

Анализ и классификация топологий матриц фоточувствительных элементов многорядных фотоприемных устройств

К. В. Козлов, В. Н. Соляков, В. А. Стрельцов, О. Д. Исаева, В. В. Савцов, Д. С. Жирихов

В данной работе представлена классификация и проведен сравнительный анализ топологий матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ) многорядных матричных фотоприемных устройств (ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) для инфракрасных (ИК) односпектральных оптико-электронных систем (ОЭС) с линейным однокоординатным сканированием. Предложен новый тип топологий МФЧЭ с «вложенными субматрицами», позволяющий снизить требования к юстировке ОЭС с одновременным обеспечением высоких пороговых характеристик. Рассчитаны требования к точности юстировки ОЭС со сканированием в зависимости от типа и параметров топологии МФЧЭ. Предложены топология МФЧЭ и новый способ комбинированного ВЗН-суммирования, позволяющие улучшить пороговые характеристики ОЭС на основе аналоговых КМОП-регистров ВЗН при сохранении суммарной емкости схемы ВЗН-суммирования. Предложен метод расчета требований к устройству, сканирующему ОЭС при использовании ФПУ с многосубматричной топологией МФЧЭ. Рассчитаны амплитуды сигналов на выходе ОЭС после процедуры согласованного суммирования в зависимости от степени рас- синхронизации процессов сканирования и ВЗН-суммирования.

Ключевые слова: малоразмерный объект, ВЗН, топология МФЧЭ, ФПУ, БИС считывания.

Введение

Регистрация малоразмерных объектов (МО) в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра является одной из ключевых задач, решаемых современными оптико-электронными системами (ОЭС). В составе аппаратуры регистрации МО широко используются многорядные фотоприемные устройства (ФПУ) с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) [1–4], которые позволяют достичь высокой равномерности пеленгационной характеристики, повысить отношение сигнал/шум на выходе прибора, снизить требования к дефектности фоточув-

ствительного материала. Кроме того, каскадирование отдельных фотоприемных модулей (ФМ) на общем основании внутри ФПУ сканирующего типа позволяет достичь расширенных форматов ИК-изображений, превышающих 10000×10000 элементов разложения.

Основные параметры ОЭС во многом определяются структурой топологии матрицы фоточувствительных элементов (МФЧЭ) ФПУ. Так, увеличение количества каскадов ВЗН, согласование размеров ФЧЭ и пятна излучения от МО в плоскости МФЧЭ позволяют улучшить отношение сигнал/шум на выходе изделия [5]; применение нескольких субматриц ФЧЭ, смещенных друг относительно друга в направлении, ортогональном сканированию, повышает частоту пространственной дискретизации изображения сцены и, следовательно, улучшает пеленгационную характеристику и пространственное разрешение ФПУ; количество, размеры и расположение субматриц ФЧЭ определяют требования к точности юстировки оптико-механической системы и т. д.

Проблема выбора оптимальной топологии МФЧЭ ФПУ сканирующего типа рассмотрена ранее в ряде работ. Например, в [6] приведены результаты сравнения двух топологий сканирующей ПЗС-матрицы по пространственному разрешению. В работах [5, 7] исследуется отношение сигнал/шум в максимуме пеленгационной характери-

Козлов Кирилл Владимирович^{1,2}, инженер 1 кат., аспирант.
Соляков Владимир Николаевич¹, главный специалист.
Стрельцов Вадим Александрович^{1,2}, инженер, студент.
Исаева Ольга Дмитриевна¹, инженер.

Савцов Владимир Валериевич¹, инженер.
Жирихов Дмитрий Сергеевич¹, инженер.

¹ АО «НПО «Орион».

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

E-mail: orion@orion-ig.ru

² Московский физико-технический институт (государственный университет).

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,

Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 2 октября 2017 г.

© Козлов К. В., Соляков В. Н., Стрельцов В. А., Исаева О. Д., Савцов В. В., Жирихов Д. С. 2017

стики ФПУ сканирующего типа, работающего в ВЛР-режиме. В статье [8] представлены аналитические выражения и графические зависимости, позволяющие оценить отношение сигнал/шум и пространственное разрешение ФПУ в зависимости от параметров входного излучения, пространственного распределения чувствительности ФЧЭ, периодов пространственной дискретизации изображения сцены, количества каскадов ВЗН, шума большой интегральной схемы (БИС) считывания, размеров согласованного фильтра сигналов ФПУ.

Данная работа, являясь фактически продолжением работы [8], содержит анализ топологий МФЧЭ с учетом особенностей построения ОЭС с рассматриваемыми топологиями. В работе предложена классификация топологий МФЧЭ многорядных ФПУ для ОЭС с линейным оптико-механическим сканированием. Методами математического моделирования [9] получены характеристики и проведен сравнительный анализ ФПУ с топологиями МФЧЭ различных типов (в рамках классификации) по следующим параметрам: от-

ношение сигнал/шум, пространственное разрешение, суммарная емкость, необходимая для реализации схемы ВЗН-суммирования, требования к точности синхронизации процессов сканирования и ВЗН-суммирования, требования к точности совмещения (по углу) направления сканирования и осей каналов ВЗН.

Результаты, полученные в данной работе, могут быть в дальнейшем использованы при разработке фотоприемных устройств для инфракрасной оптико-электронной аппаратуры сканирующего типа, осуществляющей регистрацию МО в одном спектральном диапазоне.

Классификация топологий МФЧЭ ИК ФПУ с ВЗН

Для удобства описания топологии МФЧЭ многорядного ФПУ введем ряд параметров, отраженных в представленной таблице. Будем далее считать, что топология содержит G идентичных субматриц формата $(Q/G) \times N_{\text{взн}}$ [ФЧЭ] каждая.

Таблица

Параметры, характеризующие топологию МФЧЭ

Обозначение параметра, единица измерения	Описание параметра
a, b , мкм	Размеры ФЧЭ
$N_{\text{взн}}$, шт.	Количество каскадов ВЗН в составе одного канала
$n_{\text{взн}}$, шт.	Количество секций ВЗН-суммирования внутри БИС
$N_{\text{выб}}$, шт.	Количество выборок за время перемещения изображения МО между соседними ФЧЭ канала
Q , шт.	Количество каналов ВЗН в составе МФЧЭ
Δx , мкм	Расстояние между соседними ВЗН-каналами одной субматрицы
Δy , мкм	Расстояние между соседними ФЧЭ канала ВЗН
G , шт.	Количество субматриц в составе МФЧЭ
d_2, \dots, d_G , мкм	Смещения субматриц в направлении сканирования
$\Delta_2, \dots, \Delta_G$, мкм	Смещения субматриц в направлении, ортогональном сканированию

Поясним назначение параметра $n_{\text{взн}}$. Большинство ФПУ с режимом ВЗН осуществляет суммирование сигналов, поступающих со всех ФЧЭ канала, либо внутри БИС (в «холодной зоне»), либо вне БИС в цифровом виде. В данной работе предложен промежуточный вариант: частичное ВЗН-суммирование сигналов с $n_{\text{взн}}$ ФЧЭ канала в аналоговом виде внутри БИС и дальнейшая обработка $N_{\text{взн}}/n_{\text{взн}}$ значений в цифровом виде. Данный подход позволяет обеспечить оптимальное соотношение между частотой выводимой с БИС информации и площадью кристалла БИС, необходимой для реализации схемы ВЗН-суммирования.

