

Математическая модель крупноформатного инфракрасного фотоприемного устройства при временной задержке и накоплении

К. В. Козлов, А. И. Патрашин, В. А. Стрельцов

Представлена математическая модель оптико-электронного тракта крупноформатного инфракрасного (ИК) фотоприемного устройства с режимом временной задержки и накопления (ВЗН), предназначенного для регистрации малоразмерных объектов. Модель позволяет получать изображения на выходе сканирующего фотоприемного устройства большого формата (с количеством каналов ВЗН, большим 10000) и прогнозировать параметры приборов с учетом погрешностей установки отдельных фотоприемных модулей, паразитной засветки фоточувствительного слоя, шумов оптико-электронного тракта, взаимного влияния сигналов внутри ФПУ, разброса чувствительности и темновых токов фоточувствительных элементов (ФЧЭ), недостатков схемы ВЗН-суммирования и т. д. В модели также реализована возможность моделирования сигналов в режиме с адаптивным временем накопления. Модель ИК ФПУ состоит из четырех основных частей: аналитической модели облученности (АМО), позволяющей рассчитать распределение облученности в плоскости фотослоя от сцены и элементов конструкции ФПУ; аналитической модели сигналов (АМС), в рамках которой оптико-электронный тракт ФПУ представлен произведением частотных передаточных функций отдельных линейных процессов; имитационной модели сигналов (ИМС), являющейся более общей (чем АМС) моделью и содержащей подробное описание отдельных модулей реальных ФПУ; аналитической модели шумов (АМШ), позволяющей рассчитать шумы ИК ФПУ с различной схемотехникой большой интегральной схемы (БИС) считывания при известных фототоках и темновых токах каждого из ФЧЭ. В данной статье представлена первая часть работы – описание математического аппарата моделей.

Ключевые слова: ВЗН, ФЧЭ, крупноформатное ФПУ, БИС считывания, малоразмерный объект.

Введение

На этапах разработки, наладки, измерений сложной оптико-электронной аппаратуры возникает необходимость моделировать характеристики прибора при различных значениях конструктивных и эксплуатационных параметров. В литературе представлено достаточно много описаний математических моделей фотоприемных устройств, например, в работах [1–3] приведены универсаль-

ные выражения, позволяющие рассчитать облученность в любой точке фотослоя от элементов конструкции фотоприемного устройства (ФПУ), а также от внешнего фона. В [1, 4, 5] представлены подробные выражения для расчета функции передачи модуляции (МТФ) оптико-электронной системы, работающей в различных режимах. В работах [6–8] приведены, в целом, близкие модели процессов регистрации излучения малоразмерных объектов (МО) фотоприемным устройством с режимом временной задержки и накопления (ВЗН) (малоразмерными будем называть объекты, размеры изображения которых в плоскости матрицы ФЧЭ (МФЧЭ) не превышают удвоенного размера ФЧЭ). В моделях [1–2] и [5] рассматриваются достаточно близкие модели шумов ФПУ: в [1] суммарный шум состоит из дробового, теплового и $1/f$ -шумов фоточувствительного элемента (ФЧЭ), шума считывания БИС, шума аналого-цифрового преобразования; в [2] суммарный шум формируется дробовым шумом ФЧЭ, шумом входной ячейки

Козлов Кирилл Владимирович^{1,2}, инженер 1 кат., аспирант.
Патрашин Александр Иванович¹, ведущий научный сотрудник.

Стрельцов Вадим Александрович^{1,2}, техник, студент.
¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Московский физико-технический институт (МФТИ).
Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный,
Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2017 г.

© Козлов К. В., Патрашин А. И., Стрельцов В. А., 2017

БИС, шумом ВЗН-суммирования и шумом выходного каскада мультиплексора; в [5] учитываются дробовой, тепловой и $1/f$ -шумы фотодиода, а также шум усилителя, шум считывания, шум оцифровки и систематические шумы, такие как наводки и т. д.

Однако ни одна из представленных моделей по отдельности не позволяет описать современное крупноформатное ИК ФПУ, осуществляющее регистрацию МО. Крупноформатными будем называть ФПУ, МФЧЭ которых является гибридной, т. е. собранной из модулей меньшего формата.

Учитывая сказанное относительно крупноформатного ИК ФПУ, в ходе всей проделанной работы был произведен подробный анализ литературы, причем избранные позиции (преимущественно из [1–8]) были положены в основу новой интегрированной математической модели крупноформатных ИК ФПУ с ВЗН. Экспериментальное и теоретическое исследования электронного тракта реальных аналоговых схем с ВЗН, процессов взаимного влияния сигналов в ИК ФПУ позволили разработать новые соотношения для описания процесса преобразования сигналов внутри прибора. Данные выражения также вошли в состав разработанной модели. Новая модель позволяет получать изображения на выходе сканирующего фотоприемного устройства большого формата (с количеством каналов ВЗН, большим 10000) и рассчитывать параметры приборов с учетом погрешностей установки отдельных фотоприемных модулей, паразитной засветки фоточувствительного слоя, шумов оптико-электронного тракта, взаимного влияния сигналов внутри ФПУ и т. д. В модели также реализована возможность моделирования изображений на выходе ФПУ в режиме с адаптивным временем накопления [9, 10]. Полученная в результате математическая модель крупноформатных ИК ФПУ, осуществляющих регистрацию МО, не имеет прямых аналогов в открытой печати.

Целью данной статьи является представление первой части всей работы, а именно, описание математического аппарата отдельных моделей, входящих в интегрированную математическую модель крупноформатных ИК ФПУ.

Структура модели

Интегрированная модель крупноформатного ИК ФПУ состоит из четырех частей: аналитической модели облученности (АМО) фотослоя, аналитической модели сигналов (АМС), имитационной модели сигналов (ИМС), аналитической модели шумов (АМШ). Блок-схема всей модели представлена на рис. 1.

Основной функцией АМО является аналитическое описание распределений паразитной и фоновой облученности фотослоя при заданных конструктивных и эксплуатационных параметрах ИК ФПУ и оптической системы (ОС) в спектральных диапазонах чувствительности ФЧЭ или пропускания узкополосного фильтра без учета пространственной фильтрации.

АМС осуществляет пространственную фильтрацию распределений на выходе АМО с учетом приведенных к плоскости фотослоя импульсных характеристик процессов сканирования, фотопреобразования, фильтрации, взаимосвязи и т. д. или, иначе говоря, позволяет описать тракт преобразования сигналов ФПУ в виде последовательности линейных преобразований. Данный подход справедлив для большинства современных ИК ФПУ с ВЗН, работающих в линейном режиме, и является удобным средством быстрой оценки параметров систем. Отметим, что фраза «ФПУ линейно» означает линейность оптико-электронного тракта без учета процедуры выборки сигналов, которая заведомо нелинейна.

ИМС является более общей моделью с более детальной проработкой электронного тракта ФПУ. При простых оценках параметров ИК ФПУ результаты вычислений по АМС и ИМС совпадают, что является одним из индикаторов корректности расчетов.

АМШ описывает шумы ИК ФПУ с заданной схемотехникой БИС для каждого пикселя выходного изображения с учетом всех входных токов, темновых токов ФЧЭ при заданных параметрах каждого из блоков (4.1)–(4.5), представленных на рис. 1.

