ЧКХ* объектива, *ЧКХ* чувствительного элемента и *ЧКХ* электронного тракта, т. е. имеем выражение:

$$ЧКХ = ЧКХ_{Об} \cdot ЧКХ_{ФЧЭ} \cdot ЧКХ_{Эл}. \qquad (6)$$

В случае дифракционно-ограниченной системы в пространстве изображений *ЧКХ* объектива вычисляется в соответствии со следующими выражениями согласно [3]:

$$ЧКХ_{Об}(f) = \\ = \frac{2}{\pi}\left(\arccos\left(\frac{f}{2f_c}\right) - \frac{f}{2f_c}\left(1-\left(\frac{f}{2f_c}\right)^2\right)^{0,5}\right), \qquad (7)$$

$$f_c = \frac{d}{2\lambda F}, \qquad (8)$$

где f — пространственная частота падающего излучения (пар линий/мм), λ — длина волны падающего излучения, F — фокусное расстояние объектива, d — диаметр апертуры. В текущих расчетах диаметр апертуры принят равным 280 мм, а фокусное расстояние — 1200 мм.

Если рассматривать чувствительный элемент как квадратную площадку с равномерным распределением чувствительности по площади, то его *ЧКХ* можно вычислить по такой формуле:

$$ЧКХ_{ФЧЭ}(f) = \frac{\sin(af\pi)}{af\pi}, \qquad (9)$$

где a — размер ФЧЭ, f — пространственная частота излучения, падающего на матрицу ФЧЭ.

В классе рассматриваемых устройств значение $f_в$, как правило, во много раз превышает $f_н$ и спадом *ЧКХ,* вызванным наличием фильтра нижних частот, можно пренебречь, т. к. данный спад начинает существенно влиять на пространственных частотах, намного превышающих частоту Найквиста. Тогда *ЧКХ* электронного тракта можно вычислить следующим образом:

$$ЧКХ_{Эл}(f) = \frac{fV_{ск} / f_н}{\left(1+\left(fV_{ск} / f_н\right)^2\right)^{0,5}}, \qquad (10)$$

где $V_{ск}$ – скорость сканирования, f – пространственная частота. При получении данного выражения использована связь пространственной и временной частоты через скорость сканирования.

Графики *ЧКХ* системы представлены на рис. 2.

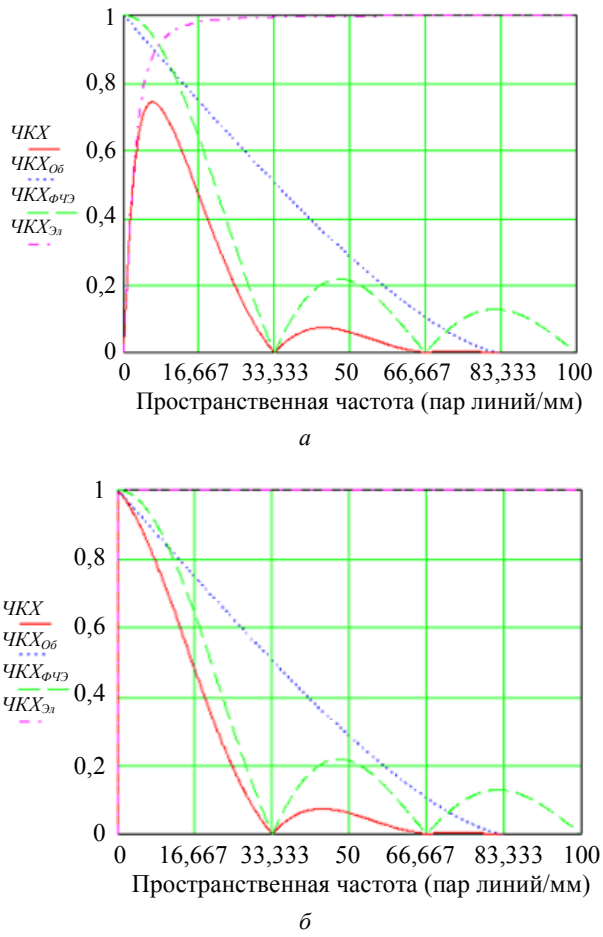


Рис. 2. ЧКХ в направлении перпендикулярном сканированию (а) и в направлении сканирования при $f_н$ = 200 Гц (б)