В зависимости от взаимного расположения (и количества) субматриц МФЧЭ выделим три ти-

па топологий многорядных ФПУ, регистрирующих излучение в режиме линейного оптико-механического сканирования, в одном спектральном диапазоне.

Топологиями *первого типа* (см. рис. 1) будем называть однородные топологии МФЧЭ, состоящие из одной субматрицы, для которой координаты центра ФЧЭ с номером (l, r) в неподвижной относительно МФЧЭ системе координат (СК) xOy определяются следующими двумя выражениями для $G = 1$:

$$x_l = l \times \Delta x, \quad (1)$$

$$y_r = r \times \Delta y. \quad (2)$$

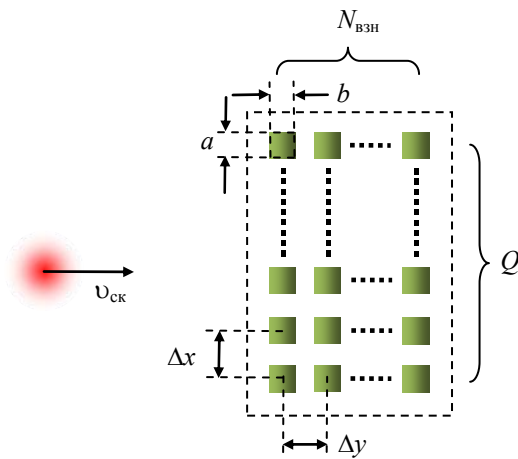


Рис. 1. Топология МФЧЭ первого типа.

Данный тип топологии реализован, например, в [10]. Для однородной топологии характерны существенные провалы пеленгационной характеристики при регистрации МО, низкая частота пространственной дискретизации в направлении, ортогональном сканированию, низкие требования к точности юстировки оптико-механического тракта.

Топологией *второго типа* назовем многосубматричную топологию МФЧЭ ($G > 1$) с пространственно-разнесенными субматрицами (см. рис. 2). Данный тип топологии демонстрирует классический подход, используемый в большинстве современных сканирующих ФПУ форматов 4×288 , 6×576 , 10×1024 , в которых суммирование сигналов осуществляется по 4-м, 6-ти, 10-ти ФЧЭ соответственно. Более высокая частота пространственной дискретизации, чем в однородной топологии, обеспечивает минимальную неравномерность пеленгационной характеристики, а также более высокое пространственное разрешение.

Изображение на выходе ФПУ при $G > 1$ формируется путем объединения («сшивки») изображений с различных субматриц с учетом расстояний между ними. Если в ФПУ с топологией второго типа не предусмотрена процедура корректировки управляющих циклограмм БИС в зависимости от скорости сканирования $v_{\text{СК}}$, то для успешной «сшивки» необходима высокая стабильность $v_{\text{СК}}$ ввиду расстояния между соседними субматрицами, превышающего длину канала ВЗН.

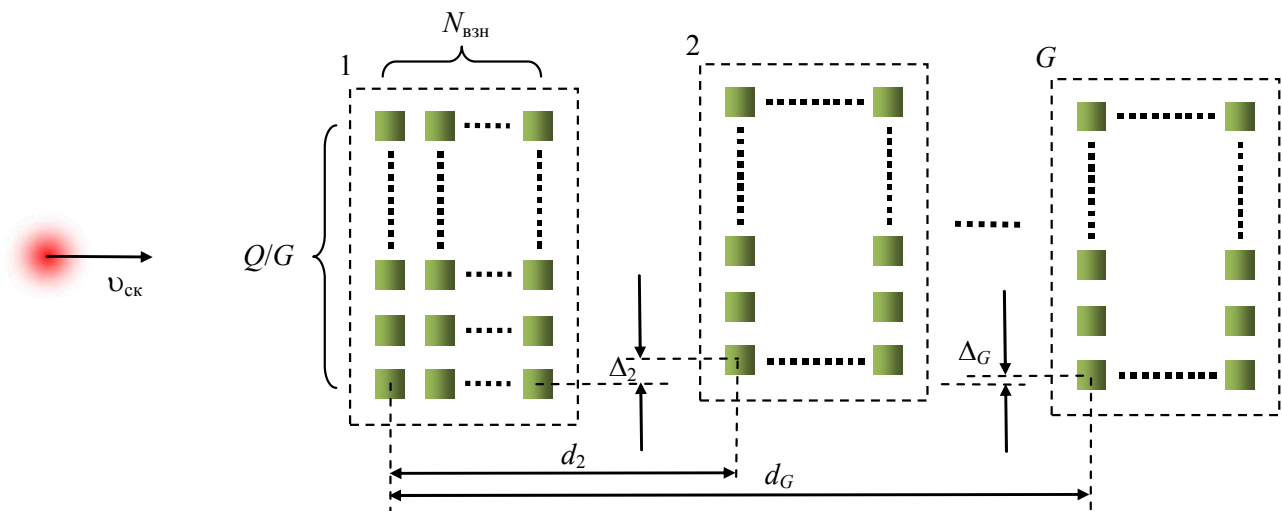


Рис. 2. Топология МФЧЭ второго типа.

Если увеличить расстояния между отдельными ФЧЭ каналов ВЗН и совместить геометрически субматрицы МФЧЭ с малыми шагами Δ_i , d_i (см. рис. 3), то получим новый тип топологий МФЧЭ, которые назовем топологиями *третьего типа*. Анализ литературных источников показал отсутствие в настоящее время многорядных инфракрасных ФПУ с топологией третьего типа. Однако

предварительное моделирование показало, что ФПУ с топологией третьего типа могут обеспечить высокую частоту пространственной дискретизации (аналогично топологиям второго типа), а минимальное расстояние между субматрицами практически устраняет влияние процедуры «сшивки» изображений с различных субматриц на требования к стабильности $v_{\text{СК}}$.