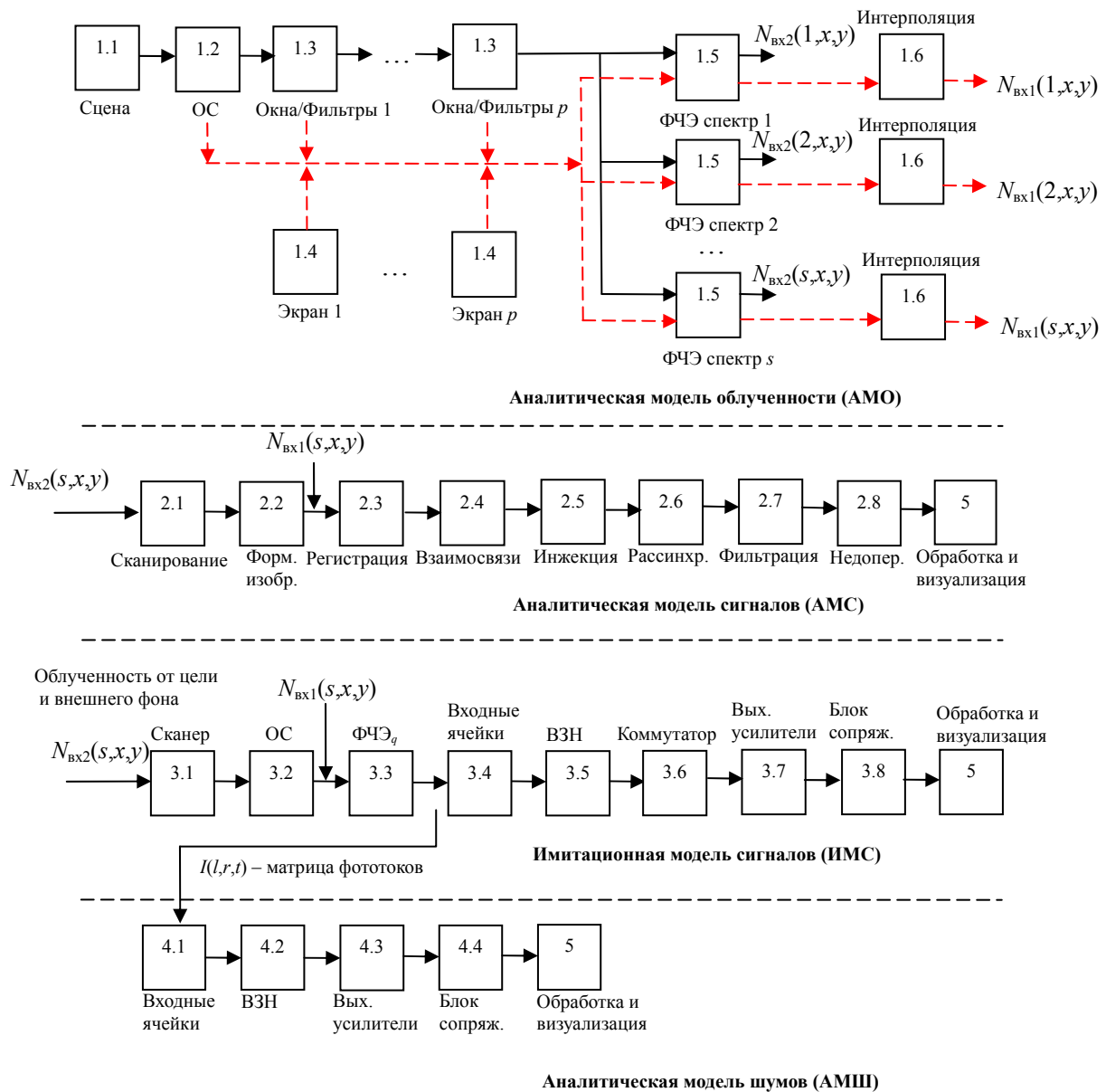


Рис. 1. Блок-схема модели ВЗН-ФПУ для регистрации МО.

Далее рассмотрим более подробно описание АМО, АМС, ИМС и АМШ.

Аналитическая модель облученности

Подробный вывод выражений, применяемых в АМО, представлен в работе [3]. Будем считать, что в плоскости фотослоя имеются распределения облученности от внешнего фона (от сцены) $N_{вх2}(s, x, y)$ [кванты/см²] и от элементов конструкции $N_{вх1}(s, x, y)$ [кванты/см²] в спектральных диапазонах чувствительности s без учета пространственной фильтрации. Отдельно отметим, что компоненты облученности $N_{вх1}(s, x, y)$ стационарны при неизменных температурах элементов конструкции ФПУ и не содержит высоких пространственных частот. Таким образом, разумно осуществлять расчет $N_{вх1}(s, x, y)$ в некоторых точках

фотослоя и применять процедуру двумерной интерполяции данных для ускорения вычислений. Наилучшие результаты были получены после применения бикубической интерполяции выходных данных. Напротив, $N_{вх2}(s, x, y)$ перемещаются в плоскости фотослоя в процессе сканирования и содержат высокие пространственные частоты, обусловленные наличием, например, малоразмерных объектов в поле зрения, что не позволяет применять процедуру интерполяции.

Аналитическая модель сигналов

В АМС учитывается пространственная фильтрация, осуществляемая за счет процессов сканирования в блоке (2.1), формирования изображения в плоскости фотослоя (2.2), фотопреобразования (2.3), фотоэлектрических и электрических

ских взаимосвязей сигналов (2.4), неидеальности инжекции заряда во входных ячейках БИС (2.5), рассинхронизации сканирования и ВЗН-суммирования (2.6), дополнительной фильтрации сигналов внутри БИС (2.7), и неидеального переноса заряда внутри ВЗН-регистра (2.8). Построение выходного изображения, обработку сигналов с ФПУ, расчет характеристик и построение зависимостей осуществляет отдельный модуль (5). Вклад аналого-цифрового преобразователя в данной работе не учитывается, поскольку считается, что его разрядность достаточно велика для преобразования сигналов без ощутимых потерь, а собственные шумы намного ниже шумов ИК ФПУ.

Если оптико-электронный тракт ИК ФПУ линейен, то параметры образуемого пространственно-временного фильтра можно описать функцией рассеяния точки *PSF* в пространственно-временной области или частотной передаточной функцией в частот-

ной области $F[PSF] = TF$, где *F* – оператор преобразования Фурье. Часто при описании оптико-электронных систем пренебрегают фазовой компонентой *TF* и используют функцию передачи модуляции $MTF = |TF|$.

Рассмотрим процесс преобразования входного распределения сигналов $N_{вх1}(s, x, y)$ [квант/см²] ВЗН-ФПУ в случае однородной топологии (см. рис. 2), для которой координаты центра ФЧЭ с номером (*l, r*) в неподвижной системе координат (СК) *xOy* определяются выражениями (1) и (2).

$$x_l = l \times \Delta x, \tag{1}$$

$$y_r = r \times \Delta y, \tag{2}$$

где Δx – расстояние между соседними ВЗН-каналами, а Δy – расстояние между центрами соседних ФЧЭ ВЗН-канала.

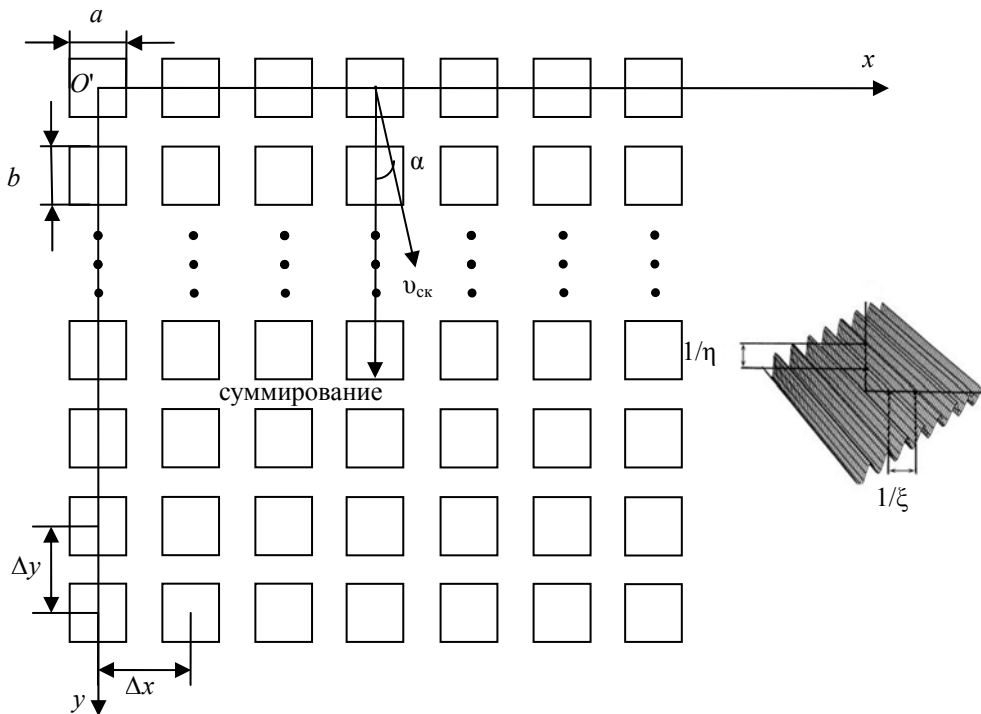


Рис. 2. Однородная топология ФЧЭ ВЗН-ФПУ.