На рис. 2, *а* представлена *ЧКХ* без учета фильтров верхних частот на входах БИС, что со-

ответствует рассмотрению направления, перпендикулярного сканированию. На рис. 2, *б* представлена *ЧКХ* при наличии фильтров верхних частот с $f_н$ = 200 Гц. Отметим серьезное снижение контраста изображения (больше чем на 20 % в максимуме) в направлении сканирования при наличии фильтров верхних частот на входе БИС.

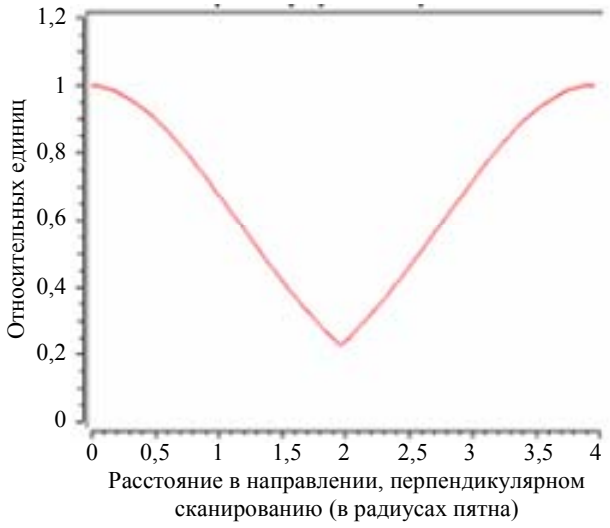
Было произведено измерение *ЧКХ* при помощи модели с использованием синусоидальных мир различной частоты. Для этого производилось измерение контраста выходных изображений в направлении сканирования и в направлении, перпендикулярном сканированию. Итоговое значение *ЧКХ* вычислялось путем перемножения *ЧКХ*, полученного с помощью модели и *ЧКХ* объектива. Результаты с точностью до 10 % совпали с результатами, представленными на рис. 2.

С помощью модели был произведен расчет пеленгационных характеристик ВЗН ФПУ с параметрами, представленными в разделе «Основы модели». Радиус пятна излучения выбран равным ≈ 27 мкм (по уровню 0,2). Расчет производился в двух направлениях: в направлении сканирования и в направлении, перпендикулярном сканированию. Результаты представлены на рис. 3. Расчет характеристик в направлении, перпендикулярном сканированию, был произведен для одной из четырех субматриц. Количество фаз ВЗН за время перемещения изображения на расстояние между соседними ФЧЭ равно 3, расстояния между центрами соседних ФЧЭ в направлении сканирования и в направлении, перпендикулярном сканированию, равны 45 мкм и 60 мкм, соответственно.

Проведем наглядную демонстрацию изображений и временных характеристик на выходе модели, демонстрирующих особенности регистрации МФПУ малых объектов, а также групп малых объектов при различных режимах работы. На рис. 4, *а* слева представлено изображение точечной цели радиуса ≈ 27 мкм (по уровню $0{,}2I_0$) в режиме AC при $f_н$ = 35 Гц, а справа — аналогичное изображение в режиме DC. Считается, что энергия в пятне излучения подчиняется гауссовому закону распределения. Значение интенсивности в центре пятна было выбрано равным $14{,}6\cdot10^{16}$ фотонов/м^2. На рис. 4, *б*, *в*, *г* представлены временные характеристики значений сигналов с канала, на который приходится максимум пятна (также в режимах AC и DC). Значения частот $f_н$ равны соответственно 200 Гц, 35 Гц, 0 Гц.