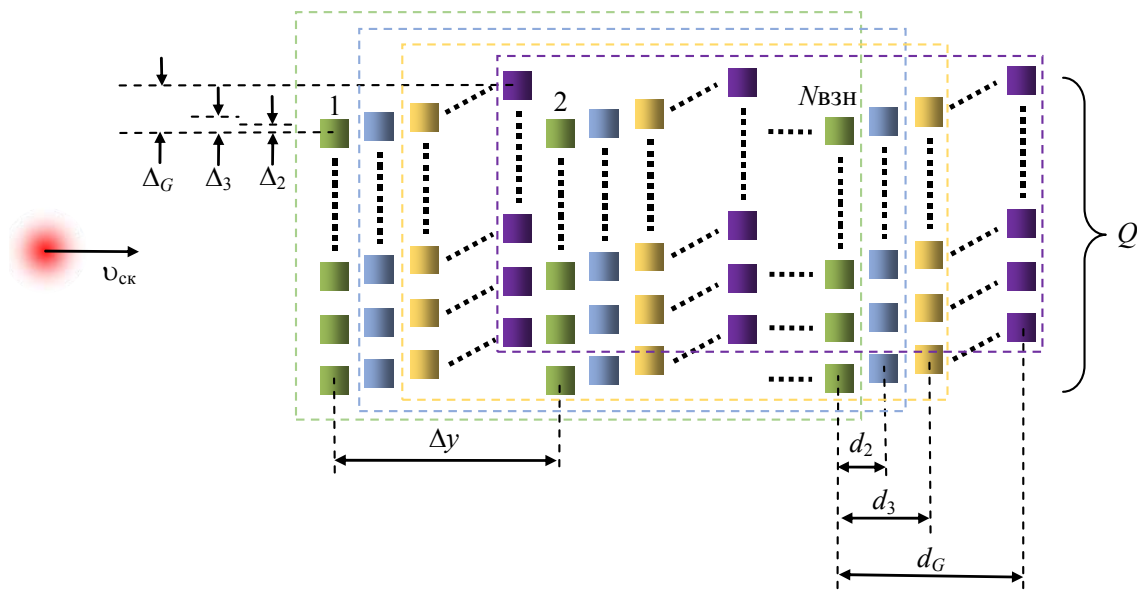


Рис. 3. Топология МФЧЭ третьего типа.

Перейдем к более детальному рассмотрению топологий каждого из представленных типов.

Сравнительный анализ топологий

Проведем анализ ФПУ с топологией МФЧЭ первого типа. Некоторые результаты данного анализа могут быть использованы и при рассмотрении более сложных топологий, для которых топологии первого типа являются базовыми структурными элементами.

При последующем анализе будем считать, что источником кадровых синхроимпульсов ИК ФПУ является система сканирования, которая управляет моментом сброса цифровых счетчиков и емкостей БИС. Строчную синхронизацию ФПУ осуществляет внешний блок управления, независимый от системы сканирования.

Функцию рассеяния точки (ФРТ) оптической системы (ОС), которая включает объектив, входные окна и светофильтры ФПУ, будем считать распределенной по Гауссу:

$$PSF_{OC}(x, y) = \frac{1}{2\pi R^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2R^2}\right), \quad (3)$$

где x, y – координаты точки в фокальной плоскости ОС, R – параметр распределения. В дальнейшем радиус пятна r по уровню 0,8 функции концентрации энергии будем считать равным 15 мкм.

Как было отмечено ранее, структура топологии МФЧЭ определяет требования к стабильности скорости сканирования $v_{ск}$ в плоскости МФЧЭ. Оценим влияние относительного отклонения скорости сканирования μ от номинальной $v_{ск0}$ ($v_{ск0} = 58,8$ мм/с) на характеристики ФПУ, т. е. примем во внимание выражение:

$$\mu = \frac{v_{ск} - v_{ск0}}{v_{ск0}} \times 100 \%. \quad (4)$$

Проведем анализ зависимости относительной амплитуды сигналов от МО (u_{amp}) на выходе ФПУ с топологией МФЧЭ первого типа ($G = 1, b = 2 \times 1,7 \times R$) от количества ФЧЭ в составе канала ВЗН (см. рис. 4). На рис. 4, а представлены характеристики, соответствующие начальному смещению центра пятна излучения относительно первого ФЧЭ канала $y_0 = -12037,5$ мкм, а на рис. 4, б – $y_0 = -2257,5$ мкм при $N_{выб} = 3, y_{выб} = 15$ мкм. Под $y_{выб}$ будем понимать номинальный период пространственной дискретизации изображения сцены в направлении сканирования при $v_{ск} = v_{ск0}$.

Если выполняется условие $|y_0| \gg N_{выб} N_{взн} \times y_{выб}$, то период модуляции амплитуды сигналов (см. рис. 4) можно оценить из соотношения

$$T_{нак} g = |y_0| \times \left(\frac{1}{v_{ск}} - \frac{1}{v_{ск0}} \right) = \frac{|y_0| \times T_{нак}}{y_{выб}} \times \frac{-\mu_g / 100}{1 + \mu_g / 100}, \quad (5)$$

где g – целое число, $g \neq 0$; μ_g – значения параметра рассинхронизации, приводящие к относительному смещению пятна излучения от МО на расстояние, равное $y_{выб}$, $T_{нак}$ – время накопления фототока. Из (5) получим выражение для оценки периода модуляции:

$$\mu_g = \frac{-g \times y_{выб}}{|y_0| + g \times y_{выб}} \times 100 \% \Big|_{g=-1} \approx \frac{y_{выб}}{|y_0|} \times 100 \%. \quad (6)$$

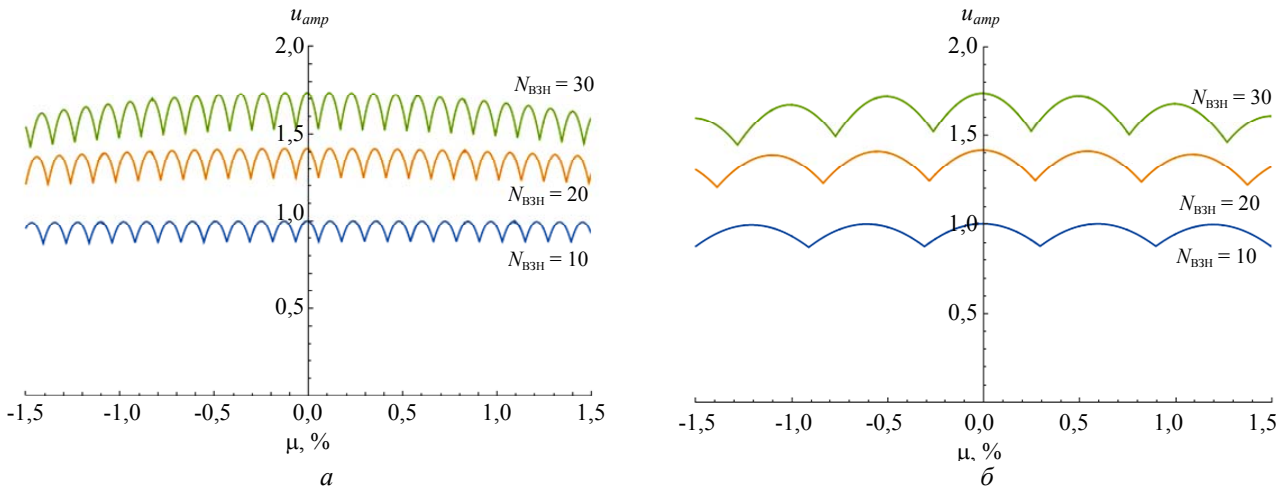


Рис. 4. Влияние точности синхронизации процессов сканирования и ВЗН-суммирования на амплитуду выходного сигнала u_{amp} от МО в случае ОЭС с топологией первого типа.