Изображение объекта движется со скоростью сканирования $v_{ск}$ под углом α к направлению ВЗН-суммирования. Для идеально сьюстированной системы справедливо: $\alpha \rightarrow 0$, а также $v_{ск} \rightarrow v_{ск0}$, где $v_{ск0}$ – номинальное значение скорости сканирования, обеспечивающее синхронный режим работы.

В соответствии с блоками 2.1–2.8 и 5 (см. рис. 1), запишем $TF_{общ}$ в виде выражения:

$$TF_{общ} = TF_{OC} \times TF_{рег} \times TF_{скан} \times TF_{инж} \times TF_{взаим} \times TF_{фил} \times TF_{рассинхр} \times TF_{недопер} \times TF_{обр}. \tag{3}$$

Множители в выражении (3) подробно рассмотрены ниже. Для упрощения записи и более полного раскрытия физического смысла часть выражений приведена в пространственном базисе, причем переход к частотному базису будем считать классической процедурой и результаты Фурье-преобразований приводить не будем.

Далее используемые выражения, описывающие фильтрующие свойства ОС, ФЧЭ, сканирования, а также связь пространственных и временных частот базируются на результатах работы [4].

Параметры ОС как пространственного фильтра в пределах зоны изопланатизма определяются конструкцией оптической системы, длиной волны падающего излучения (в модели рассматривается только некогерентное излучение), уровнем расфокусировки и т. д. Наиболее часто при оценке параметров оптико-электронных систем предполагают, что размер пятна рассеяния ограничен дифракцией и PSF_{OC} определяется следующей функцией:

$$PSF_{OC1}(x, y) = \left(2J_1 \left(\frac{\pi D \sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda f} \right) \times \left(\frac{\pi D \sqrt{x^2 + y^2}}{\lambda f} \right)^{-1} \right)^2, \quad (4)$$

где D – диаметр выходного зрачка; f – фокусное расстояние; λ – длина волны излучения; J_1 – функция Бесселя первого рода. В других случаях считают, что размер пятна ограничен большим количеством независимых факторов, и тогда применяют вероятностное выражение:

$$PSF_{скан}(x, y) = \text{rect} \left(\frac{x}{T_{нак} \times v_{ск} \times \sin \alpha}, \frac{y}{T_{нак} \times v_{ск} \times \cos \alpha} \right). \quad (8)$$

где $T_{выб}$ – период выборки сигналов (часто $T_{выб} \approx T_{нак}$). Периоды пространственных выборок сигналов определяются выражениями

$$x_{выб} = \Delta x, \quad (9)$$

$$y_{выб} = v_{ск} \times \cos \alpha \times T_{выб}. \quad (10)$$

При вычислении MTF многорядных ИК ФПУ часто учитывают процессы диффузии носителей заряда, как это сделано, например, в [1]. Предлагаемые выражения содержат ряд параметров, специфичных для конкретной фоточувствительной структуры (например, диффузионная длина, коэффициент отражения подложки, поверхностная

$$PSF_{OC2}(x, y) = \exp \left(-\frac{x^2 + y^2}{2R^2} \right), \quad (5)$$

где R – эффективный радиус пятна. В частности, на расстоянии R от центра пятна $PSF_{OC2} \approx 0,6$.

При моделировании обычно полагают, что чувствительность ФЧЭ распределена равномерно внутри прямоугольника со сторонами a, b и равна нулю вне данного прямоугольника. Это можно записать следующим образом:

$$PSF_{ФЧЭ1}(x, y) = \text{rect}(x/a) \times \text{rect}(y/b). \quad (6)$$

В вероятностном варианте PSF ФЧЭ описывается двумерной функцией Гаусса:

$$PSF_{ФЧЭ2}(x, y) = e^{-x^2/2A^2} \times e^{-y^2/2B^2}, \quad (7)$$

где A и B – параметры, характеризующие эффективный размер ФЧЭ по осям x и y соответственно.

Размытие изображения, связанное с его движением при сканировании в течение времени накопления $T_{нак}$, рассчитывается по формуле:

скорость рекомбинации носителей и т. д.). Следует, однако, учитывать, что в фотоэлектронном приборе диффузия носителей – это только один из факторов, влияющих на взаимосвязь сигналов. При этом часто определяющий вклад вносят процессы внутри БИС, что практически исключает возможность заранее спрогнозировать значения взаимосвязей. Поэтому в рамках АМС и ИМС значения коэффициентов взаимосвязи рассматриваются как исходные данные, получаемые для конкретных приборов посредством измерений.

Для АМС, пренебрегая краевыми эффектами, запишем выражение, описывающее фильтрующие свойства взаимосвязи соседних ФЧЭ внутри канала и взаимосвязи соседних каналов:

$$PSF_{взаим}(x, y) = \begin{cases} \sum_{m=-1}^1 \left(\sum_{n=-1}^1 K_{m,n} \delta(x + m \times \Delta x, y + n \times \Delta y) \right), & \text{при } m \times n = 0; \\ 0, & \text{при } m \times n \neq 0. \end{cases} \quad (11)$$

где $K_{m,n}$ – коэффициенты взаимосвязи (определяются экспериментально), $\delta(x, y)$ – дельта-функция Дирака.

По определению дельта-функции имеем выражение:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x, y) dx dy = \begin{cases} f(0, 0) & \text{при } x, y = 0; \\ 0 & \text{при } x, y \neq 0. \end{cases} \quad (12)$$

В силу симметрии, примем $K_1 = K_{-1,0} = K_{1,0}$, $K_2 = K_{0,-1} = K_{0,1}$. Здесь K_1 – коэффициент межканальной взаимосвязи, K_2 – коэффициент внутриканальной взаимосвязи. Более сложные виды взаимосвязи, возникающей после коммутации (в основном в блоке сопряжения), рассматриваются в рамках ИМС.

Электронный тракт ФПУ вносит дополнительное размытие изображения, определяемое его импульсной характеристикой. Переход от пространственных частот к временным частотам в случае сканирующих систем осуществляется через скорость сканирования. Пусть f – частота электрического сигнала, тогда частота пространственного гармонического сигнала η [пар линий/мм] связана с f следующим соотношением:

$$f = \eta v_{\text{ск}} \cos \alpha. \quad (13)$$

Во входных ячейках БИС часто помещают фильтры верхних частот для расширения динамического диапазона системы путем устранения неинформативной низкочастотной фоновой составляющей.

$$TF_{\text{фил}}(f) = \frac{if / f_{\text{гр-ф}}}{1 + if / f_{\text{гр-ф}}}, \quad (14)$$

где i – мнимая единица, $f_{\text{гр-ф}}$ – граничная частота.

$$PSF_{\text{рассинхр}}(x, y) = \sum_{k=0}^{N_{\text{ВЗН}}-1} \delta(x + k \times v_{\text{ск}} \times \sin \alpha \times N_{\text{выб}} \times T_{\text{выб}}, y + k \times (v_{\text{ск}} \times \cos \alpha \times N_{\text{выб}} \times T_{\text{выб}} - \Delta y)), \quad (17)$$

где $N_{\text{выб}}$ – количество выборок, которое производится за время перемещения изображения между соседними ФЧЭ канала в синхронном режиме сканирования, $N_{\text{ВЗН}}$ – количество ФЧЭ в составе ВЗН-канала.

Как в ПЗС-регистрах, так и в современных КМОП ВЗН-регистрах присутствует эффект неидеальности переноса заряда. Данный эффект влияет на пространственное разрешение изображения в направлении переноса. В работе [14] представлено выражение для функции передачи модуляции ПЗС-регистра:

$$MTF_{\text{ПЗС}}(\eta, n) = \left[\frac{(1 - \varepsilon)^2}{1 + \varepsilon^2 - 2\varepsilon \cos(2\pi \eta y_{\text{выб}})} \right]^{n/2}. \quad (18)$$

Одним из основных параметров входных каскадов БИС считывания является динамический коэффициент инжекции ϕ [13], который определяется следующим выражением:

$$\phi = \frac{d[I_{\text{нак}}(l, r, t)]}{d[I_{\text{вх}}(l, r, t)]}, \quad (15)$$

где $I_{\text{нак}}(l, r, t)$ – ток емкости накопления, расположенной в ячейке мультиплексора с номером (l, r) , а величина $I_{\text{вх}}(l, r, t) = I(l, r, t) + I_T(l, r)$ – входной ток накопительной ячейки.