На рис. 5 представлены выходные характеристики модели при засветке МФЧЭ изображением матрицы диафрагм, состоящей из точечных источников, подчиняющихся распределению Гаусса. Радиусы изображений источников равны ≈ 27 мкм (по уровню $0{,}2I_0$), расстояние между источниками равно 15 мкм. На рис. 5, *б* представлена временная характеристика одного из каналов в режиме AC при $f_н$ = 35 Гц, а на рис. 5, *в* — та же характеристика, только в режиме DC.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о существенном ухудшении пространственного разрешения системы в направлении сканирования в режиме AC при $f_н$ > 50 Гц на низких пространственных частотах. Кроме того, данный режим создает дополнительные трудности при создании кремниевых БИС считывания (создание дополнительных разделительных емкостей и т. д.), либо усложняет систему обработки информации, на которую будет возложена, кроме всего прочего, задача цифровой фильтрации сигналов. Несмотря на все представленные недостатки, режим AC имеет ряд существенных преимуществ, речь о которых пойдет в следующем разделе.



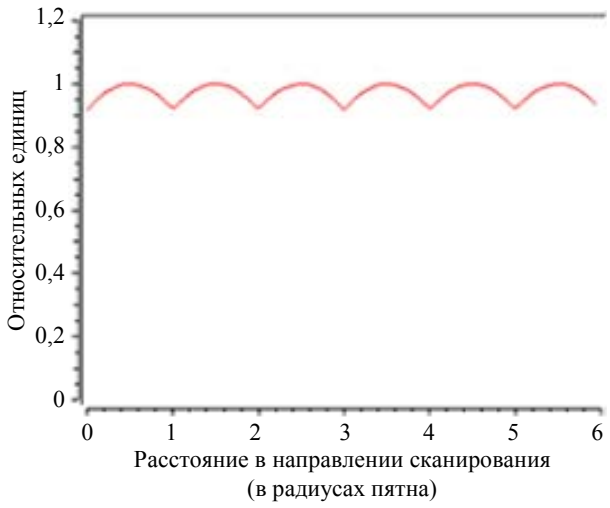
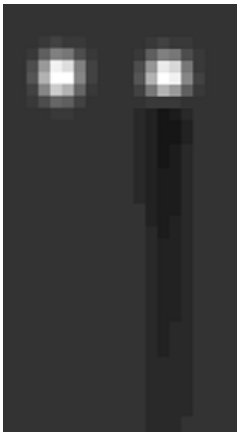
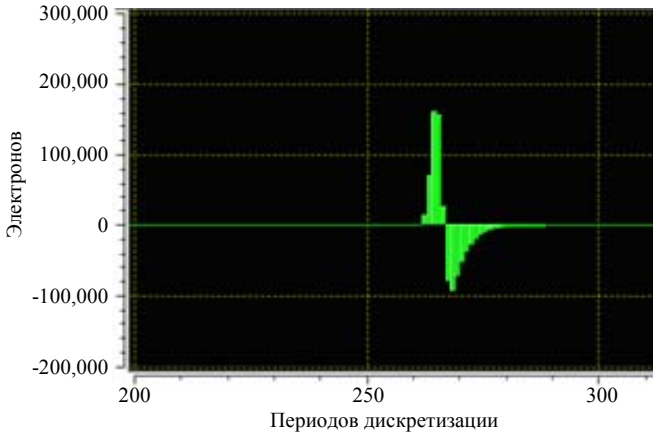


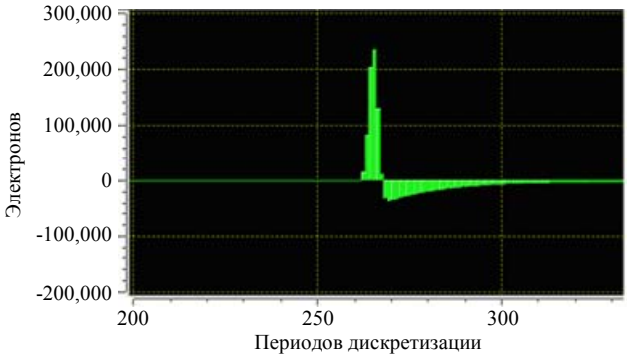
Рис. 3. Модуляционные характеристики ВЗН – ФПУ