Для характеристик, представленных на рис. 4, а, данная оценка позволяет получить значение периода модуляции, равное 0,125 %, а для характеристик, приведенных на рис. 4, б – 0,67 %.

Таким образом, для ФПУ с топологией первого типа с количеством каскадов ВЗН $N_{ВЗН} \leq 30$ справедливо следующее утверждение: амплитуда сигналов от МО в максимуме пеленгационной характеристики снижается менее чем на 10 % при отклонении скорости сканирования от номинальной на 1,5 %. Данное утверждение показывает устойчивость систем регистрации МО на основе односубматричных топологий МФЧЭ к отклоне-

нию скорости сканирования от номинального значения. То же самое относится и к пространственному разрешению таких систем [10].

Теперь рассмотрим ФПУ с топологией первого типа, в котором ВЗН-суммирование реализовано на основе аналоговых КМОП ВЗН-регистров. Отношение сигнал/шум и пространственное разрешение на выходе такой системы зависят от коэффициента неэффективности переноса заряда ϵ [3]. Пусть с каждой входной ячейки БИС на входы ВЗН-регистра поступает заряд Q_0 . Тогда при малых значениях ϵ сигнал на выходе ВЗН-регистра равен

$$Q_{\text{вых}} = Q_0 (1 - \epsilon)^{(N_{\text{ВЗН}} - 1)N_{\text{выб}} + 1} + Q_0 (1 - \epsilon)^{(N_{\text{ВЗН}} - 2)N_{\text{выб}} + 1} + \dots + Q_0 = Q_0 \left[\frac{(1 - \epsilon)^{N_{\text{выб}}(N_{\text{ВЗН}} - 1) + 1} + \epsilon - 1}{1 - (1 - \epsilon)^{-N_{\text{выб}}}} + 1 \right]. \quad (7)$$

Если канал ВЗН состоит из $n_{\text{ВЗН}}$ секций, то с учетом внешнего (по отношению к БИС) ВЗН-суммирования относительное значение выходного сигнала ФПУ можно рассчитать по формуле:

$$u_{\text{вых}}/u_0 = \sum_{i=1}^{n_{\text{ВЗН}}} \frac{(1 - \epsilon)^{N_{\text{выб}}(N_{\text{ВЗН}}/n_{\text{ВЗН}} - 1) + 1} + \epsilon - 1}{1 - (1 - \epsilon)^{-N_{\text{выб}}}} + 1, \quad (8)$$

где $u_{\text{вых}}$ – сигнал с канала ВЗН на выходе ОЭС, u_0 – накопленный сигнал с одного ФЧЭ, приведенный к выходу ОЭС.

На рис. 5 приведены зависимости относительного сигнала на выходе ФПУ (нормированного на $N_{\text{ВЗН}}$) от $N_{\text{ВЗН}}$ при $\epsilon = 0,02$, $N_{\text{выб}} = 3$ и различных размерах секции аналогового суммирования $N_{\text{ВЗН}}/n_{\text{ВЗН}}$. Данные результаты, рассчитанные по оценочной формуле (8), совпали с результатами компьютерного моделирования с погрешностью не более 3 %.

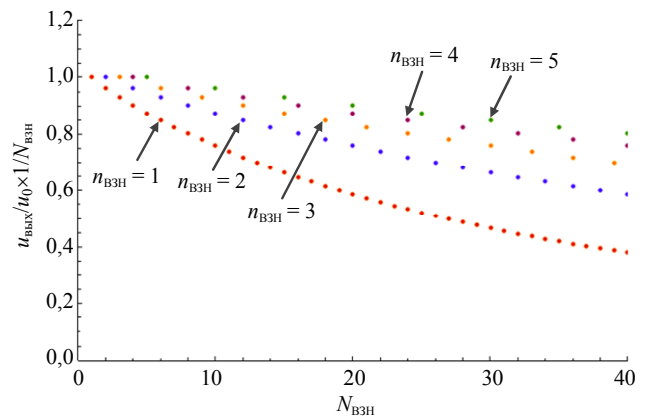


Рис. 5. Зависимости относительной амплитуды выходного сигнала канала ВЗН на основе аналогового КМОП ВЗН-регистра (при $\epsilon = 0,02$ и $N_{\text{выб}} = 3$) от количества каскадов ВЗН.

При возрастании параметра $N_{\text{ВЗН}}$ существенным образом увеличивается площадь кристалла БИС, необходимая для реализации схемы ВЗН-

суммирования, преимущественно за счет увеличения количества и номиналов емкостей. Суммарную емкость схемы ВЗН-суммирования в «холодной зоне» на основе аналоговых КМОП ВЗН-регистров можно оценить по формуле:

$$C_{\text{рег}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{ВЗН}}-1} 2iC_0N_{\text{выб}} + C_0N_{\text{ВЗН}} = C_0(N_{\text{выб}}N_{\text{ВЗН}}(N_{\text{ВЗН}}-1) + N_{\text{ВЗН}}), \quad (9)$$

где C_0 – емкость, рассчитанная на заряд с одной входной ячейки БИС (с учетом усиления). Для реализации схемы ВЗН-суммирования на основе матрицы аналоговых сумматоров необходима аналогичная суммарная емкость $C_{\text{сум}} = C_{\text{рег}}$ [1]. Отметим практически квадратичную зависимость суммарной емкости схемы ВЗН-суммирования от количества каскадов ВЗН.

Процедура разбиения канала ВЗН на $n_{\text{взн}} > 1$ секций может уменьшить суммарную емкость схемы ВЗН-суммирования и, соответственно, площадь, занимаемую данной схемой на кристалле БИС. Побочным эффектом разбиения каналов на секции является усложнение схемы коммутации сигналов, увеличение количества выходов и частоты вывода информации с кристалла БИС. В данной работе эти побочные эффекты рассматривать не будем.

Если канал ВЗН состоит из $n_{\text{взн}}$ секций, то относительную суммарную емкость схемы ВЗН-суммирования можно оценить по формуле:

$$\frac{C_{\text{рег}}(n_{\text{взн}})}{C_0} = (N_{\text{выб}}N_{\text{ВЗН}}(N_{\text{взн}}/n_{\text{взн}} - 1) + N_{\text{ВЗН}}). \quad (10)$$

На рис. 6 приведены зависимости относительной суммарной емкости ВЗН-регистра (при $\varepsilon = 0,02$ и $N_{\text{выб}} = 3$), нормированной на значение $C_{\text{рег}}(1)$, от количества каскадов ВЗН.