Неидеальность инжекции, как правило, объясняется нестабильностью смещения фотодиода, которая приводит к перезарядке емкости фотодиода и паразитных емкостей входного каскада и, следовательно, к эффекту размазывания коротких импульсов. В первом приближении, опишем данный эффект с помощью фильтра низких частот с граничной частотой $f_{\text{гр-инж}}$ [12].

$$TF_{\text{инж}}(f) = \frac{1}{1 + if / f_{\text{гр-инж}}}. \quad (16)$$

В реальных ВЗН-системах изображение дополнительно смазывается при отклонении реальной скорости сканирования от ее номинального значения как в направлении сканирования ($\Delta v_{\text{ск-}y} = v_{\text{ск-}y} - v_{\text{ск0-}y}$), так и в направлении, перпендикулярном сканированию ($\Delta v_{\text{ск-}x} = v_{\text{ск-}x} - v_{\text{ск0-}x}$, $v_{\text{ск0-}x} = 0$). В этом случае выборки значений сигналов производятся не в одной точке, а со сдвигом.

Тогда во временной области данный процесс можно описать следующим образом:

где n – количество переносов зарядового пакета; ε – неэффективность переноса заряда.

Используя выражение (18) и учтя процедуру ВЗН-суммирования, получим формулу для вычисления функции передачи модуляции классического КМОП ВЗН-регистра:

$$MTF_{\text{недопер}}(\eta) = \frac{1}{N_{\text{ВЗН}}} \times \sum_{k=1}^{N_{\text{ВЗН}}} MTF_{\text{ПЗС}}(\eta, 2 \times (k-1) \times N_{\text{выб}}). \quad (19)$$

Схема классического КМОП ВЗН-регистра приведена на рис. 3.

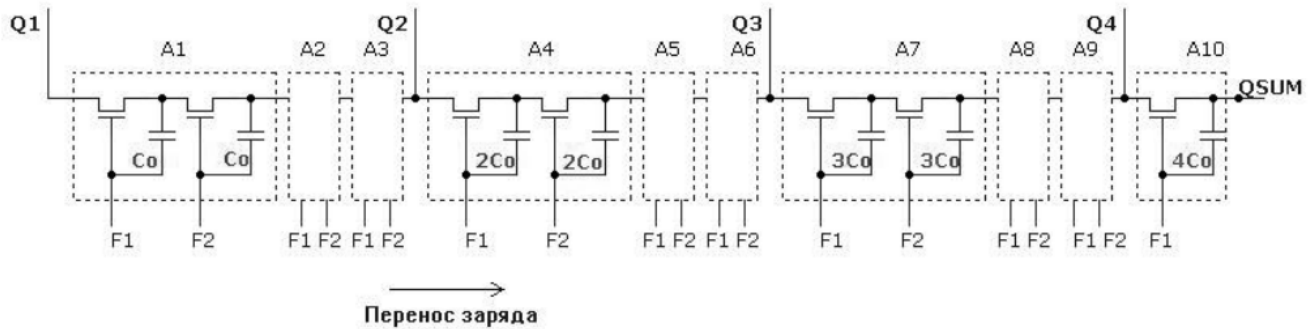


Рис. 3. Упрощенная схема ВЗН-регистра на n-МОП-транзисторах.

Реальный электронный блок обработки выходных сигналов ИК ФПУ выполняет ряд функций, а именно: коррекцию неоднородности чувствительности каналов, процедуру деселекции (отключения) неработающих ФЧЭ, различные виды фильтрации сигналов и т. д. В рамках данной работы при описании блока обработки ограничимся рассмотрением процедуры согласованной пространственной фильтрации сигналов от цели на однородном фоне. Данный подход позволит количественно оценить предельные характеристики

прибора без дополнительного усложнения модели. Процесс фильтрации продемонстрирован на рис. 4 и представляет собой свертку массива изображения S и массива фильтра M . Элементы M_{kn} выбираются таким образом, чтобы обеспечить максимальное отношение сигнал/шум на выходе прибора. Если принять отсчеты S_{qp} идентичными с точки зрения шумовых характеристик, то оптимальные коэффициенты фильтра M_{kn} должны быть пропорциональны соответствующим откликам от наблюдаемого объекта [15].

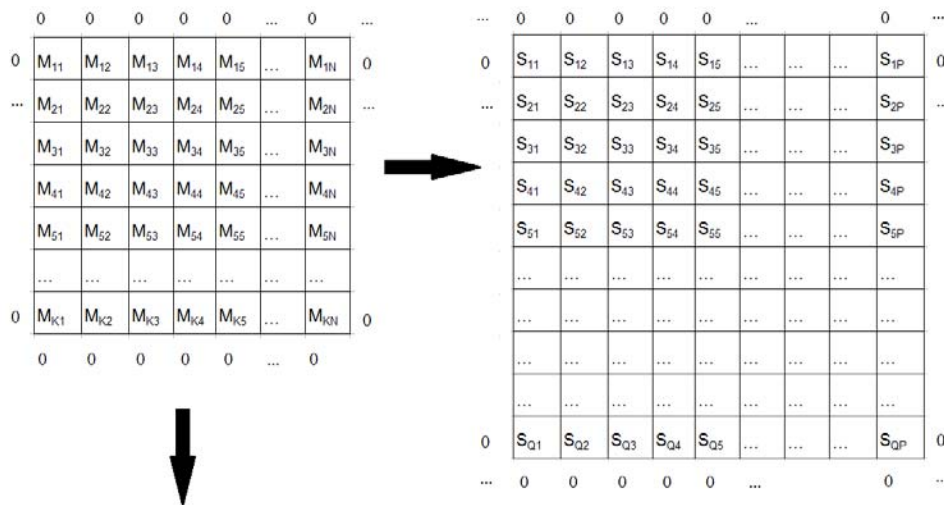


Рис. 4. Наглядное представление процесса пространственной фильтрации сигналов изображения S_{qp} фильтром M_{kn} .

На основании вышесказанного, запишем функцию рассеяния точки процесса фильтрации в виде

$$PSF_{обр}(x, y) = \sum_{k=1}^K \left(\sum_{n=1}^N M_{kn} \times \delta(x - n \times x_{выб}, y - k \times y_{выб}) \right). \quad (20)$$

Как можно заметить, выражение (20) ухудшает пространственное разрешение системы регистрации.

АМС позволяет рассчитать изображение на выходе линейного ВЗН-ФПУ с помощью следующих формул:

$$U_{вых2}(x, y) = [N_{вх2}(x, y) ** PSF_{OC}(x, y) ** PSF_{рег}(x, y) ** PSF_{скан}(x, y) ** PSF_{инж}(x, y) ** PSF_{взаим}(x, y) ** PSF_{фил}(x, y) ** PSF_{рассинхр}(x, y) ** PSF_{недопер}(x, y) ** PSF_{обр}(x, y)] \times Comb \left(\frac{x - x_2}{x_{выб}}, \frac{y - y_2}{y_{выб}} \right) \times K_{пер}, \quad (21)$$

$$U_{\text{вых1}}(x, y) = [N_{\text{вых1}}(x, y) ** PSF_{\text{рег}}(x, y) ** PSF_{\text{инж}}(x, y) ** PSF_{\text{взаим}}(x, y) ** PSF_{\text{фил}}(x, y) ** PSF_{\text{раcсинхр}}(x, y) ** PSF_{\text{недопер}}(x, y) ** PSF_{\text{обр}}(x, y)] \times \text{Comb}\left(\frac{x-x_1}{x_{\text{выб}}}, \frac{y-y_1}{y_{\text{выб}}}\right) \times K_{\text{пер}}, \quad (22)$$

$$U(x, y) = U_{\text{вых1}}(x, y) + U_{\text{вых2}}(x, y), \quad (23)$$

$$\text{Comb}(x/a, y/b) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x-n \times a, y-k \times b) \right), \quad (24)$$

где ** – операция двумерной свертки, *Comb* – гребень Дирака, описываемый выражением (24), x_1, y_1, x_2, y_2 – координаты, определяющие относительные положения входных сигналов относительно фотоприемной матрицы, $K_{\text{пер}}$ – линейный коэффициент преобразования сигналов ИК ФПУ.

