УДК 621.383

Классификация и исследование взаимосвязи каналов крупноформатного многорядного инфракрасного фотоприемного устройства

К. В. Козлов, П. А. Кузнецов, В. Н. Соляков, К. А. Хамидуллин, Н. С. Антипов

Проведено комплексное теоретическое исследование, позволившее оценить степень влияния взаимосвязи сигналов многорядного крупноформатного фотоприемного устройства (ФПУ) на его характеристики. Предложено классифицировать виды взаимосвязи следующим образом, а именно, выделить два вида фотоэлектрической связи: "внутриканальную фотоэлектрическую связь" и "межканальную фотоэлектрическую связь", а также два вида электрической связи: "взаимосвязь в схеме ВЗН-суммирования" (ВЗН — временная задержка и накопление) и "взаимосвязь внутри блока сопряжения". Представлены формы выходных сигналов ФПУ, характерные для каждого вида взаимосвязи сигналов. Вычисления проведены для двух различных топологий матриц фоточувствительных элементов. Результаты, полученные в работе, применимы для широкого класса инфракрасных (ИК) ФПУ с режимом ВЗН.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

Ключевые слова: взаимосвязь, ФПУ, ВЗН, ФЧЭ, БИС-считывания.

Введение

Многорядные ИК фотоприемыне 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 с различных фоточувствительных элементов (ФЧЭ) суммируются последовательно, что позволяет существенно повысить отношение сигнал/шум (в случае идеального ВЗН-суммирования — в $\sqrt{N}$ раз, где N — количество ФЧЭ в составе ВЗН-канала), а также снизить требования к числу дефектных ФЧЭ и разбросу их чувствительности.

Козлов Кирилл Владимирович, инженер 1 кат.[1], аспирант[2].
Кузнецов Петр Александрович, главный специалист[1].
Соляков Владимир Николаевич, главный научный сотрудник[1], профессор[2].
Хамидуллин Камиль Алиевич, инженер 1 кат.[1].
Антипов Никита Сергеевич, инженер 1 кат.[1,3].
[1] АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru
[2] Московский физико-технический институт.
Россия, 141700, г. Долгопрудный МО, Институтский пер., 9.
[3] Московский государственный технологический университет «Станкин».
Россия, 127055, Москва, Вадковский пер., 3а.

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2016 г.

© Козлов К. В., Кузнецов П. А., Соляков В. Н., Хамудуллин К. А., Антипов Н. С., 2016

Расширенный формат видеоизображения может обеспечиваться путем объединения информации с независимых матричных фотоприемных модулей [7], расположенных в фокальной плоскости объектива. Блок-схема такого ФПУ показана на рис. 1. Изображение сцены регистрируется в режиме сканирования с помощью $N\times K$ фоточувствительных элементов (ФЧЭ) каждого из M фотоприемных модулей. Накопление фотосигналов происходит во входных ячейках больших интегральных схем (БИС) считывания [8—10], после чего осуществляется процедура ВЗН-суммирования.

В данной работе рассматривается класс ИК ФПУ с режимом ВЗН, реализованным внутри БИС-считывания. Накопленные и просуммированные в заданной последовательности сигналы с $N\times K$ ФЧЭ коммутируются на один или несколько выходов. M фоточувствительных модулей являются ключевыми элементом блока регистрации и предварительной обработки. Все модули охлаждаются до заданной температуры для уменьшения темновых токов ФЧЭ, снижения паразитных фоновых облученностей от частей конструкции прибора, уменьшения тепловых шумов БИС. Из охлаждаемой зоны сигналы поступают на входы блока сопряжения, где происходит их фильтрация и предварительное усиление перед процедурой аналого-цифрового преобразования (АЦП).

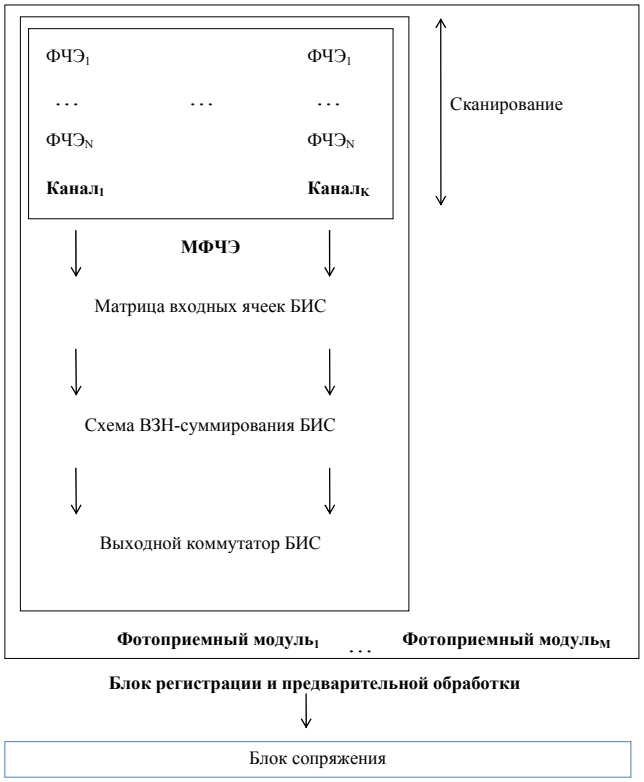


Рис. 1. Блок схема тракта преобразования входных сигналов.

Одной из проблем, возникающих при разработке многоэлементных фотоприемных устройств, является взаимное влияние сигналов на различных этапах оптико-электронного преобразования. В настоящее время проблема взаимосвязи сигналов матричного фотоприемного устройства (МФПУ) “смотрящего” типа рассмотрена достаточно полно (например, [11]). Однако на текущий момент в открытых источниках литературы не представлено результатов комплексного анализа процессов взаимного влияния сигналов многорядного ИК ФПУ, позволяющих определить вид взаимосвязи и спрогнозировать последствия для системы регистрации.

Целью текущей работы являются:

- разработка классификации видов взаимного влияния сигналов крупноформатного ИК ФПУ с режимом ВЗН;
- определение характерных особенностей выходных характеристик ИК ФПУ, позволяющих распознать тот или иной вид взаимного влияния;
- построение зависимостей, позволяющих количественно рассчитать степень ухудшения характеристик системы регистрации при наличии того или иного вида взаимосвязи.

Классификация видов взаимосвязи

Как правило, под фотоэлектрической связью многоэлементного фотоприемного устройства понимают влияние сигналов данного ФЧЭ на сигналы ФЧЭ соседних. При грамотно спроектированной БИС основной причиной такого рода взаимосвязи являются процессы диффузии генерированных носителей заряда. В случае многорядного ИК ФПУ данный вид связи может быть разделен на два: “внутриканальную фотоэлектрическую связь” и “межканальную фотоэлектрическую связь”, причем под каналом подразумевая ВЗН-канал.