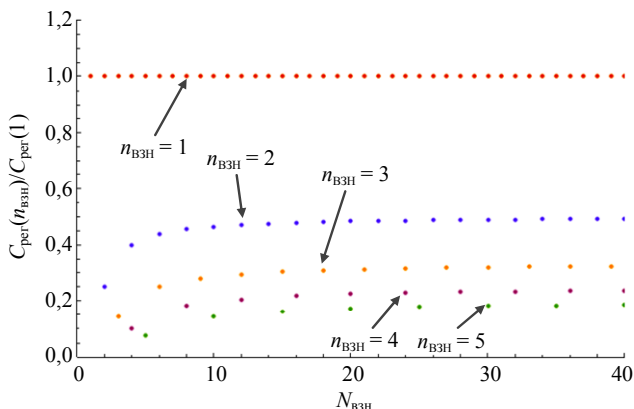


Рис. 6. Зависимости относительной суммарной емкости ВЗН-регистра (при $\varepsilon = 0,02$ и $N_{\text{выб}} = 3$), нормированной на значение $C_{\text{рег}}(1)$, от количества каскадов ВЗН.

Характеристики, приведенные на рис. (5) и (6), показывают, что при $N_{\text{взн}} = 10$ разбиение канала КМОП ВЗН-регистра на две секции приводит к уменьшению суммарной емкости регистра на 54 % и к увеличению амплитуды выходного сигнала на 15 % (при $\varepsilon = 0,02$ и $N_{\text{выб}} = 3$).

Оценим пространственное разрешение ФПУ на основе КМОП ВЗН-регистра по двум пятнам излучения от МО, расположенным в направлении сканирования. Зависимости контраста C на выходе ФПУ от расстояния между пятнами Δr_y (при различных значениях параметра ε) приведены на рис. 7. Расчеты выполнены для точек максимума пеленгационной характеристики (для обоих МО) при $y_{\text{выб}} = 15$ мкм, $N_{\text{выб}} = 3$, $N_{\text{взн}} = 10$ средствами математической модели ФПУ.

Представленные на рис. (5), (6) и (7) характеристики могут быть использованы для выбора оптимальных параметров $N_{\text{взн}}$, $n_{\text{взн}}$, $N_{\text{выб}}$ канала ВЗН с учетом особенностей БИС и оптико-механической системы ОЭС для достижения требуемых значений SNR и пространственного разрешения.

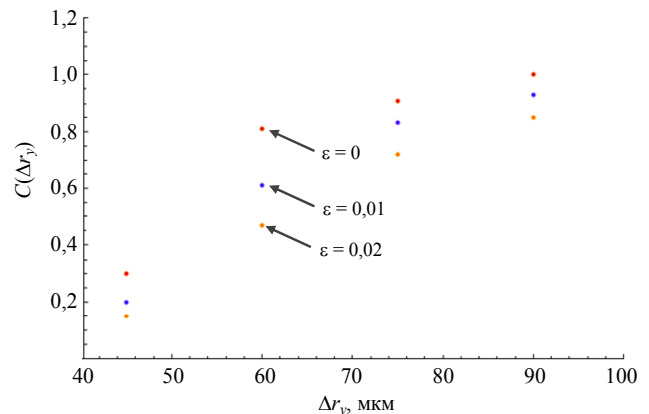


Рис. 7. Зависимости контраста C на выходе ОЭС по двум пятнам излучения от МО в зависимости от расстояния между ними при различных ε

Перейдем к анализу топологий второго типа. При моделировании использовались следующие входные значения: $a = 2 \times 1,4R$, $b = 2 \times 1,7R$, $G = 4$, $N_{\text{взн}} = 10$, $n_{\text{взн}} = 1$, $N_{\text{выб}} = 3$, $\Delta x = 60$ мкм, $\Delta y = 45$ мкм, $d_2 = 15 \times 37$ мкм, $d_3 = 2 \times 15 \times 37$ мкм, $d_4 = 3 \times 15 \times 37$ мкм, $\Delta_2 = 30$ мкм, $\Delta_3 = 15$ мкм, $\Delta_4 = 45$ мкм. Такая топология МФЧЭ обеспечивает периоды пространственной дискретизации $x_{\text{выб}} = y_{\text{выб}} = 15$ мкм.

Оценим влияние стабильности $v_{\text{ск}}$ на параметры ОЭС с топологией второго типа. На рис. 8 представлены изображения МО, полученные при различных значениях μ , соответствующих точкам максимума пеленгационной характеристики в направлении сканирования, при $y_0 = -2257,5$ мкм. Следует отметить существенное «разрушение»

структуры изображения МО при возрастании $|\mu|$, которое приводит к ухудшению пространственного разрешения. В то же время амплитуда сигналов

от МО при возрастании $|\mu|$ снижается незначительно в соответствии с зависимостями, приведенными на рис. 4.

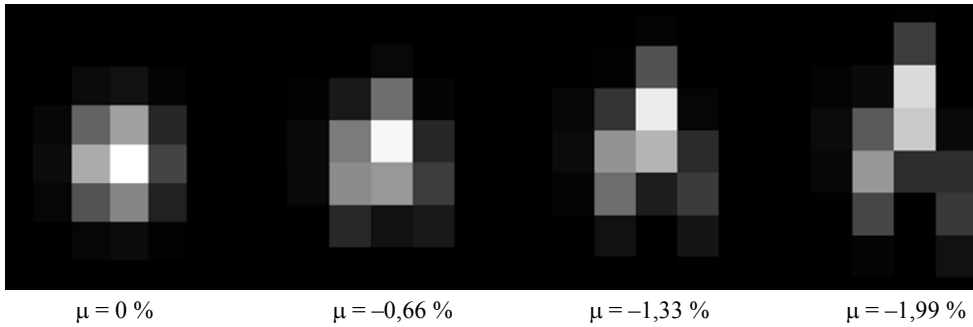


Рис. 8. Изображения МО на выходе ИК ФПУ с топологией второго типа при различных значениях μ

В оптико-электронных системах регистрации МО часто применяют согласованное суммирование [11] для повышения отношения сигнал шум на выходе изделия. Проведем оценку относительной амплитуды сигналов от МО $u_{amp_цф}(\mu)/u_{amp_цф}(0)$ на выходе согласованного фильтра в зависимости от значения μ для точек максимума пеленгационной характеристики. Коэффициенты фильтра согласо-

ванны с изображением МО при $\mu = 0 \%$. На рис. 9 представлены изображения МО на выходе фильтра, а также значения $u_{amp_цф}(\mu)/u_{amp_цф}(0)$ при различных значениях μ . Данная оценка, проведенная для ОЭС с топологией МФЧЭ второго типа, показывает, что отношение сигнал/шум на выходе согласованного фильтра также уменьшается незначительно при возрастании μ .