Шаги дискретизации сигналов по осям x и y , используемые при численных расчетах, будем обозначать в дальнейшем как δx и δy соответственно. В области пространственных частот шаги дискретизации по осям ξ и η (в парах линий/мм) будем обозначать $\delta \xi$ и $\delta \eta$ соответственно, для которых справедливы следующие выражения:

$$\delta \xi = 1 / (\delta x \times S_x), \quad (25)$$

$$\delta \eta = 1 / (\delta y \times S_y), \quad (26)$$

где S_x, S_y – размеры массива данных по соответствующим координатам. В дальнейшем в частотной области будут приводиться распределения, центрированные относительно точек $(S_x/2, S_y/2)$.

Если топология ИК ФПУ состоит из нескольких пространственно-разнесенных субматриц (см. пример четырехсубматричной и двухсубматричной топологий на рис. 5), каждая из которых может быть описана выражениями (1) и (2) в собственной системе координат, то для получения изображения на выходе линейного прибора необходимо найти $U(x, y)$ для каждой субматрицы по отдельности и объединить изображения с учетом расстояний между субматрицами и периодов выборок. Также при $\alpha \rightarrow 0$ и $v_{\text{ск}} \rightarrow v_{\text{ск0}}$ можно ввести единую систему координат xOy для всех субматриц и определить $x_{\text{выб}}$ как расстояние между каналами, оси которых наиболее близки (при этом данные каналы могут быть расположены в разных субматрицах).

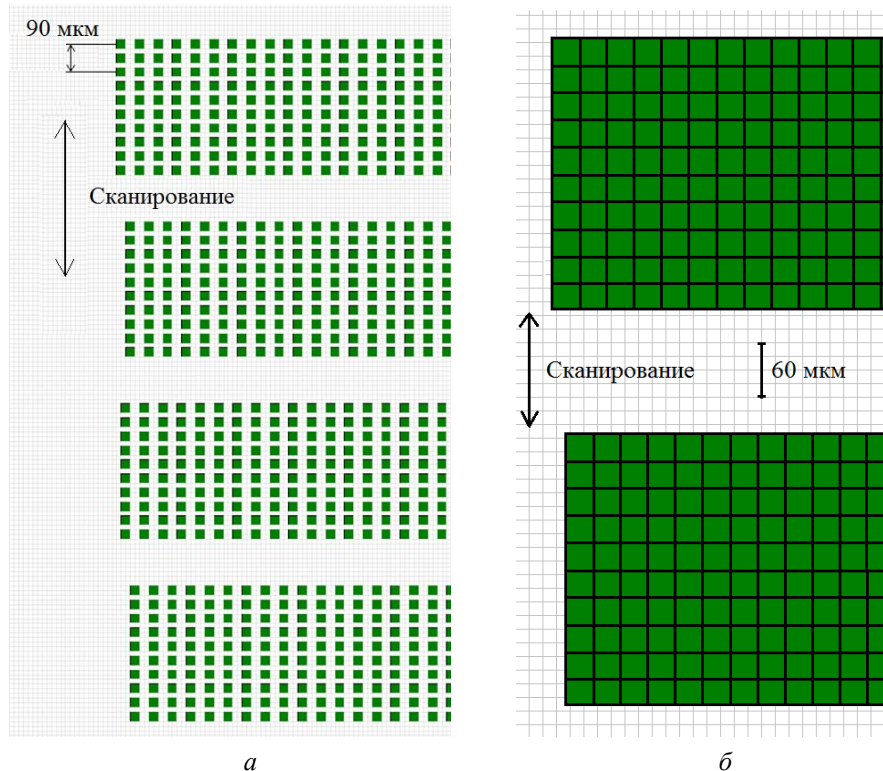
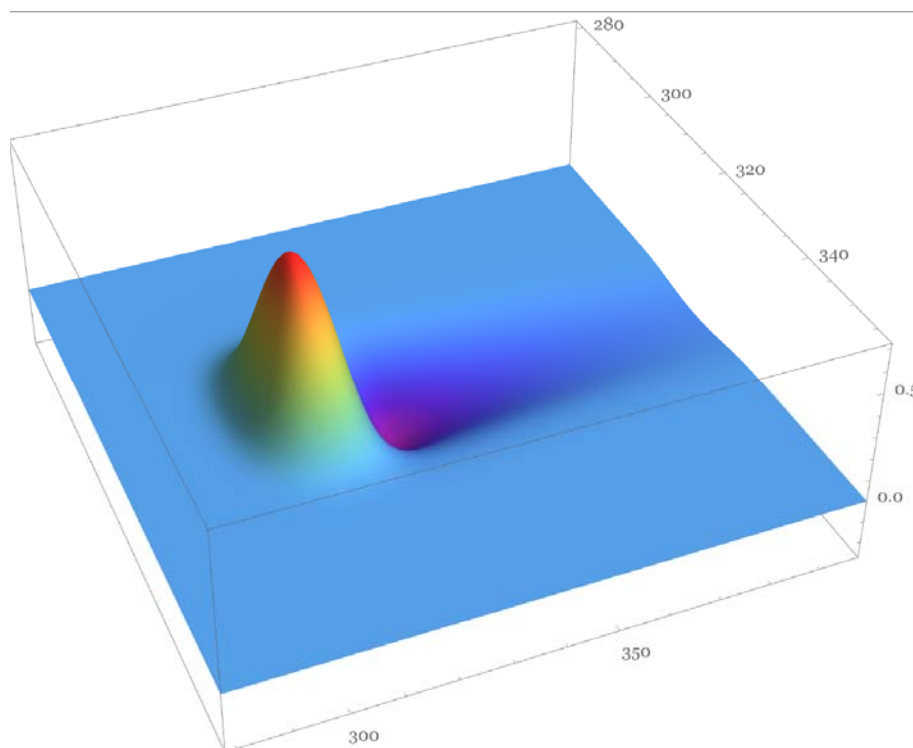


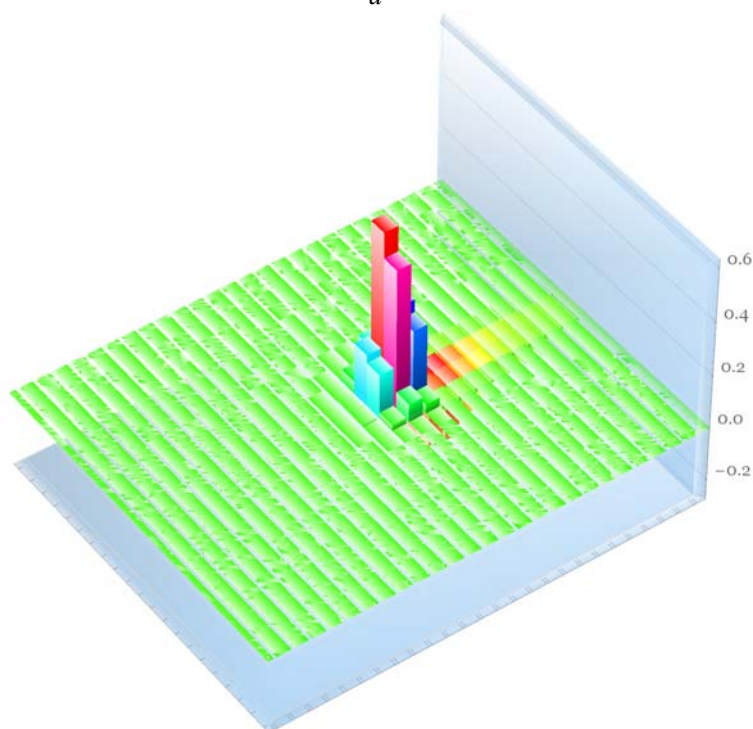
Рис. 5. Четырехсубматричная (а) и двухсубматричная топологии ФЧЭ (б).

На рис. 6 представлена импульсная характеристика ИК ФПУ с четырехсубматричной топологией (соответствующая рис. 5, *а*) до дискретизации и после дискретизации, рассчитанная по АМС, а на рис. 7 – соответствующая амплитудно-частотная характеристика (АЧХ). Исходные данные приведены в таблице, размеры в плоскости фотослоя на

графиках выражены в шагах дискретизации δx , δy для импульсной характеристики и в $\delta \xi$, $\delta \eta$ для АЧХ. Следует отметить, что изображение на выходе ФПУ определяется в том числе положением объекта относительно фотоприемной матрицы (параметрами x_1 , y_1 , x_2 , y_2 в выражениях 21–22), чем обусловлена асимметрия распределения на рис. 6, *б*.