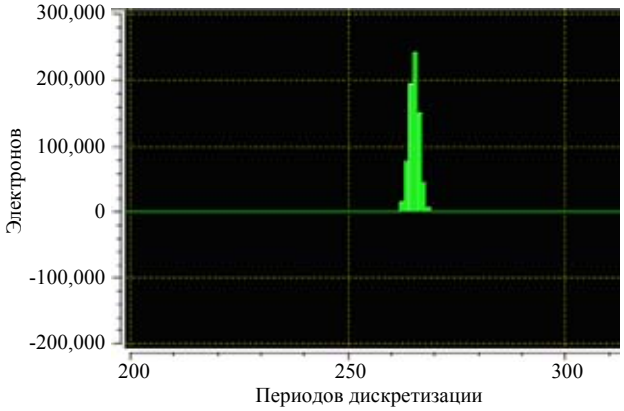
а



б

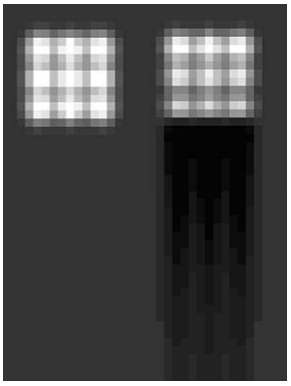


в

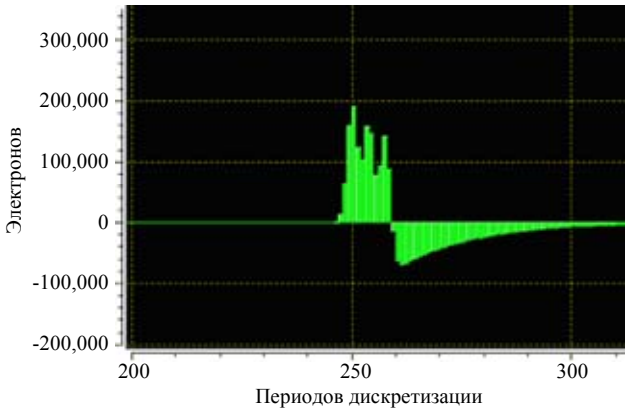


г

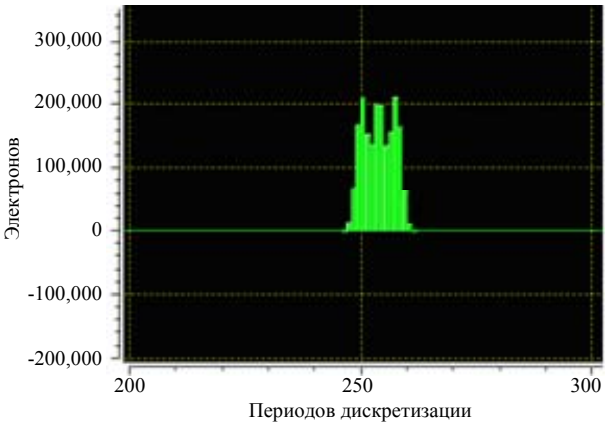
Рис. 4. Моделирование реакции системы на точечную засветку в режиме сканирования



а



б



в

Рис. 5. Выходные характеристики модели при наличии на входе сигнала, сформированного матрицей точечных диафрагм

Изображения точечной цели на неоднородном фоне

С помощью модели были получены изображения точечной цели на неоднородном фоне. В качестве тестового фонового изображения использовалось модельное изображение двухкомпонентного пространственно-неоднородного фона, созданное в Лаборатории цифровых методов обработки изображений ИАиЭ СО РАН (рис. 6). В рамках данного эксперимента считалось, что изображение соответствует распределению интенсивностей, создаваемому фоновым излучением в фокусе объектива. Параметры МФПУ в модели аналогичны используемым в предыдущем разделе. Было принято, что элемент изображения (пиксель) равен 15 мкм, что соответствует 1 км на обозреваемой поверхности. Формат изображения равен 1024×1024, т. е., если использовать 1024 канала, то можно перекрыть площадь, равную 1024 км^2 за 1 проход сканера. Значение интенсивности фона варьируется в интервале от 0 до 10^{17} фотонов/м^2 . Параметры цели соответствуют параметрам, определенным в предыдущем разделе.