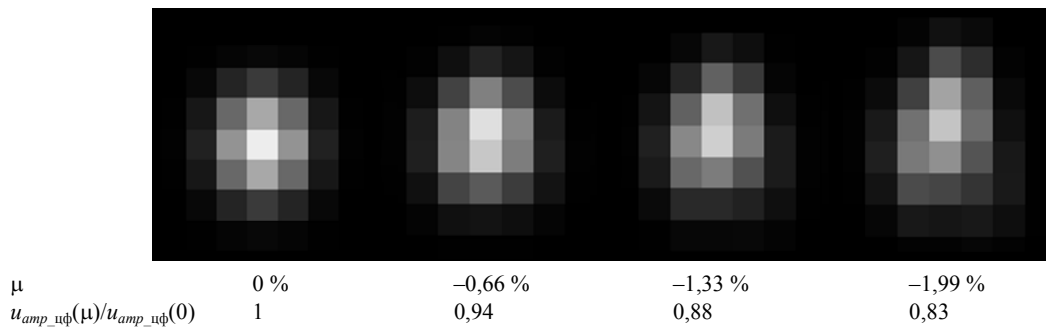


Рис. 9. Изображения МО и амплитуды выходных сигналов с учетом согласованной фильтрации при различных значениях μ

Проведем оценку пространственного разрешения ФПУ с топологией второго типа, которое ограничено процессом «разрушения» структуры входного сигнала при $\mu \neq 0 \%$. Пусть ОЭС регистрирует гармонический сигнал с пространственной частотой η [1/мм] в плоскости МФЧЭ. Введем понятие фазы φ входного изображения. Будем считать, что разность фаз $\Delta\varphi = 2\pi$ соответствует смещению изображения МО на расстояние, равное $1/\eta$ в плоскости МФЧЭ. Отклонение скорости сканирования от номинальной приводит к возникновению разности фаз $\Delta\varphi$ между изображениями с 1-й и G -й субматриц топологии. Ограничим $\Delta\varphi$ значением $\Delta\varphi_{max} = \pi/4$, что соответствует смещению $1/(8\eta)$. Тогда имеем следующие соотношения:

$$\frac{1}{8\eta} \geq (v_{ск} - v_{ск0}) \times \frac{d_G}{v_{ск0}} = \frac{d_G \mu}{100}, \tag{11}$$

$$\mu_{кр}(\eta) = \frac{12,5}{d_G \eta}, \tag{12}$$

где $\mu_{кр}(\eta)$ – максимальное значение рассинхронизации для топологии второго типа при $\Delta\varphi < \Delta\varphi_{max} = \pi/4$ (см. рис. 10). При $b = 2 \times 1,7R$ первый нуль функции передачи модуляции ФПУ с заданной топологией равен $\eta_0 \approx 30$ парам линий/мм [8]. В соответствии с (12), $\mu_{кр}(\eta_0) = 0,25 \%$, что и является грубым требованием на точность $v_{ск}$ для ОЭС с рассматриваемой топологией второго типа.

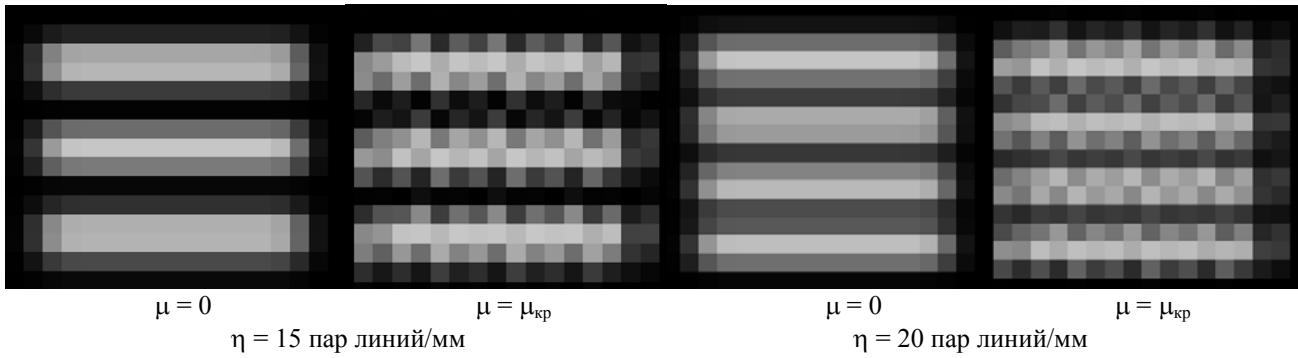


Рис. 10. Изображения выходных сигналов ОЭС при $\mu = 0$ и $\mu = \mu_{кр}$

Снижение пороговых характеристик и пространственного разрешения ФПУ с топологией второго типа может быть обусловлено отклонением направления ВЗН-суммирования от направления сканирования в плоскости МФЧЭ на угол α . На рис. 11 схематично показаны рассматриваемая топология второго типа и траектории движения пятна

на излучения в процессе сканирования, при которых пеленгационные характеристики каналов различных субматриц совмещаются. Сверху на рис. 11 и рис. 12 указаны номера субматриц. Рис. 11 и 12 показывают, что значения минимума пеленгационной характеристики возрастают монотонно в следующих диапазонах угла α : $D1 = [-46'; 0]$ и $D2 = [0; 31']$.

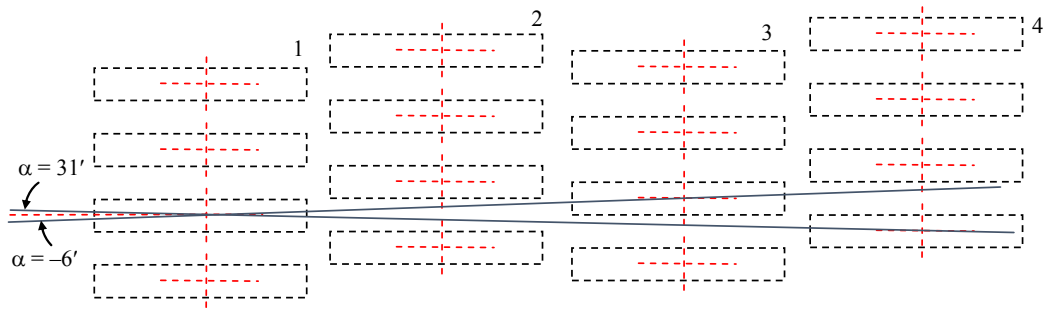


Рис. 11. Траектории движения пятна излучения, при которых пеленгационные характеристики в направлении, ортогональном ВЗН-суммированию, совмещаются.

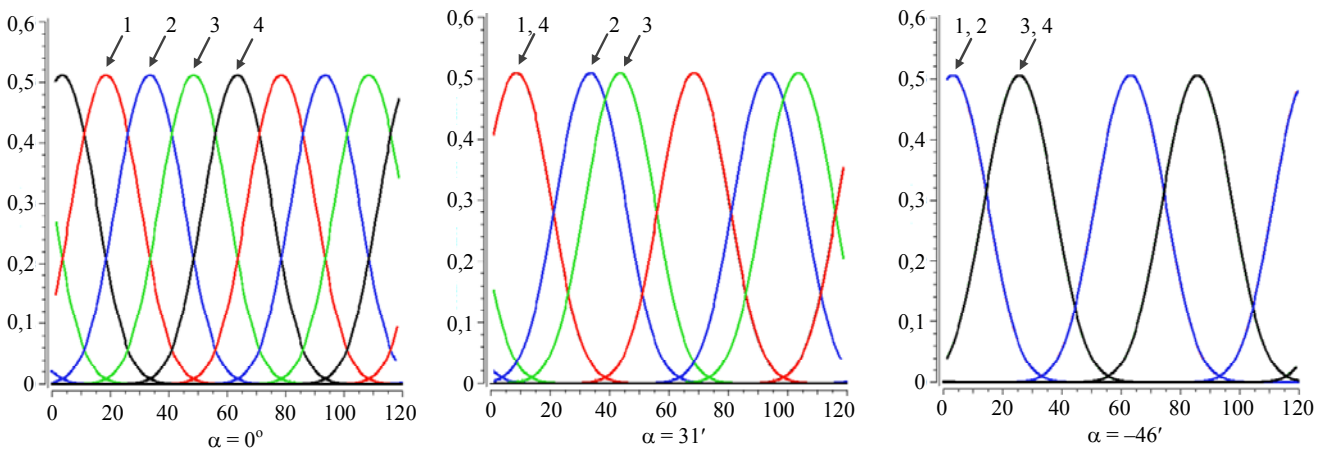


Рис. 12. Пеленгационные характеристики в направлении, ортогональном ВЗН-суммированию, для случаев, показанных на рис. 11.