Можно выделить отдельный вид взаимного влияния сигналов, характерный для ВЗН-систем с реализацией процесса суммирования сигналов внутри БИС в аналоговом виде. Как правило, для реализации такого режима суммирования используется аналоговый ВЗН-регистр с неединичным коэффициентом переноса заряда между ячейками, что приводит к “размытию” форм входных импульсов. Назовем данный вид связи “электрической взаимосвязью в схеме ВЗН-суммирования”.

Сигналы с каналов ИК ФПУ коммутируются внутри БИС на один или несколько выходов. Причем следующие подряд на временной диаграмме сигналы могут соответствовать удаленным друг от друга участкам кадра. В случае некорректно рассчитанной полосы частот аналогового тракта и недостаточного быстродействия системы, на изображении могут возникнуть ложные цели вследствие наличия “взаимосвязи внутри блока сопряжения”. Большая часть других видов связи, вызванных близким расположением электрических шин, утечками емкостей и т. д. с точки зрения математического описания могут быть сведены к “взаимосвязи внутри блока сопряжения” путем задания соответствующего алгоритма коммутации сигналов.

Взаимосвязь сигналов фотоприемного модуля

Рассмотрим виды взаимосвязи, свойственные для отдельного фотоприемного модуля. Пусть функция рассеяния точки (ФРТ) оптической системы задана распределением Гаусса:

$$h_{opt}(x,y) = e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2R^2}}, \qquad (1)$$

где x, y — координаты точки в плоскости МФЧЭ относительно центра пятна рассеяния, R — радиус пятна по уровню 0,6 максимума интенсивности. Диаметр пятна рассеяния в плоскости МФЧЭ равен 30 мкм по уровню 80 % функции концентрации энергии. Будем считать, что чувствительность каждого ФЧЭ распределена равномерно внутри квадрата размера 30×30 мкм. В данной работе рассмотрим два вида топологий МФЧЭ: четырехсубматричную и двухсубматричную (см. рис. 2). В случае четырехсубматричной топологии период дискретизации изображения в плоскости МФЧЭ

равен 15 мкм в направлении сканирования за счет трехкратной выборки сигналов между соседними ФЧЭ канала (b = 45 мкм). В направлении, перпендикулярном сканированию, период дискретизации также равен 15 мкм за счет топологического смещения четырех субматриц. В двухсубматричной топологии период дискретизации изображения в направлении сканирования и направлении, перпендикулярном сканированию, также равен 15 мкм за счет двухкратной выборки сигналов между соседними ФЧЭ канала (b = 30 мкм) и за счет топологического смещения двух субматриц.

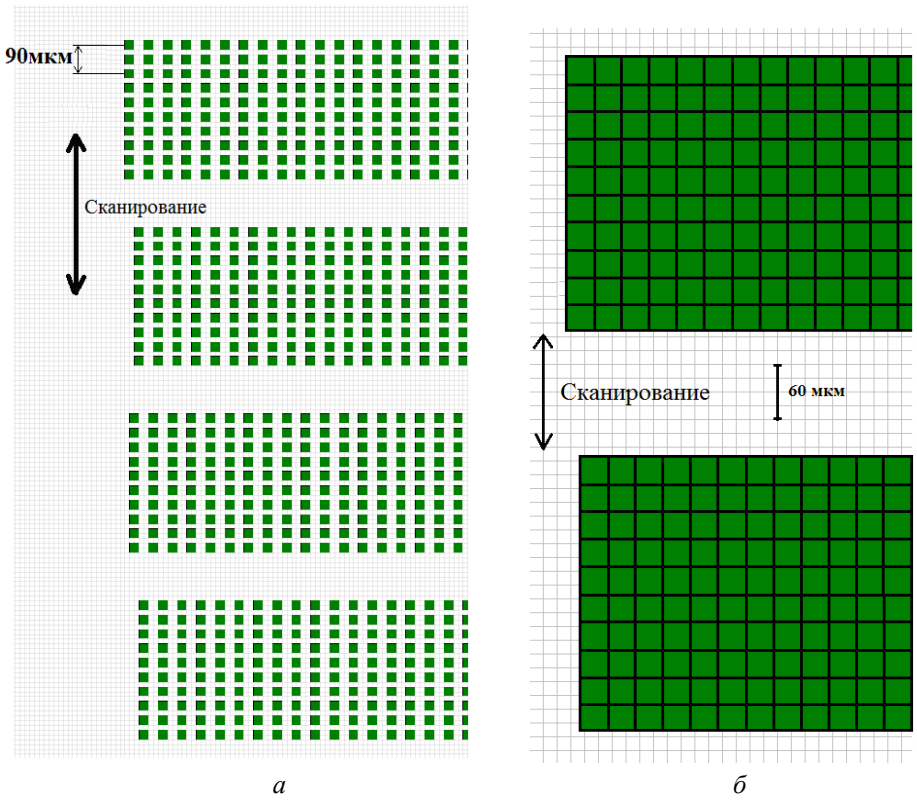


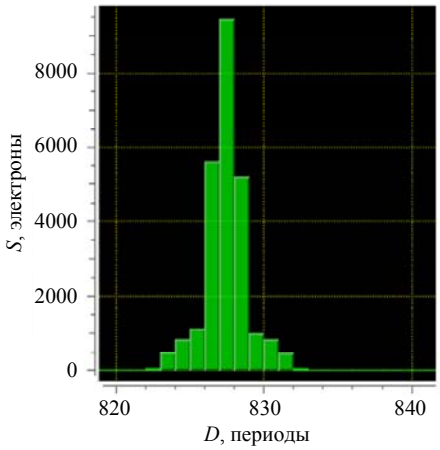
Рис. 2. Рассматриваемые в работе топологии МФЧЭ: четырехсубматричная (а), двухсубматричная (б).

Падающее на входной зрачок оптической системы излучение содержит информацию о ряде ключевых параметров объектов сцены, таких как их температуры, коэффициенты серости, взаимное расположение и т. д. Ввиду того, что оптико-электронный тракт фотоприемного устройства обладает фильтрующими свойствами, часть информации неизбежно теряется. Одной из ключевых характеристик системы регистрации излучения является модуляционная передаточная функция (МПФ) или функция передачи контраста [12]. Данная функция демонстрирует возможность системы передавать на выход сигналы с различной пространственной частотой. Для возможности применения специализированного математического аппарата описания оптико-электронных систем [13] будем считать ИК ФПУ линейной системой. Все вычисления будем производить с помощью математической модели, описание которой представлено в [14].