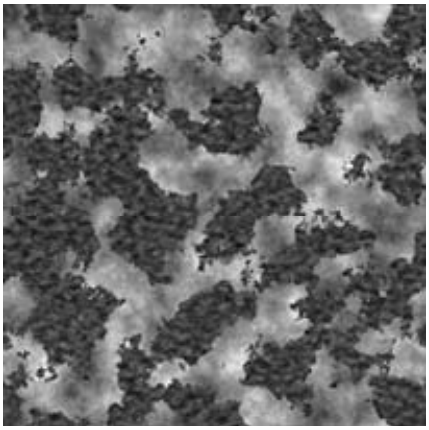


Рис. 6. Модель пространственно-неоднородного фона, созданная ИАиЭ СО РАН

На рис. 7—9 представлены выходные изображения модели в режимах DC и AC при различных значениях $f_н$ в одном диапазоне значений.

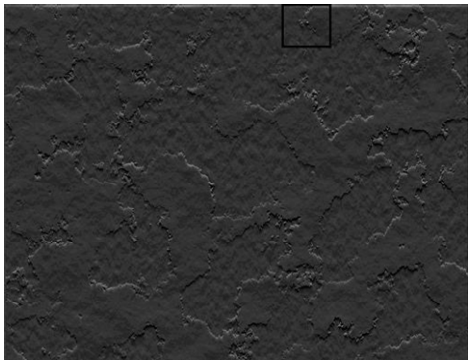


Рис. 7. Изображение на выходе модели при $f_н$ = 200Гц в режиме AC

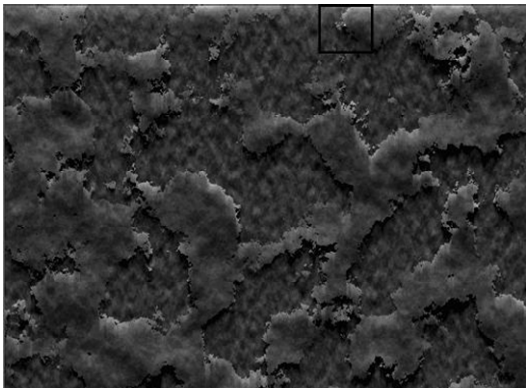


Рис. 8. Изображение на выходе модели при $f_н$ = 35Гц в режиме AC

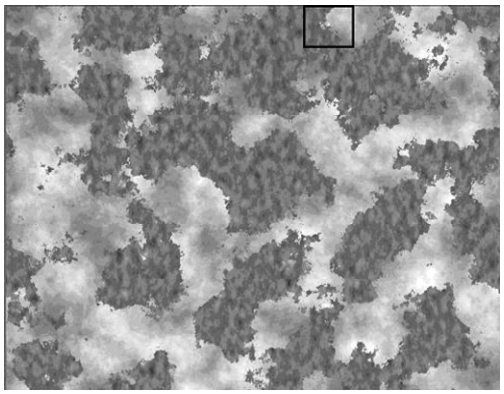


Рис. 9. Изображение на выходе модели в режиме DC

Следует отметить, что наилучшим образом устранение неинформативной фоновой компоненты входного сигнала происходит в режиме AC при $f_н$ = 200 Гц, что способствует более явному выделению полезного сигнала. Именно это и является положительным эффектом режима AC.

Экспериментальные исследования ВЗН МФПУ

Был поставлен эксперимент для качественной экспериментальной проверки выходных характеристик модели в режиме сканирования. Для этого использовалось ВЗН МФПУ, представленное в разделе «Проверка модели и определение коэффициента ослабления». В качестве цели использовалась нагретая нить, расположенная перпендикулярно направлению сканирования. Были получены изображения комнаты в отраженном солнечном свете (рис. 10). На данных изображениях наблюдаются силуэты шкафа, двери, проводов, нагретой нити и т. д. Следует отметить существенно более тонкие контуры в режиме AC, а также наличие темных полос, являющихся результатом дифференцирования. Подобные эффекты аблююдались при моделировании.