Построим зависимости относительного провала пеленгационной характеристики $\tau_{\perp} = (u_{amp}^{max} - u_{amp}^{min}) / u_{amp}^{max}$ в направлении, ортогональном суммированию, от размера ФЧЭ в диапазоне $D_1 - D_2$ (см. рис. 13). Представленные характери-

стики могут быть использованы для оценки пороговой чувствительности ФПУ с топологией второго типа с учетом требований на точность совмещения направлений сканирования и ВЗН-суммирования в фокальной плоскости ОС.

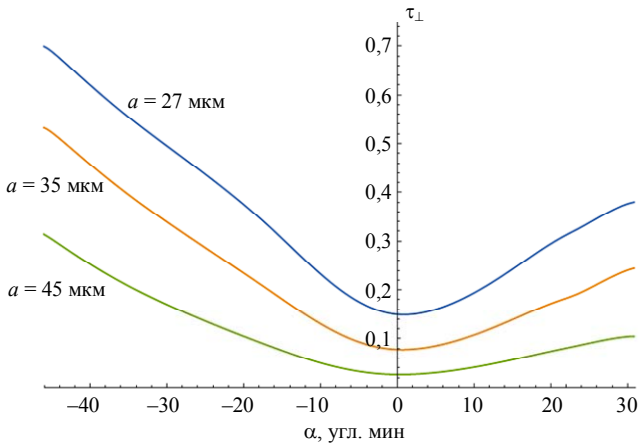


Рис. 13. Зависимости относительных провалов пеленгационной характеристики в направлении, ортогональном суммированию, от размера ФЧЭ a .

Перейдем к рассмотрению топологий третьего типа. При моделировании использовались следующие входные значения: $a = 2 \times 1,4R$, $b = 2 \times 1,7R$, $G = 2$, $N_{\text{взн}} = 10$, $n_{\text{взн}} = 1$, $N_{\text{выб}} = 4$, $\Delta x = 30$ мкм, $\Delta y = 60$ мкм, $d_2 = 30$ мкм, $\Delta_2 = 15$ мкм. Такая топология МФЧЭ обеспечивает периоды пространственной дискретизации $x_{\text{выб}} = y_{\text{выб}} = 15$ мкм.

Как уже было отмечено ранее в разделе «Классификация топологий МФЧЭ ИК ФПУ с ВЗН», топологии третьего типа отличаются устойчивостью параметров выходных сигналов ИК ФПУ к отклонению скорости сканирования от номинального значения и отклонению направления

ВЗН-суммирования от направления сканирования в плоскости МФЧЭ. На рис. 14 приведены изображения МО на выходе ФПУ с топологией третьего типа при различных значениях μ , для точек максимума пеленгационной характеристики в направлении ВЗН-суммирования. Отметим практически полное сохранение пространственного распределения сигналов на выходе прибора в широком диапазоне значений μ (для сравнения см. рис. 8). Оценим $\mu_{\text{кр}}(\eta_0)$ по формуле (12), т. е. значение μ , приводящее к максимальной разности фаз между субматрицами $\Delta\varphi_{\text{max}} = \pi/4$. При $\eta_0 = 30$ пар линий/мм $\mu_{\text{кр}}(\eta_0) \approx 13,9\%$, т. е. требования на точность синхронизации процессов сканирования и ВЗН-суммирования ФПУ с топологией третьего типа в большей степени определяются процессом ВЗН-суммирования, а не «сшивки» изображений с различных субматриц. Последнее утверждение справедливо и для требований к углу α . Таким образом, при оценке параметров ИК ФПУ с топологией третьего типа необходимо использовать выражения и характеристики, приведенные для топологий первого типа в начале данного раздела (с учетом более высокой частоты пространственной дискретизации $x_{\text{выб}}$, обеспечиваемой наличием нескольких «вложенных» субматриц).

Недостатком топологии МФЧЭ третьего типа является большая продолжительность периода ВЗН, что увеличивает количество ВЗН-сумматоров и, соответственно, размер кристалла БИС-считывания.

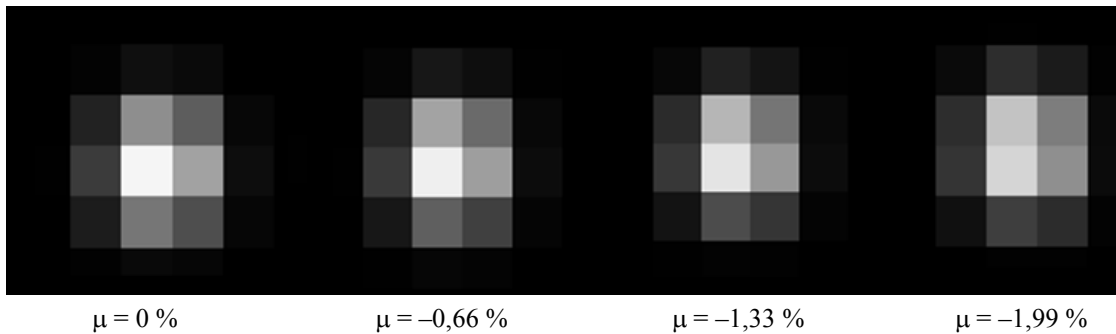


Рис. 14. Изображения МО на выходе ИК ФПУ с топологией третьего типа при различных значениях μ

Заключение

В работе предложена классификация топологий МФЧЭ односпектральных ОЭС с линейным однокоординатным оптико-механическим сканированием. Предложено разделять топологии МФЧЭ на однородные, состоящие из одной субматрицы (топологии первого типа), топологии с пространственно-разнесенными субматрицами (топологии второго типа) и топологии с пространственно-вложенными субматрицами (топологии третьего типа).

ОЭС на основе топологий МФЧЭ первого типа характеризуют существенные провалы пеленгационной характеристики, устойчивость к отклонению скорости сканирования от номинального значения, устойчивость к разбюстировке оптико-механической системы. Результаты моделирования показали, что амплитуда сигналов от МО на выходе ОЭС с топологией первого типа в максимуме пеленгационной характеристики снижается менее чем на 10% при отклонении скорости сканирования от номинальной на 1,5%.