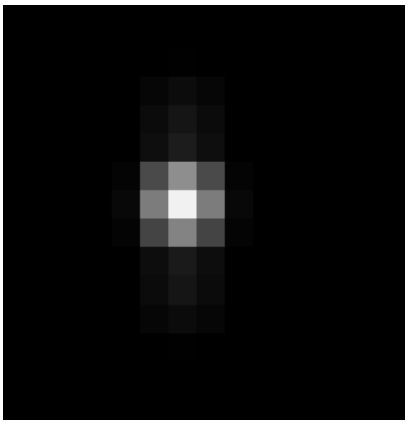
Опишем “внутриканальную фотоэлектрическую связь” фоточувствительного модуля следующим образом:

$$\Omega_{n1} = K_{\text{вн}}\omega_{n1-1} + K_{\text{вн}}\omega_{n1+1} + \omega_{n1}, \qquad (2)$$

где ω_n — сигнал (в электронах), накопленный на емкости n-го ФЧЭ канала, расчитанный без учета взаимного влияния, $K_{\text{вн}}$ — коэффициент взаимного влияния сигнала соседнего ФЧЭ, Ω_n — сигнал n-го ФЧЭ с учетом взаимного влияния. Факт наличия в системе “внутриканальной фотоэлектрической связи“ может быть установлен в результате анализа формы выходных сигналов ИК ФПУ (рис. 3) в режиме сканирования. D — номер периода пространственной дискретизации изображения сцены, S сигнал на накопительной емкости в конце цикла накопления. Как видно из рисунков, данный вид связи приводит к симметричному расширению импульса у его основания.



а

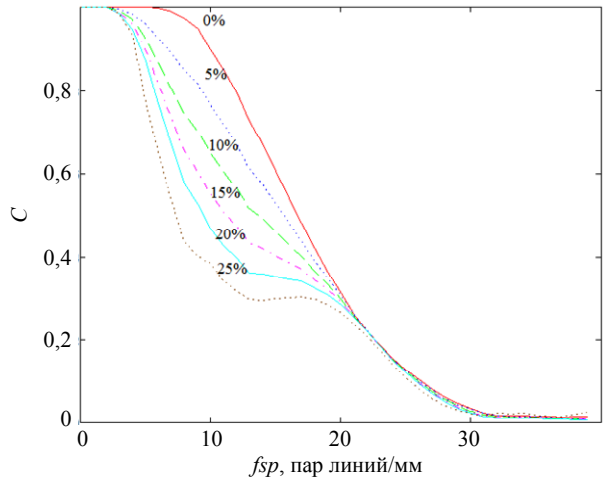


б

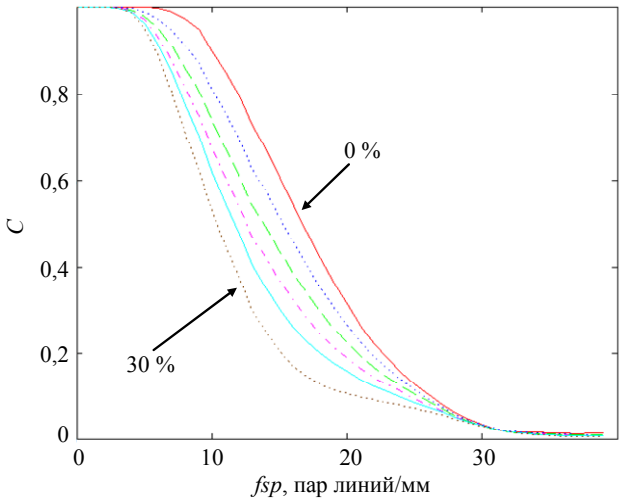
Рис. 3. Анализ формы выходных сигналов ИК ФПУ: а — временная зависимость сигналов с канала ИК ФПУ, соответствующего максимуму пятна, б — изображение пятна при наличии "внутриканальной фотоэлектрической связи". Коэффициент связи в данном случае равен 10 %. D — номер периода пространственной дискретизации изображения сцены, S — сигнал на накопительной емкости в конце цикла накопления.

Исследуем влияние "внутриканальной фотоэлектрической связи" на форму МПФ для топологий, представленных на рис. 2, *а* и 2, *б*. Расчеты будем проводить по прямоугольным штриховым мирам, расположенным на входе оптической системы. На рис. 4, *а* представлена МПФ, расчитанная для четырехсубматричной топологии (величины взаимосвязи в процентах указаны на рисунке), а на рис. 4, *б* — для двухсубматричной. *fsp* – пространственная частота изображения сцены в плоскости МФЧЭ, С – значение контраста изображения на выходе прибора. Характеристикам на рис. 4, *б* соответствуют следующие величины коэффициента $K_{вн}$ (сверху вниз): 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3. Отметим, что при одних и тех же величинах коэффициента взаимного влияния, формы характеристик на рис. 4, *а* и 4, *б* различаются, что объясняется различием расстояний между соседними ФЧЭ канала (b = 45 мкм для четырехсубматричной и b = 30 мкм для двухсубматричной).

Обозначим график МПФ, расчитанный без учета взаимного влияния, как Г1 (рис. 5). Период пространственной дискретизации равен 15 мкм за счет четырехкратной выборки при b = 60 мкм, трехкратной при b = 45 мкм и двукратной при b = = 30 мкм. Была отмечена следующая закономерность: изменение расстояния между соседними ФЧЭ канала (b) при неизменных значениях коэффициента взаимного влияния ($K_{вн}$) и периода пространственной дискретизации изображения (в данном случае 15 мкм) приводит к изменению формы МПФ (Гх), но площадь под кривой Гх сохраняется, т. е. S2 = S3 = S4 (рис. 5). Таким образом, энергия нормированного пространственного спектра импульсной характеристики сохраняется при изменении расстояния между соседними ФЧЭ канала при неизменном коэффициенте взаимного влияния.



а



б

Рис. 4. МПФ в направлении сканирования для случая четырехсубматричной топологии (рис. 1, а) — а и для случая двухсубматричной топологии (рис. 1, б) — б. Для рис. 4, б справедливо: $K_{вн}$ = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,3 — сверху вниз. fsp — пространственная частота изображения сцены в плоскости МФЧЭ, С — значение контраста изображения на выходе прибора.