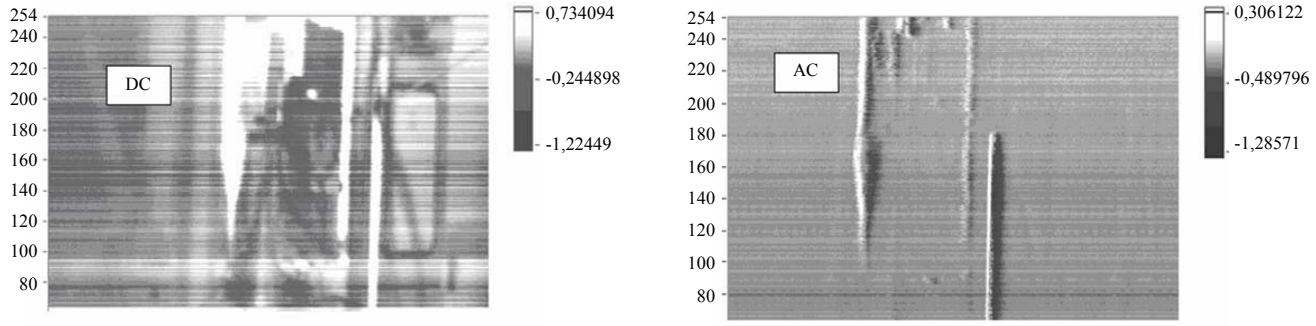


Рис. 10. Изображение комнаты, полученное в режиме сканирования

Было произведено исследование зависимости результирующего изображения от направления сканирования (при фиксированном направлении опроса). На рис. 11 представлены результаты данных исследований. Как и следовало ожидать, в случае обратного направления сканирования при прямом направлении опроса, информативность изображения теряется. Данный эксперимент является важным тестом для проверки корректности суммирования сигналов в ВЗН – ФПУ.