а



б

Рис. 6. Нормированная импульсная характеристика ИК ФПУ: *а* – до дискретизации, *б* – после дискретизации.

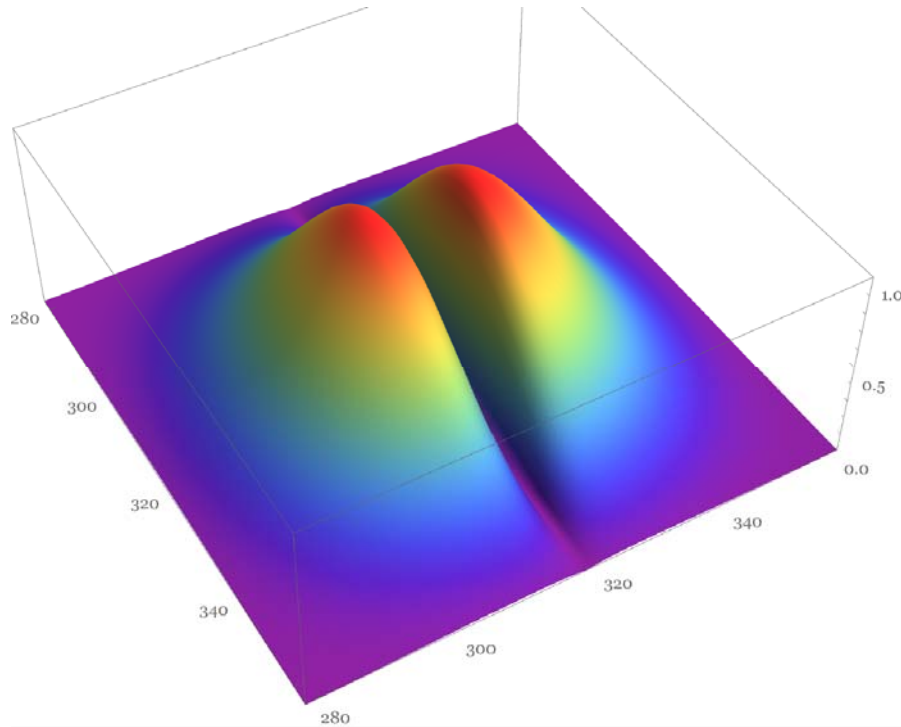


Рис. 7. Нормированная амплитудно-частотная характеристика ИК ФПУ до дискретизации.

Таблица

Исходные данные, использованные при расчете импульсной характеристики и АЧХ

Обозначение параметра, единица измерения	R , мкм	a, b , мкм	A , рад.	Δx , мкм	Δy , мкм	$N_{взн}$	$N_{выб}$	$T_{выб}$, мкс	$T_{нак}$, мкс	$v_{ск}$, мм/с	$f_{гр_ф}$, Гц	$\delta x, \delta y$, мкм	S_x, S_y
Значение параметра	15	30, 30	0	15	45	10	3	261	255	57,47	200	2, 2	636, 636

Имитационная модель сигналов

В отличие от АМС, в ИМС основой является описание отдельных элементов системы, а не процессов, возникающих при прохождении сигнала через оптико-электронный тракт. К примеру, в АМС существует отдельная функция «рассинхронизации сканирования и ВЗН-суммирования», а в ИМС данный эффект проявляется косвенно через описание сканера, ВЗН-канала, геометрии системы и т. д. и законов их взаимодействия. Сканер (блок 3.1) (см. рис. 1) приводит в движение распределение $N_{вх2}(s,x,y)$. Оптическая система (блок 3.2) осуществляет пространственную фильтрацию фонового излучения, которое вместе с паразитным излучением от элементов конструкции $N_{вх1}(s,x,y)$ преобразуется в фототоки ФЧЭ (3.3) $I(l,r,t)$, где (l,r) – координаты ФЧЭ, t – время. Накопление фототоков производится на накопительной емкости во входных ячейках БИС (3.4) в течение времени накопления $T_{нак}$. Также во входных ячейках могут быть реализованы фильтры сигналов и шумов,

схемы автоподстройки времени накопления, схемы аналого-цифрового преобразования и т. д. Для суммирования в блоке (3.5) в аналоговом виде может применяться как концепция матрицы аналоговых ВЗН-сумматоров [11], так и концепция ВЗН-регистра [11]. После суммирования производится коммутация в блоке (3.6), усиление (3.7) и передача фотосигналов на выходы БИС. Фильтрация и усиление сигналов с БИС происходит в блоке сопряжения (3.8).

Рассмотрим фоточувствительный слой крупноформатного ИК ФПУ (плоскость фотослоя совпадает с плоскостью xOy системы координат (СК) x_{kz} на рис. 8), который формируется отдельными фотоприемными модулями $ф_{mk}$, с каждым из них связана система координат $x_k y_k z_k$. Ввиду погрешностей установки модулей $ф_{mk}$, оси Ox и $O_k x_k$, а также Oy и $O_k y_k$ расположены под углами α_k .

Будем считать, что вся область фотослоя находится в зоне изопланатизма ОС, а плоскости $x_k O_k y_k$ всех фотоприемных модулей $ф_{mk}$ совпадают с xOy . Последнее утверждение обеспечивается

групповой обработкой оснований всех фотоприемных модулей, комплектующих ФПУ.

Пространственную фильтрацию излучения оптической системой и интегрирование сигналов по площади ФЧЭ в рамках имитационной модели можно считать линейными процессами, которые могут быть описаны интегралом свертки функций $N_{\text{вх}2}(s, x, y)$, $PSF_{\text{ФЧЭ}}(x, y)$ и $PSF_{\text{ОС}}(x, y)$. Накопление фотосигналов во входных ячейках БИС может

быть адаптивным (например в преобразователе «фототок–частота» [9]). Это обуславливает необходимость в общем случае использовать в модели временную диаграмму накопления и считывания (представленную на рис. 9) для описания процессов накопления и считывания сигналов в ячейке с номером (l, r) (здесь l – номер ВЗН-канала, r – номер ФЧЭ в составе данного ВЗН-канала).

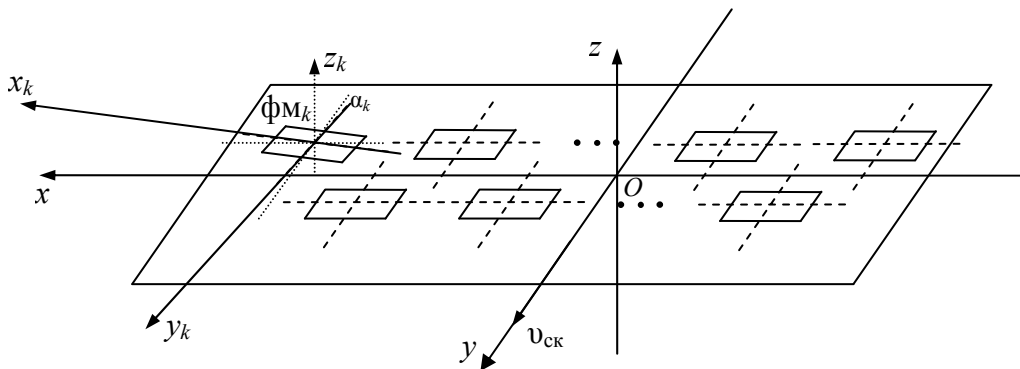


Рис. 8. Геометрия фоточувствительного слоя крупноформатного многорядного ИК ФПУ.

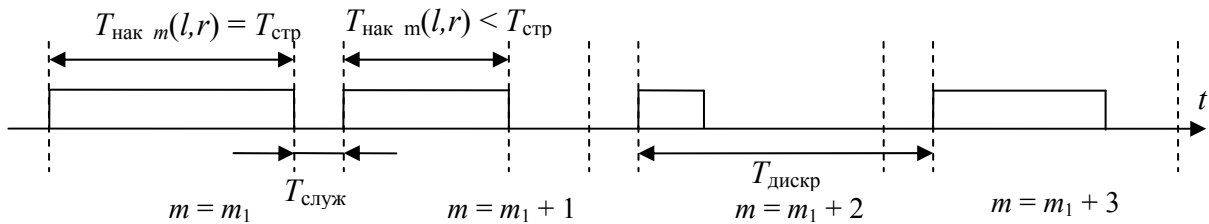


Рис. 9. Временная диаграмма процессов накопления и считывания сигналов во входной ячейке БИС.