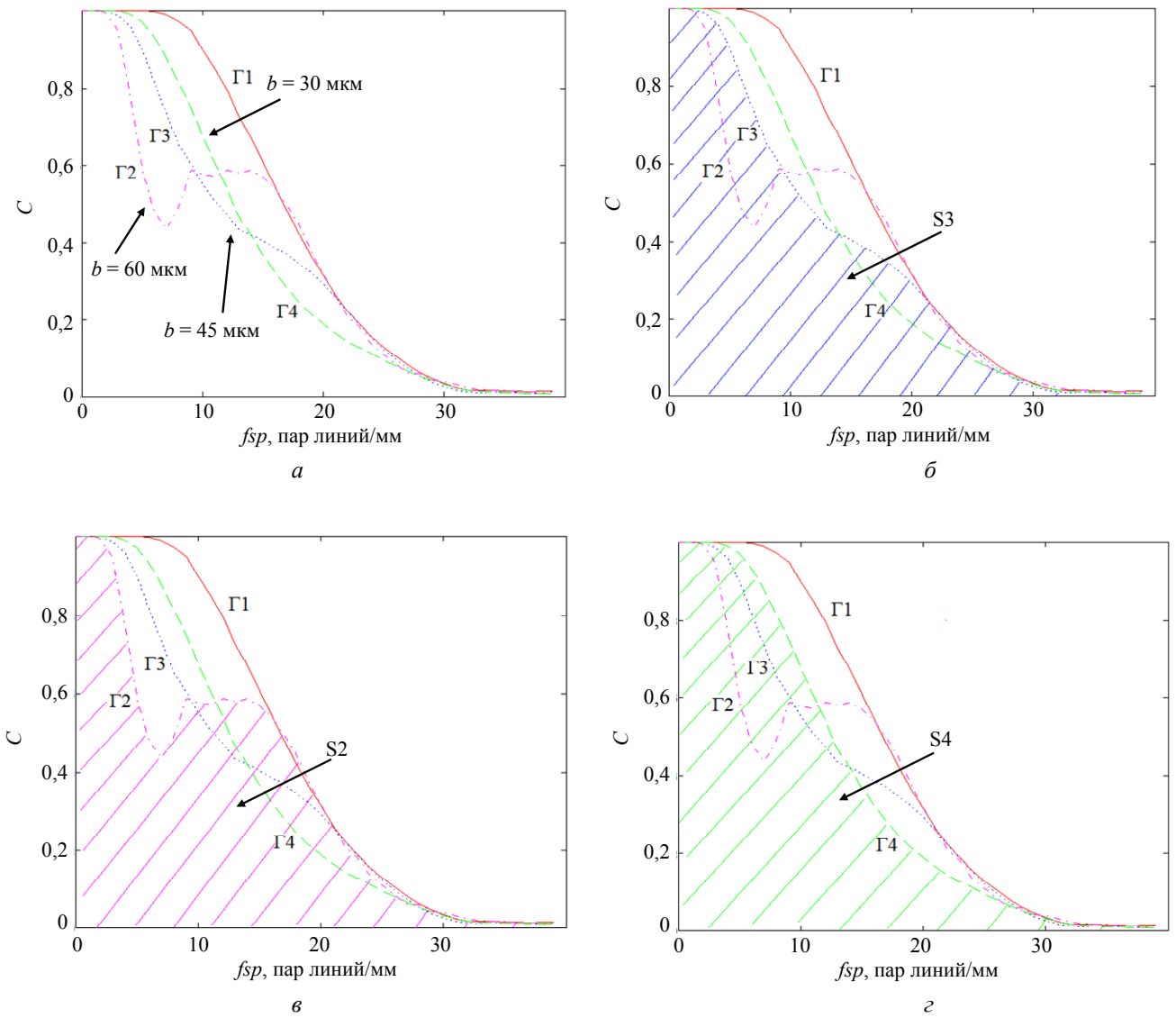


Рис. 5. МПФ в направлении сканирования при $K_{вн}$ = 0 (Г1) и k = 0,15 (Г2, Г3, Г4) и b = 60 мкм — Г2, b = 45 мкм — Г3, b = 30 мкм — Г3. fsp — пространственная частота изображения сцены в плоскости МФЧЭ, C — значение контраста изображения на выходе прибора.

Детального анализа требует вопрос “электрической взаимосвязи в схеме ВЗН-суммирования”. Наиболее классическим способом реализации режима ВЗН внутри БИС является использование аналогового КМОП ВЗН-регистра [15]. Особенностью ВЗН-регистра является неединичный коэффициент переноса заряда $K_{пер}$ между ячейками, что приводит к эффекту памяти ячейки о предыдущих значениях заряда. Таким образом, чем длиннее регистр, т. е. чем большее количество ячеек он содержит, тем большее влияние на выходные характеристики окажет неединичный коэффициент переноса. В случае четырехсубматричной топологии (рис. 2, *а*) длина регистра составляет 3(N–1)+1 или 28 при N = 10. В случае двухсубматричной топологии (рис. 2, *б*) длина регистра равна 2(N–1)+1 или 19 при N = 10.

На рис. 6 показаны МПФ в направлении сканирования для случаев четырехсубматричной (*а*) и двухсубматричной (*б*) топологий. Ввиду того, что реальное значение коэффициента переноса находится в районе 0,99, уменьшение размера ВЗН-регистра с 28 ячеек до 19 несущественно меняет форму МПФ (см. рис. 6).

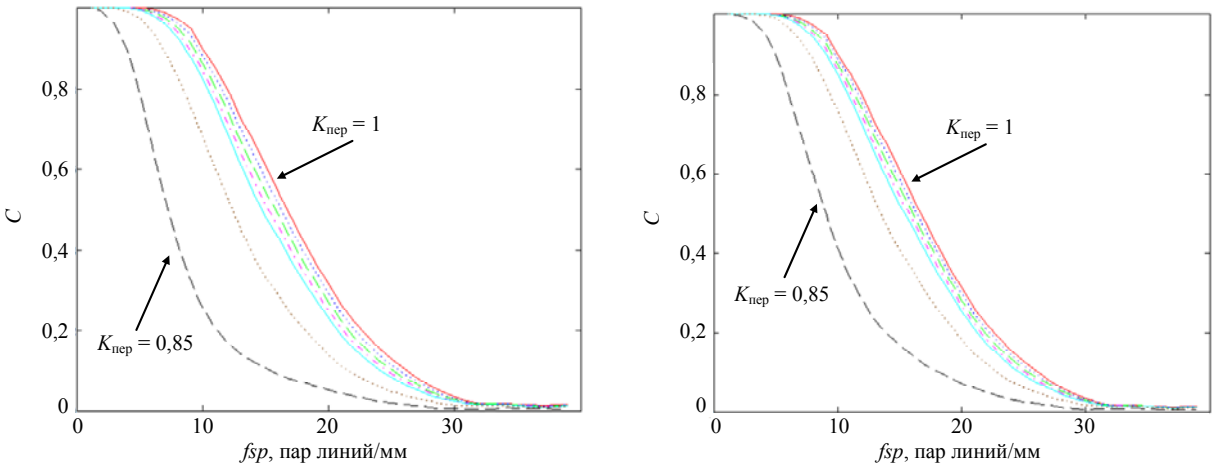


Рис. 6. МПФ в направлении сканирования для случая четырехсубматричной (а) топологии и двухсубматричной (б) при $K_{пер}$ = 1; 0,995; 0,990; 0,985; 0,980; 0,950; 0,850 — сверху вниз. fsp — пространственная частота изображения сцены в плоскости МФЧЭ, C — значение контраста изображения на выходе прибора.