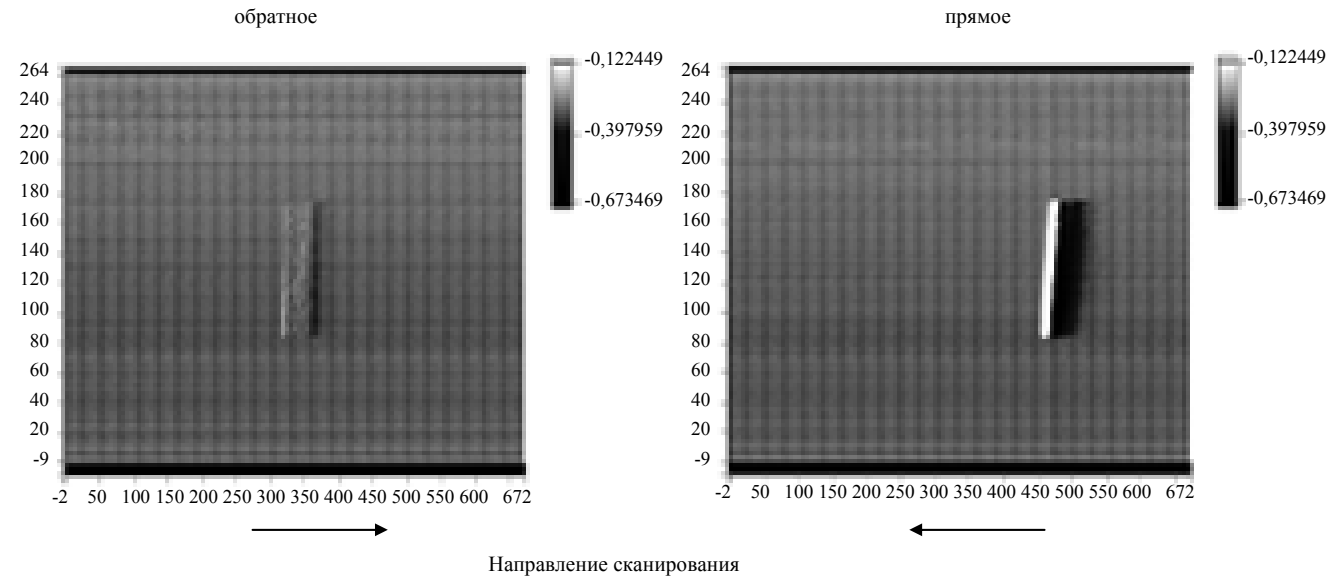


Рис. 11. Прямое и обратное направление сканирования

Заключение

Проблема регистрации точечных источников оптического излучения с использованием ВЗН МФПУ актуальна и имеет ряд спорных и нерешенных вопросов. Одним из них является выбор оптимальной и технологически реализуемой топологии МФЧЭ для наиболее эффективного решения задач теплопеленгации. Другим вопросом является выбор оптимального электронного тракта ВЗН МФПУ для каждого конкретного применения. Вопросы часто возникают при прогнозировании параметров итогового изображения в условиях эксплуатации. Настоящая работа позволяет определить некоторые аспекты перечисленных проблем путем математического моделирования выходных характеристик систем подобного класса при различных их параметрах, а также при различных параметрах входных сигналов. В работе проведено исследование зависимостей сигналов на выходе ВЗН тракта от нижней граничной частоты фильтров верхних частот на входе БИС считывания. МФЧЭ равномерно засвечивалась модулированным излучением АЧТ при различных параметрах модулятора оптического излучения. Осуществлена экспериментальная проверка выходных характеристик модели, а также определена область ее применения.

Представлены коэффициенты пересчета значений сигналов для некоторых значений нижних граничных частот электронного тракта БИС, а также для затянутого фронта нарастания оптического сигнала в режиме модуляции. На основании данной серии экспериментов сделан вывод о возможности проведения корректного измерения ос-

новного параметра ВЗН систем с известной топологией МФЧЭ, известных параметрах БИС и контрольно-измерительного оборудования при равномерной засветке МФЧЭ излучением АЧТ.

Произведен расчет *ЧКХ* системы «объектив—МФЧЭ–ВЗН-тракт». Сделан вывод, что повышение нижней граничной частоты электронного тракта МФПУ до 200 Гц приводит к понижению максимума *ЧКХ* больше, чем на 20 %. Произведен расчет пеленгационных характеристик ВЗН МФПУ. Показано, что глубина модуляции при перемещении пятна относительно ФЧЭ составляет не более 10 %.

Представлены выходные изображения и характеристики МФПУ при подаче на вход изображения «многоточечной диафрагмы» с заданными параметрами. На основании серии экспериментов определен отклик в режимах AC и DC при различных значениях ($f_н$ > 50 Гц).

Произведено моделирование выходных изображений ВЗН–МФПУ при наличии в фокальной плоскости объектива изображения цели на неоднородном фоне.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

Литература

1. *Тришенков М. А.* Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992.

2. *Бочков В. Д., Дражников Б. Н., Кузнецов П. А. и др.* // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 58.

3. *Дж. Ллойд* Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.

4. *Филачев А. М., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О. и др.* / Труды 22-й Международной научно-технической конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22—25 мая 2012 г., Москва, ФГУП «НПО «Орион», с. 22—24.

5. *Бочков В. Д., Дражников Б. Н., Кузнецов П. А. и др.* // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 53.

6. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. — М.: Мир, 1988.

7. *Tzannes A. P., Mooney J. M.* / IEEE Meeting of the IRIS Specialty Group on Passive Sensors, Feb. 22—24, 1999, Monterey, CA.

8. *Reed I. S., Gagliardi R. M., Shao H. M.* / IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems, AES-19(6):898-905, 1982.

9. *Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А.* Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005.

10. *Патрашин А. И.* / Тез. докл. XX Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. — М.: ФГУП «НПО «Орион», А02, 2008.

11. ГОСТ 17772. Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик, 1988.

12. *Соляков В. Н., Дражников Б. Н., Хамидуллин К. А. и др.* // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 506.