Время накопления в ячейке (l, r) в цикле накопления m ($m \leq M$) равно $T_{\text{нак}_m}(l, r)$ и в общем случае является функцией входного тока. Диапазон изменения времени накопления равен $[0; T_{\text{стр}}]$, где $T_{\text{стр}}$ – время строки. Время $T_{\text{служ}}$ отводится на слу-

жебные операции. Период дискретизации $T_{\text{дискр}}$ равен сумме $T_{\text{стр}}$ и $T_{\text{служ}}$. Входной ток ячейки $I_{\text{вх}}(l, r, m, \Delta t)$ БИС состоит из темновой компоненты $I_T(l, r)$ и фототока $I(l, r, m, \Delta t)$, которые определяются следующими формулами:

$$I_1(l, r) = \eta e [N_{\text{вх}1}(s, x, y) ** PSF_{\text{ФЧЭ}}(x, y)](x_1(l, r), y_1(l, r)), \tag{27}$$

$$I_2(l, r, m, \Delta t) = \eta e [N_{\text{вх}2}(s, x, y) ** PSF_{\text{ОС}}(x, y) ** PSF_{\text{ФЧЭ}}(x, y)] \times (x_2(l, r, m \times T_{\text{дискр}} + \Delta t), y_2(l, r, m \times T_{\text{дискр}} + \Delta t)), \tag{28}$$

$$I(l, r, m, \Delta t) = [I_1(l, r) + I_2(l, r, m, \Delta t)] \times \Phi(l, r) + K_1 \times I(l-1, r, m, \Delta t) + K_1 \times I(l+1, r, m, \Delta t) + K_2 \times I(l, r-1, m, \Delta t) + K_2 \times I(l, r+1, m, \Delta t), \tag{29}$$

$$I_T(l, r) = I_{T0}(q) \times \Phi_T(l, r), \tag{30}$$

где e – заряд электрона, η – квантовая эффективность ФЧЭ, Δt – время, прошедшее с начала цикла накопления, I_1, I_2 – фототоки от паразитного излу-

чения и от сцены соответственно, $\Phi(l, r)$ – функции разброса чувствительности ФЧЭ, $I_{T0}(s)$ – среднее значение темнового тока для ФЧЭ спектрального

диапазона s , $\Phi_T(l, r)$ – функции разброса темновых токов ФЧЭ, K_1 – коэффициент межканальной взаимосвязи, K_2 – коэффициент внутрисканальной взаимосвязи, x_1, y_1, x_2, y_2 – относительные координаты изображения и ФЧЭ. x_1, y_1 определяются геометрией системы, а x_2, y_2 в момент времени $m \times T_{\text{дискр}} + \Delta t$ рассчитываются по формулам

$$x_2(l, r, m \times T_{\text{дискр}} + \Delta t) = x_{02}(l, r) + v_{\text{СК}} \times \sin \alpha_k \times [m \times T_{\text{дискр}} + \Delta t], \quad (31)$$

$$y_2(l, r, m \times T_{\text{дискр}} + \Delta t) = y_{02}(l, r) + v_{\text{СК}} \times \cos \alpha_k \times [m \times T_{\text{дискр}} + \Delta t], \quad (32)$$

$$q_{\text{нак}}(l, r, m) = \begin{cases} \int_0^{T_{\text{нак}} - m(l, r)} I_{\text{нак}}(l, r, m \times T_{\text{дискр}} + \Delta t) d\Delta t, & \text{если } q_{\text{нак}}(l, r, m) < C_{\text{нак}} \times \Delta V_{\text{нак_макс}}, \\ C_{\text{нак}} \times \Delta V_{\text{нак_макс}}, & \text{если } q_{\text{нак}}(l, r, m) \geq C_{\text{нак}} \times \Delta V_{\text{нак_макс}}; \end{cases} \quad (34)$$

где $q_{\text{нак}}(l, r, m)$ – заряд на накопительной емкости ячейки (l, r) в конце цикла накопления m , $\Delta V_{\text{нак_макс}}$ – максимальный диапазон изменения напряжения накопительной емкости в процессе накопления, $C_{\text{нак}}$ – значение накопительной емкости.

Дополнительная высокочастотная фильтрация во входных ячейках БИС реализуется в схемах с переключаемыми конденсаторами. Точное выражение для описания работы однозвенного дискретно-аналогового фильтра верхних частот имеет следующий вид:

$$\Delta q(l, r, m) \equiv q_{\text{фил}}(l, r, m) - q_{\text{фил}}(l, r, m-1) = \frac{C_{\text{фил}} \times q_{\text{нак}}(l, r, m) - C_{\text{нак}} \times q_{\text{фил}}(l, r, m-1)}{C_{\text{нак}} + C_{\text{фил}}}, \quad (35)$$

где $C_{\text{фил}}$ – значение разделительной емкости фильтра, $q_{\text{фил}}(l, r, m)$ – заряд на разделительной емкости фильтра в цикле накопления m .

Информативная компонента заряда на емкости выборки и хранения входной ячейки с учетом коэффициента передачи ячейки $K_{\text{яч}}$ рассчитывается по формуле:

$$q_{\text{СВХ}}(l, r, m) = K_{\text{яч}} \times \Delta q(l, r, m). \quad (36)$$

Сигналы, поступающие на схему ВЗН-суммирования, содержат как информационные составляющие $q_{\text{СВХ}}(l, r, m)$, так и регулируемые постоянные составляющие $q_{\text{пост}}(l, m)$, общие для всех ячеек канала (и, как правило, для всех каналов одного спектрального диапазона). Это выражается соотношением:

где x_{02}, y_{02} – относительные координаты в момент времени, соответствующий началу кадра.

Связь входного тока ячейки БИС $I_{\text{вх}}(l, r, m, \Delta t) = I(l, r, m, \Delta t) + I_T(l, r)$ и тока накопительной емкости $I_{\text{нак}}(l, r, m, \Delta t)$ в ИМС определяется аналогично АМС и выражается формулой:

$$I_{\text{нак}}(l, r, m, \Delta t) = F^{-1} \left[\frac{F[I_{\text{вх}}(l, r, m, \Delta t)]}{1 + i f / f_{\text{Гр_инж}}} \right], \quad (33)$$

где i – мнимая единица, $f_{\text{Гр_инж}}$ – граничная частота фильтра низких частот, F – оператор Фурье-преобразования. Накопленный сигнал в классическом случае определяется следующим образом:

$$q_{\text{ВЗН}}(l, r, m) = q_{\text{СВХ}}(l, r, m) + q_{\text{пост}}(l, m). \quad (37)$$

Подстройка $q_{\text{пост}}(l, m)$ позволяет регулировать рабочую точку БИС для передачи заряда без насыщения интересующих входных воздействий, в случае КМОП ВЗН-регистра – для повышения коэффициента переноса заряда (аналог жирного нуля в ПЗС).

Суммирование сигналов в режиме ВЗН осуществляется внутри БИС (в «холодной зоне»), либо во внешнем электронном блоке (в «теплой зоне»). ВЗН-суммирование в «теплой зоне» отличается от суммирования в «холодной зоне» существенно большим количеством выводов БИС, повышенным потреблением, более сложной аппаратурой обработки, однако позволяет производить суммирование по любому числу ФЧЭ. Рассматриваемая в данной работе математическая модель предназначена для описания аппаратуры, осуществляющей аналогичное ВЗН-суммирование внутри БИС. В работе [11] приведен матричный метод моделирования идеальной схемы, реализующей ВЗН, который не применим без доработки для описания большинства изделий с аналоговым режимом ВЗН. К примеру, при реализации ВЗН на основе матриц аналоговых сумматоров [17] на выходе БИС возникает периодическая амплитудная модуляция, вызванная технологическим разбросом параметров сумматоров, а в аналоговых КМОП ВЗН-регистрах на форму выходного сигнала оказывает влияние неэффективность переноса заряда [17] (см. примеры экспериментальных характеристик на рис. 10).