Распознать данный вид связи можно либо по форме выходных сигналов (рис. 7), либо путем проведения специальных экспериментов, предусматривающих равномерную засветку МФЧЭ модулированным импульсным излучением, синхронно с режимом ВЗН [15].

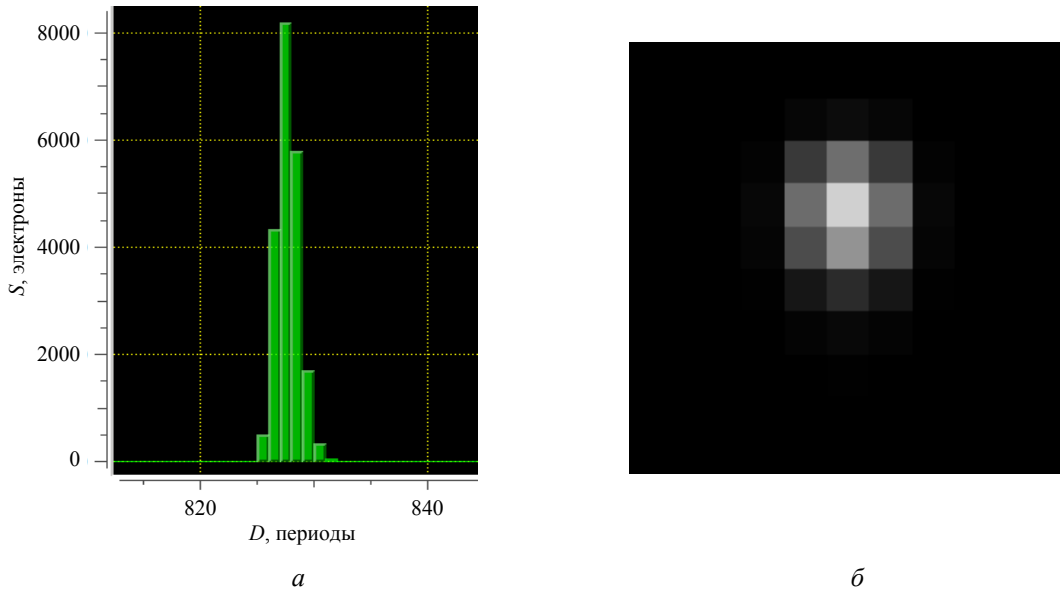


Рис. 7. Выходные характеристики ИК ФПУ при условии, что $K_{пер}$ = 0,985. а — временная зависимость сигналов с канала ИК ФПУ, соответствующего максимуму пятна, б — изображение пятна при наличии "электрической взаимосвязи в схеме ВЗН-суммирования". Отметим несимметричное уширение импульса. D — номер периода пространственной дискретизации изображения сцены, S — сигнал на накопительной емкости в конце цикла накопления.

Введем описание "межканальной фотоэлектрической связи" следующим образом:

$$S_k = K_{меж} \cdot s_{k-1} + K_{меж} \cdot s_{k+1} + s_k \,, \qquad (3)$$

где s_k — сигнал (в электронах) на выходе k-ого канала, рассчитанный без учета взаимного влияния, $K_{меж}$ — коэффициент влияния сигналов ближайших каналов, S_k — сигнал k-го канала с учетом взаимного влияния. Следует отметить, что вид выходных изображений ИК ФПУ при наличии "межканальной фотоэлектрической связи" будет определяться структурой топологического перекрытия. На рис. 8 показаны МПФ в направлении, перпендикулярном сканированию в случае четырехсубматричной (*а*) и двухсубматричной топологии (*б*). Для "межканальной фотоэлектрической связи" справедливо то же правило, что и для "внутриканальной фотоэлектрической связи": интегральная

характеристика нормированной МПФ сохраняется при неизменных величинах коэффициентов $K_{меж}$ или $K_{вн}$. В реальных условиях не представляется возможным варьировать геометрические параметры топологии МФЧЭ, оставив неизменными значения коэффициентов взаимосвязи, так что данный вывод представляет скорее теоретический, нежели прикладной интерес.

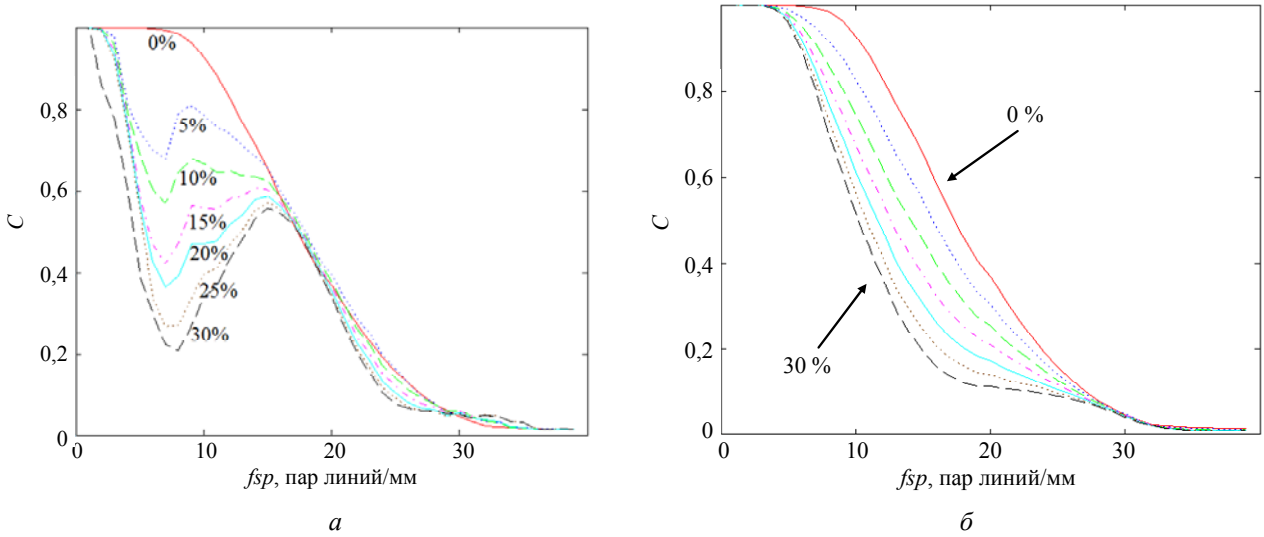
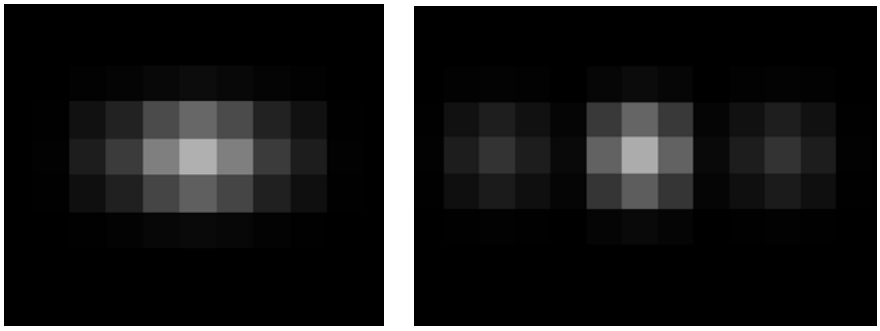