13. *Хадсон Р.* Инфракрасные системы. — М.: Мир, 1972.

14. *Соляков В. Н., Козлов К. В., Кондюшин И. С. и др.* / IX Международный форум «Оптические системы и технологии» OPTICS-EXPO 2013 Официальный каталог. С. 61.

15. *Бочков В. Д., Дражников Б. Н., Кузнецов П. А. и др.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 1. С. 65.

16. *Бочков В. Д., Дражников Б. Н., Кузнецов П. А. и др.* // Успехи прикладной физики, 2014. Т. 2. № 1. С. 71.

17. *Соляков В. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А.* // Прикладная физика. 2014. № 2. С. 54.

18. *Кузнецов П. А., Хромов С. С., Зайцев А. А.* // Прикладная физика. 2012. № 5. С. 95.

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

Mathematical model of TDI FPA

K. V. Kozlov, V. N. Solyakov, P. A. Kyznetsov, A. V. Polessky, K. A. Khamidullin, N. A. Semenchenko, and E. A. Bedareva

Orion Research-and-Production Association
46/2 Entuziastov shosse, Moscow, 111123, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received September 15, 2014

Focal plane arrays (FPA) with time delay integration (TDI) are used widely to reach high dimensional resolution and sensitivity. Such a system can solve different problems and one of them is the detection of weak point target. In order to make a comprehensive analysis of TDI FPA (which works in infrared optical range) the model has been designed. Using this model some problems has been solved. For example, the amplitudes of FPA signals have been calculated in different modes. These results can be used in metrology to recalculate the signal, which has been measured using modulated black body radiation without scanning, to the signal of point target in scanning mode. The model can also be used to predict the output image of TDI FPA with different parameters, such

as the parameters of readout circuit (bandwidth, number of summators etc.), the parameters of topology (size and number of elements, number of matrixes etc.), the parameters of target and background etc. The modulation transfer function of TDI FPA has also been calculated.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

Keywords: TDI, FPA, photodetector, multiplexer.

References

1. M. A. Trishenkov, *Photodetector Devices and CCD* (Radio i Svyaz', Moscow, 1992) [in Russian]..

2. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, et al., Prikladnaya Fizika, No. 1, 58 (2014).

3. J. M. Lloyd, *Thermal Imaging Systems* (Plenum Press, New York and London, 1975; Mir, Moscow, 1978).

4. A. M. Filachev, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, et al., in *Proc. XXII Intern. Conf. on Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, May 22—25, 2012), pp. 22—24.

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

6. Gilbert Gaussorgues. *La Thermographie Infrarouge.* (Lavoisier, Paris; Mir, Moscow, 1988).

7. A. P. Tzannes and J. M. Mooney, in *Proc. IEEE Meeting of the IRIS Specialty Group on Passive Sensors,* (Feb. 22—24, 1999, Monterey, CA).

8. I. S. Reed, R. M. Gagliardi, and H. M. Shao, in *Proc. IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems*, (AES-19(6):898-905, 1982).

9. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Physical Base.* (Fizmatkniga, Moscow, 2005) [in Russian].

10. A. I. Patrashin, in *Proc. XX Intern. Conf. on Photoelectronics, A02* (Npo Orion, Moscow, 2008).

11. GOST R 17772. Detectors of Radiation. Semiconductor, Photoelectric, and Photodetector Devices. Measuring Methods. 1988 [in Russian].

12. V. N. Solyakov, B. N. Drazhnokov, K. A. Khamidullin, et al., Prikladnaya Fizika, No. 6, 506 (2013).

13. Richard D. Hudson, *Infrared System Engineering* (Wiley-Interscience, 1969; Mir, Moscow, 1972).

14. V. N. Solyakov, K. V. Kozlov, I. S. Kondyushin, et al., in *Proc. IX Intern. Forum "Optical Systems and Technologees"* (OPTICS-EXPO 2013, Official Catalogue). p. 61.

15. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki **2,** 65 (2014).

16. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki **2,** 71 (2014).

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

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

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