Более высокая частота пространственной дискретизации изображения сцены, обеспечиваемая ФПУ с топологией второго типа, позволяет достичь высокой равномерности пеленгационной характеристики и высокого пространственного разрешения. ОЭС с топологией второго типа характеризуют высокие требования к точности юстировки оптико-механической системы и точности синхронизации процессов сканирования и ВЗН-суммирования. Например, в ОЭС с 4-х субматричной топологией МФЧЭ и 10-ю каскадами ВЗН-суммирования необходимо обеспечить погрешность синхронизации $|\mu|$, не превышающую 0,25 %, для передачи входного изображения с минимальными искажениями.

Показано, что при возрастании $|\mu|$ амплитуда сигналов от МО на выходе согласованного пространственного фильтра снижается незначительно, а именно, при увеличении $|\mu|$ с 0 % до 0,66 % амплитуда сигналов снижается на 6 %.

Установлено, что увеличение угла α между направлением сканирования и ВЗН-суммирования (при разъюстировке ОЭС) с 0 угл. мин. до 10 угл. мин. приводит к увеличению относительного провала пеленгационной характеристики с 2,6 % до 4,2 % при размере ФЧЭ $a = 45$ мкм и с 15 % до 19,2 % при $a = 27$ мкм.

Топологии МФЧЭ с «вложенными субматрицами» позволяют снизить требования к точности юстировке ОЭС с одновременным обеспечением высоких пороговых характеристик. В работе показано, что требования на точность синхронизации процессов сканирования и ВЗН-суммирования ФПУ с топологией третьего типа в большей степени определяются процессом ВЗН-суммирования, а не «сшивки» изображений с различных субматриц, т. е. для топологий третьего типа справедливы результаты, полученные для однородных топологий. Недостатком топологии МФЧЭ третьего типа является расширенная продолжительность периода ВЗН, что увеличивает количество ВЗН-сумматоров и, соответственно, размер кристалла БИС-считывания.

В работе предложен комбинированный способ ВЗН-суммирования: частичное ВЗН-суммиро-

вание сигналов с $n_{\text{ВЗН}}$ ФЧЭ канала в аналоговом виде внутри БИС и дальнейшая обработка $N_{\text{ВЗН}}/n_{\text{ВЗН}}$ значений вне БИС. Данный подход позволяет обеспечить оптимальное соотношение между частотой выводимой с БИС информации и площадью кристалла БИС, необходимой для реализации схемы ВЗН-суммирования, а также позволяет существенно увеличить число каскадов ВЗН при низкой эффективности переноса заряда внутри ВЗН регистра и повысить отношение сигнал/шум. Показано, что при количестве каскадов ВЗН $N_{\text{ВЗН}} = 10$ процедура разбиения канала КМОП ВЗН-регистра на две секции приводит к уменьшению суммарной емкости регистра на 54 % и увеличению амплитуды выходного сигнала ФПУ на 15 % при коэффициенте неэффективности переноса заряда $\varepsilon = 0,02$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов П. А., Моцев И. С., Хромов С. С. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
2. Чишко В. Ф., Касаткин И. Л., Бурлаков И. Д., Лопухин А. А., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 64.
3. Козлов К. В., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Бычковский Я. С., Дражников Б. Н., Кузнецов П. А. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 1. С. 63.
4. Громили Г. И., Иванов В. А., Косых В. П., Попов С. А. // Вычислительные технологии. 2016. Т. 21. № 1. С. 60.
5. Соляков В. Н. Оптимизация топологии многорядных матричных фотоприемных устройств при использовании их в тепловизионных системах с режимом ВЗН / Тезисы XVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, Россия, 2000.
6. Grycewicz T. J., Cota S. A., Lomheim T. S., Kalman L. S. // Remote Sensing System Engineering. 2008. Vol. 7087. P. 248.
7. Лазарев П. С., Кондюшин И. С., Коцавцев Н. Ф., Соляков В. Н., Таубкин И. И., Хамидуллин К. А. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 21.
8. Козлов К. В., Стрельцов В. А., Патрашин А. И., Косых В. П., Громили Г. И. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 5. С. 467.
9. Козлов К. В., Патрашин А. И., Стрельцов В. А. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 2. С. 155.
10. Щербина Г. А. // Журнал радиоэлектроники. 2014. № 6. С. 1.
11. Дражников Б. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А., Соляков В. Н. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 6. С. 566.

Classification and analysis of the TDI FPA photosensitive elements matrixes

*K. V. Kozlov^{1,2}, V. N. Solyakov¹, V. A. Streltsov^{1,2}, O. D. Isaeva¹, V. V. Savtsov¹,
and D. S. Zhirikhov¹*

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

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

Received October 2, 2017

Consideration is given to a classification and comparative analysis of the TDI FPA photosensitive elements matrixes for infrared (IR) electro-optical systems (EOS) with a linear single-axis scanning. A new type of the FPA topology has been proposed which allows to reduce the requirements for a scanning system accuracy, while maintaining a high FPA parameters. The requirements for scanning systems of electro-optical systems with different topologies have been calculated. A new method of the combined TDI-algorithm is presented. Effectiveness of a matched filtering procedure for different topologies is showed.

Keywords: point target, TDI, FPA, classification, analysis, electro-optical systems.

REFERENCES

1. P. A. Kuznetsov, I. S. Moshchev, and S. S. Khromov, *Usp. Prikl. Fiz.* **1**, 606 (2013).
2. V. F. Chishko, I. L. Kasatkin, I. D. Burlakov, A. A. Lopukhin, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikl. Fiz.*, No. 2, 64 (2007).
3. K. V. Kozlov, A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, Ya. S. Bychkovsky, B. N. Drazhnikov, and P. A. Kuznetsov, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (1), 63 (2017).
4. G. I. Gromilin, V. A. Ivanov, V. P. Kosykh, and S. A. Popov, *Vychislit. Tekhnolog.* **21** (1), 60 (2016).
5. V. N. Solyakov, in *Proc. XVI Intern. Conf. Photoelectronics* (Moscow, Russia, 2000).
6. T. J. Grycewicz, S. A. Cota, T. S. Lomheim, and L. S. Kalman, *Remote Sensing System Engineering* **7087**, 248 (2008).
7. P. S. Lazarev, I. S. Kondyushin, N. F. Koshavtsev, et al., *Prikl. Fiz.*, No. 6, 21 (2013).
8. K. V. Kozlov, V. A. Streltsov, A. I. Patrashin, V. P. Kosykh, and G. I. Gromilin, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (5), 467 (2017).
9. K. V. Kozlov, A. I. Patrashin, and V. A. Streltsov, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (2), 155 (2017).
10. G. A. Shcherbina, *Zhurnal Radioelektroniki*, No. 6, 1 (2014).
11. B. N. Drazhnikov, K. V. Kozlov, P. A. Kuznetsov, and V. N. Solyakov, *Usp. Prikl. Fiz.* **3** (6), 566 (2015).