Рис. 8. МПФ в направлении, перпендикулярном сканированию, для случаев четырехсубматричной (а) и двухсубматричной (б) топологий. Для рис. 8, б справедливо: l = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3 — сверху вниз. fsp — пространственная частота изображения сцены в плоскости МФЧЭ, C — значение контраста изображения на выходе прибора.

На рис. 9 представлены выходные изображения точечной цели размера 30 мкм по уровню 80 % функции концентрации энергии для двух рассматриваемых вариантов топологии МФЧЭ. В процессе сканирования пятно излучения проходит через центры всех ФЧЭ одного из каналов. Значение коэффициента “межканальной фотоэлектрической связи” принято равным 0,3 для наглядной демонстрации процессов взаимного влияния. Отметим, что в случае двухсубматричной топологии данный вид взаимосвязи расширяет изображение точечного источника, а в случае четырехсубматричной — создает два ложных сигнала.



а б

Рис. 9. Изображения точечного источника при $K_{меж}$ = 0,3 для случаев двухсубматричной (а) и четырехсубматричной (б) топологий.

В условиях текущей задачи при рассмотрении четырехсубматричной топологии максимальная амплитуда ложного сигнала быть вычислена по следующей формуле:

$$F = l \cdot SNR, \qquad (4)$$

где F — амплитуда ложного сигнала (в единицах СКО шума), l — коэффициент влияния сигналов ближайших каналов. Пусть отношение сигнал/шум на выходе ФПУ, рассчитанное по основному сигналу, равно 100. На рис. 10 показан график зависимости амплитуды ложного сигнала от величины коэффициента взаимного влияния. Соответственно, значение порога решающего устройства не может быть ниже указанной на графике величины помехи при известном коэффициенте “межканальной фотоэлектрической связи”.

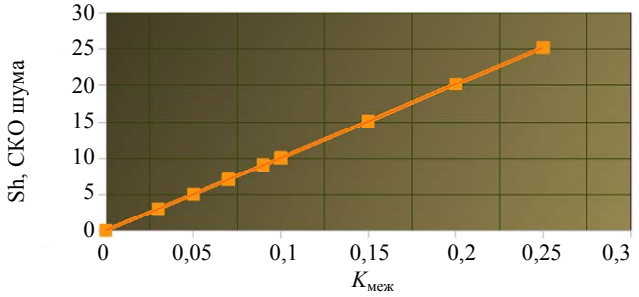


Рис. 10. Зависимость максимальной амплитуды ложного сигнала (S_h) от величины коэффициента взаимного влияния ($K_{меж}$).

Взаимосвязь сигналов внутри блока сопряжения

Одной из особенностей крупноформатного многорядного ИК ФПУ является необходимость минимизировать количество проводников, связывающих фотоприемные модули в охлаждаемой зоне с блоком сопряжения. Таким образом, возникает необходимость коммутировать сигналы с 4 субматриц на 1—2 информационных выхода, что накладывает дополнительные требования на параметры электронного тракта предварительного усиления, недостаточное быстродействие которого может привести к возникновению дополнительного вида взаимосвязи, которую будем называть “взаимосвязью внутри блока сопряжения”. Существует множество вариантов коммутации сигналов с МФЧЭ, потенциально приводящих к наличию указанного вида взаимосвязи. В данной работе будет рассмотрен только один способ коммутации, остальные могут быть проанализированы по аналогичной схеме, а результаты и выводы будут близки полученным в статье.

Пусть БИС считывания попарно коммутирует сигналы с четырех субматриц на два выхода. Тогда можно ввести следующее описание:

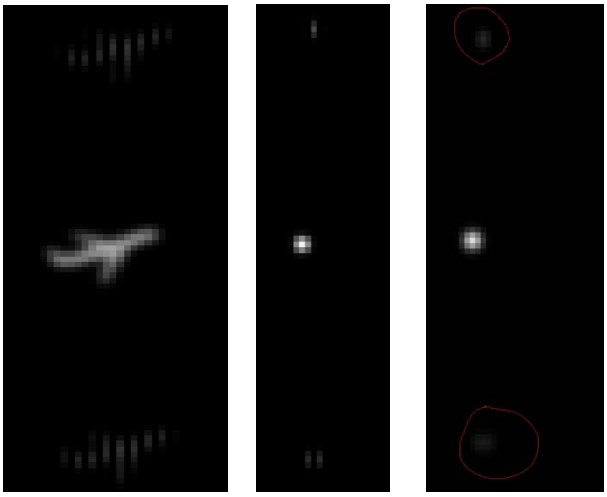
$$S_{m_1} = K_{БС} \cdot s_{(m-1)_2} + s_{m_1}, \qquad (5.1)$$

$$S_{m_2} = K_{БС} \cdot s_{m_1} + s_{m_2}, \qquad (5.2)$$

$$S_{m_3} = K_{БС} \cdot s_{(m-1)_4} + s_{m_3}, \qquad (5.3)$$

$$S_{m_4} = K_{БС} \cdot s_{m_3} + s_{m_4}, \qquad (5.4)$$

где $K_{БС}$ — величина коэффициента взаимосвязи, s_{m_i} — сигналы с m-го канала i-й субматрицы без учета взаимного влияния, S_{m_i} — сигналы с m-го канала i-й субматрицы с учетом “взаимосвязи внутри блока сопряжения”. Нумерация субматриц осуществляется сверху вниз (см. рис. 2). Смоделированные изображения на выходе ИК ФПУ при наличии в системе данного вида взаимосвязи представлены на рис. 11. Показано влияние взаимосвязи на выходное изображение протяженного объекта (рис. 11, *а*). Как и “межканальная фотоэлектрическая связь”, “взаимосвязь внутри блока сопряжения” приводит к появлению ложных сигналов, расположенных, однако, на существенном расстоянии от основного объекта, что обусловлено особенностью процедуры “сшивки” сигналов с различных субматриц МФЧЭ многорядного ИК ФПУ, работающего в режиме сканирования.



а *б* *в*

Рис. 11. Выходные изображения ИК ФПУ при наличии “взаимосвязи внутри блока сопряжения”: а — выходное изображение протяженного объекта, б — изображение точечной цели при наличии взаимосвязи, в — то же изображение после оптимальной пространственной фильтрации.

На рис. 11, *б* показано изображение точечной цели при наличии взаимосвязи, а на рис. 11, *в* — то же изображение после оптимальной пространственной фильтрации [16]. Фильтр настроен на регистрацию точечной цели, его размер равен 30×30 периодов дискретизации изображения. Присвоим ложному сигналу, находящемуся наверху, № 1, а внизу — № 2 (рис. 11, *б*, *в*). Относительной амплитудой ложного сигнала назовем отношение амплитуд ложного и основного сигналов. Построим графики зависимостей относительных амплитуд ложных сигналов в зависимости от радиуса пятна основного сигнала (по уровню 80 % функции концентрации энергии) и от величины фотоэлектрической связи (рис. 12, *а*, *б*). В каждом из экспериментов фильтрация была оптимальной по отношению к основному сигналу. Следует отметить, что процесс фильтрации эффективнее по отношению к одиночным ложным выбросам, в результате чего относительная амплитуда ложных сигналов № 1 понизилась после фильтрации почти на 30 %. Однако на ложные сигналы № 2 фильтра-

ция практически не влияет. Таким образом, рассматриваемый вид фотоэлектрической связи представляет немалую опасность для качественного решения задач обнаружения, т. к. существенно усложняет работу фильтров, “разрывая” непрерывный фон и порождая ложные цели, близкие по своей структуре к точечным объектам.

На рис. 13, *а*, *б* показаны модуляционные передаточные функции ИК ФПУ при наличии “взаимосвязи внутри блока сопряжения”. Отличительной особенностью данного вида взаимосвязи является ее влияние на пространственное разрешение как в направлении сканирования, так и в направлении, перпендикулярном сканированию.

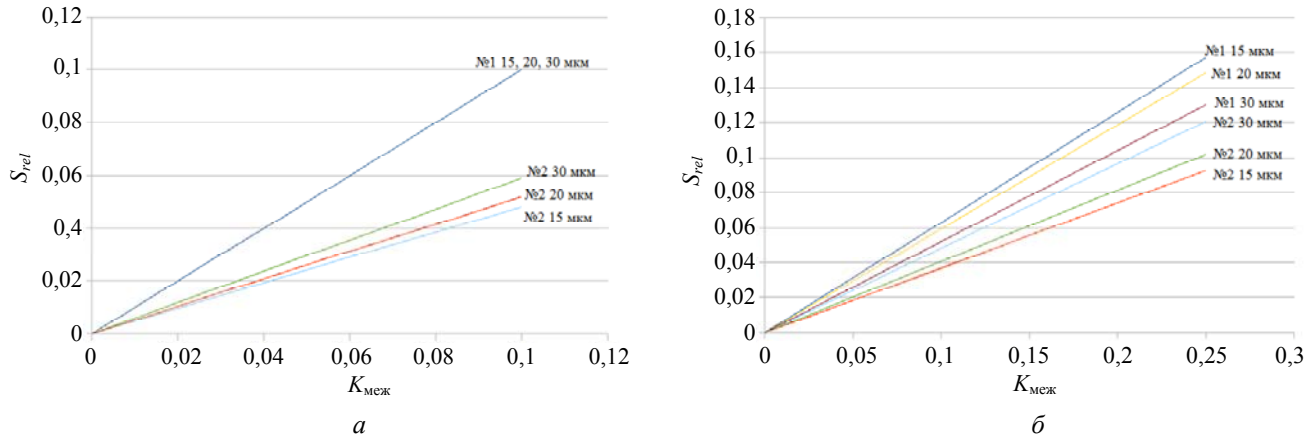


Рис. 12. Зависимость относительной амплитуды ложного сигнала (S_{rel}) от коэффициента фотоэлектрической связи ($K_{меж}$) после процедуры пространственной оптимальной фильтрацией (б) и без нее (а).

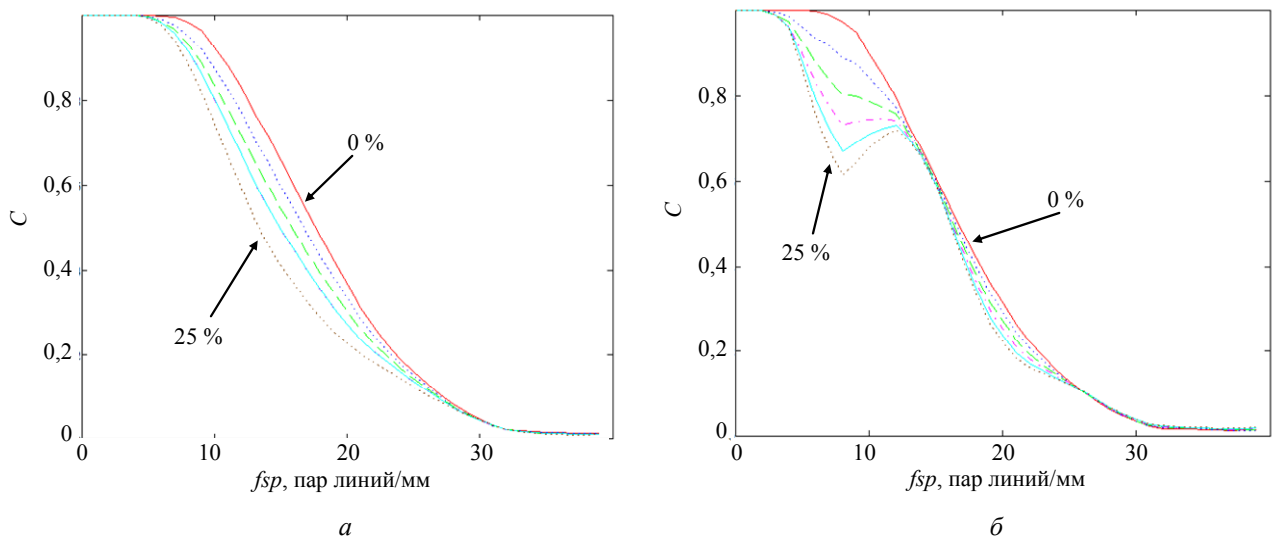


Рис. 13. МПФ в направлении сканирования (а) и в направлении, перпендикулярном сканированию при наличии “взаимосвязи внутри блока сопряжения”. Для рисунков справедливо: $K_{БС}$ = 0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25 — сверху вниз. fsp — пространственная частота изображения сцены в плоскости МФЧЭ, C — значение контраста изображения на выходе прибора.

Заключение

Предложена классификация видов взаимосвязи многорядного ИК ФПУ, включающая в себя два вида фотоэлектрической связи: “внутриканальную фотоэлектрическую связь” и “межканальную фотоэлектрическую связь”, а также два вида электрической связи: “взаимосвязь в схеме ВЗН-суммирования” и “взаимосвязь внутри блока сопряжения”.

Показано, что каждый из представленных видов связи может быть обнаружен экспериментально в результате сравнения формы выходных характеристик с результатами моделирования.

Можно сделать вывод, что “взаимосвязь в схеме ВЗН-суммирования” практически не влияет на форму модуляционной передаточной функции при значениях коэффициентов переноса заряда, близких 0,99, обеспечиваемых современными оте-

чественными технологическими процессами. Как показали результаты исследований, опубликованные в работе [15], амплитуда сигнала от малоразмерного объекта при этом понижается менее, чем на 10 % для четырехсубматричной топологии. Таким образом, не имеет смысла уменьшать расстояние между соседними ФЧЭ канала, увеличивая при этом риск повышения “внутриканальной фотоэлектрической связи”.

Показано, что взаимосвязь внутри блока сопряжения представляет немалую опасность для качественного решения задач обнаружения, т. к. существенно усложняет работу фильтров, “разрывая” непрерывный фон и порождая ложные цели, близкие по своей структуре к точечным объектам. Улучшение отношения сигнал/помеха в результате оптимальной фильтрации при диаметре точечной цели, равном 30 мкм, и значении коэффициента взаимного влияния, равном 10 %, составляет ≈30 %, так что использование фильтрации все равно оправдано по отношению к помехам данного вида. Большая часть других видов связи, вызванных близким расположением электрических шин, утечками емкостей и т. д. с точки зрения математического описания могут быть сведены к “взаимосвязи внутри блока сопряжения” путем задания соответствующего алгоритма коммутации сигналов, так что полученные результаты обладают достаточной общностью.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. *Козлов К. В., Соляков В. Н., Кузнецов П. А., Полесский А. В., Хамидуллин К. А., Семенченко Н. А., Бедарева Е. А.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 4. С. 55.

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

3. *Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А.* Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. — М.: Физматкнига, 2005. — 384 с.

4. *Александров В. В., Бычковский Я. С., Дражников Б. Н., Козлов К. В., Кондюшин И. С., Матвеев А. В.* // Прикладная физика. 2014. № 6. С. 81.

5. *Козлов К. В., Бычковский Я. С., Кондюшин И. С., Матвеев А. В., Соляков В. Н., Пожидаев Д. А., Балиев Д. Л.* // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 170.

6. *Филачев А. М., Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Дражников Б. Н., Хромов С. С., Кузнецов П. А.* / 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.

7. *Бочков В. Д., Дражников Б. Н., Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н.* // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 58.

8. *Кузнецов П. А., Мощев И. С., Хромов С. С.* // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.

9. *Кузнецов П. А., Мощев И. С.* // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 1. С. 71.

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

11. *Демидов В. И., Колесова А. А., Полесский А. В., Смирнова Е. А., Хамидуллин К. А.* // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 625.

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

13. *Госсорг Ж.* Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. Пер. с франц. — М.: Мир, 1988.

14. *Васильев В. Н., Дмитриев И. Ю., Дражников Б. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А., Соляков В. Н., Пономаренко В. П.* // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 5. С. 486.

15. *Козлов К. В., Кузнецов П. А.* // Прикладная физика. 2015. № 3. С. 61.

16. *Дражников Б. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А., Соляков В. Н.* // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 6. С. 566.

The investigation of TDI FPA signals correlation

K. V. Kozlov[1,2], P. A. Kyznetsov[1], V. N. Solyakov[1,2], K. A. Chamidullin[1], and N. S. Antypov[3]

[1] Orion R&P Association, Inc.
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

[2] Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

[3] Moscow State Technological University "Stankin"
3a Vadkovsky al., Moscow, 127055, Russia

Received February 8, 2016

A complex theoretical research of the TDI FPA signals correlation has been done. The classification of correlation types is showed. According to this classification, there are two types of photoelectrical classification: "in channel correlation" and "between channels correlation" and two types of electrical classification: "TDI correlation" and "preamplifier correlation". The TDI output characteristics with correlation have been obtained. The calculations are implemented for two types of photosensitive elements topologies. The results are acceptable for a wide range of TDI FPA.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

Keywords: TDI, FPA, photodetector, multiplexer.

REFERENCES

1. K. V. Kozlov, V. N. Solyakov, P. A. Kuznetsov, A. V. Polesskii, K. A. Khamidullin, N. A. Semenchenko, and E. A. Bedareva, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **2,** 55 (2014).

2. M. A. Trishenkov, *Photoreceiver Devices and CCD.* (Radio Svyaz', 1992) [in Russian].

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

4. V. V. Aleksandov, Ya. S. Bychkovskii, B. N. Drazhnikov, K. V. Kozlov, I. S. Kondyushin, and A. V. Matveev, Prikladnaya Fizika, No. 6, 81 (2014).

5. K. V. Kozlov, Ya. S. Bychkovskii, I. S. Kondyushin, A. V. Matveev, V. N. Solyakov, D. A. Pozhidaev, and D. L. Baliev, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **2,** 170 (2014).

6. A. M. Filachev, I. D. Burlakov, K. O. Boltar, B. N. Drazhnikov, S. S. Khromov, and P. A. Kuznetsov, in *Proc. XXII Intern. Conf. Photoelectronics, May 22–25, 2012* (NPO Orion, Moscow) P. 22—24.

7. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kuznetsov, K. V. Kozlov, and V. N. Solyakov, Prikladnaya Fizika, No. 1, 58 (2014).

8. P. A. Kuznetsov, I. S. Moshchev, S. S. Khromov, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1,** 606 (2013).

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

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

11. V. I. Demidov, A. A. Kolesova, A. V. Polesskii, E. A. Smirnova, and K. A. Khamidullin, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1,** 625 (2013).

12. J. Lloid, *Systems of Thermovision* (Mir, Moscow, 1978) [in Russian].

13. J. Gossorg, *Infrared Thermograph* (Mir, Moscow, 1988) [in Russian].

14. V. N. Vasil'ev, I. Yu. Dmitriev, B. N. Drazhnikov, K. V. Kozlov, P. A. Kuznetsov, V. N. Solyakov, and V. P. Ponomarenko, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **3,** 486 (2015).

15. K. V. Kozlov and P. A. Kuznetsov, Prikladnaya Fizika, No. 3, 61 (2015).

16. B. N. Drazhnikov, K. V. Kozlov, P. A. Kuznetsov, and V. N. Solyakov, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **3,** 566 (2015).

* * *