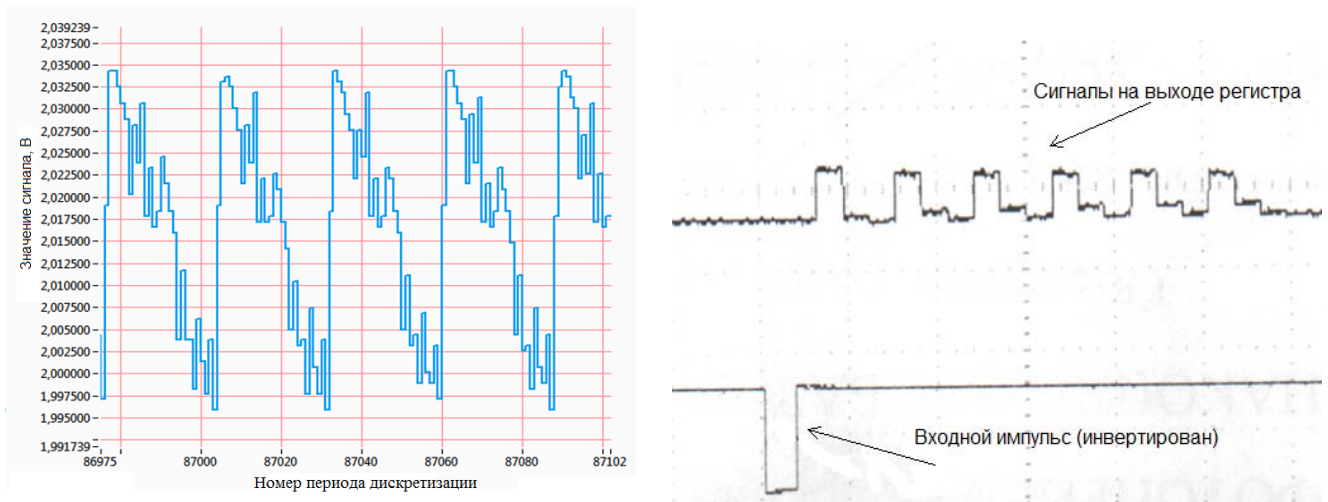


Рис. 10. Периодическая модуляция на выходе матрицы V3N-сумматоров (слева) и размытие короткого импульса V3N-регистром (справа).

В рамках модели ИК ФПУ разработаны математические описания V3N, учитывающие особенности реальных аналоговых схем. Рассмотрим данный вопрос более подробно.

По результатам экспериментальных исследований ФПУ формата 1024×10 и 576×6 с V3N-сумматорами было установлено, что периодическая модуляция не зависит от параметров входного воздействия и от времени накопления при условии работы БИС в пределах динамического диапазона. Тогда процесс V3N-суммирования может быть описан следующим выражением:

$$(U_{V3N})_1 = (q_{V3N})_1 \times (u_{V3N})_1 + (\Phi_{V3N}). \quad (38)$$

В выражении (38) использованы следующие обозначения: $(q_{V3N})_1$ – матрица входных воздействий размерности $M \times N_{V3N}$, где M – количество периодов дискретизации в пределах одного кадра, N_{V3N} – количество ФЧЭ в составе канала V3N;

$(u_{V3N})_1$ – матрица V3N-преобразования размерности $N_{V3N} \times [N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 1]$, где $N_{\text{выб}}$ – количество выборок за время перемещения изображения между соседними ФЧЭ канала, K_{V3N1} – линейный коэффициент преобразование заряда в напряжение; (Φ_{V3N}) – матрица оператора периодической модуляции размерности $M \times [N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 1]$, $(U_{V3N})_1$ – матрица состояния V3N-сумматоров [В] размерности $M \times [N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 1]$, содержащая информацию о заряде на каждом из $[N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 1]$ сумматоров в цикле $m \leq M$. Выходные сигналы схемы V3N $U_{V3N}(l, m)_1$ расположены в столбце $[N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 1]$ матрицы $(U_{V3N})_1$ и используются в дальнейших расчетах.

Для удобства восприятия матрица входных воздействий размерности $M \times N_{V3N}$ представлена на рис. 11. а (Φ_{V3N}) – матрица оператора периодической модуляции размерности $M \times [N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 1]$ представлена на рис. 12).

$$(q_{V3N})_1 = \begin{pmatrix} q_{V3N}(l, 1, 1) & q_{V3N}(l, 2, 1) & \dots & q_{V3N}(l, N_{V3N}, 1) \\ q_{V3N}(l, 1, 2) & q_{V3N}(l, 2, 2) & \dots & q_{V3N}(l, N_{V3N}, 2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{V3N}(l, 1, N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 1) & q_{V3N}(l, 2, N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 1) & \dots & q_{V3N}(l, N_{V3N}, N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 1) \\ q_{V3N}(l, 1, N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 2) & q_{V3N}(l, 2, N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 2) & \dots & q_{V3N}(l, N_{V3N}, N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{V3N}(l, 1, 2 \cdot N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 2) & q_{V3N}(l, 2, 2 \cdot N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 2) & \dots & q_{V3N}(l, N_{V3N}, 2 \cdot N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{V3N}(l, 1, 3 \cdot N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 3) & q_{V3N}(l, 2, 3 \cdot N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 3) & \dots & q_{V3N}(l, N_{V3N}, 3 \cdot N_{\text{выб}}(N_{V3N} - 1) + 3) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{V3N}(l, 1, M) & q_{V3N}(l, 2, M) & \dots & q_{V3N}(l, N_{V3N}, M) \end{pmatrix}$$

Рис. 11. Матрица входных сигналов V3N-сумматоров.

$$(u_{\text{ВЗН}})_1 = \begin{pmatrix} \overbrace{1 \ 1 \ \dots \ 1}^{N_{\text{выб}}} \ 1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1 \ \dots & K_{\text{ВЗН1}} \\ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1 \ \dots & K_{\text{ВЗН1}} \\ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1 \ 1 \ \dots & K_{\text{ВЗН1}} \\ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 1 \ \dots & K_{\text{ВЗН1}} \\ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots & K_{\text{ВЗН1}} \\ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots & K_{\text{ВЗН1}} \\ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots & K_{\text{ВЗН1}} \\ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots & K_{\text{ВЗН1}} \\ \dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots \ \dots & \dots \\ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ \dots & K_{\text{ВЗН1}} \end{pmatrix} \quad (\Phi_{\text{ВЗН}}) = \begin{pmatrix} 0 \ 0 \ \dots & \Phi_{\text{ВЗН}}(l,1) \\ 0 \ 0 \ \dots & \Phi_{\text{ВЗН}}(l,2) \\ \dots \ \dots \ \dots & \dots \\ 0 \ 0 \ \dots & \Phi_{\text{ВЗН}}(l, N_{\text{выб}}(N_{\text{ВЗН}} - 1) + 1) \\ 0 \ 0 \ \dots & \Phi_{\text{ВЗН}}(l,1) \\ 0 \ 0 \ \dots & \dots \\ 0 \ 0 \ \dots & \Phi_{\text{ВЗН}}(l, N_{\text{выб}}(N_{\text{ВЗН}} - 1) + 1) \\ 0 \ 0 \ \dots & \dots \\ 0 \ 0 \ \dots & \Phi_{\text{ВЗН}}(l, N_{\text{выб}}(N_{\text{ВЗН}} - 1) + 1) \\ 0 \ 0 \ \dots & \dots \\ 0 \ 0 \ \dots & \dots \\ 0 \ 0 \ \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Рис. 12. Матрица оператора ВЗН-преобразования (слева) и периодической модуляции (справа).

Рассмотрим подробнее еще одну распространенную концепцию аналогового ВЗН-суммирования внутри БИС, а именно, применение КМОП ВЗН-регистров. Основным параметром ВЗН-регистра является эффективность инжекции заряда в соседнюю ячейку [11]. Эксперименты, проведенные над образцом ФПУ формата 576×6 на основе ВЗН-регистров, разработанного в АО «НПО «Орион» и изготовленного в АО «ПКК Миландр» в соответствии с технологическими нормами 0,35 мкм, показали невысокую эффективность инжекции, что проявилось в размытии входного импульса уже при длине регистра, равной 16 ячеек (см. рис. 10). Коэффициент элементарного переноса заряда 1-ε составил 0,993. Практически на каждую ячейку регистра, кроме последней, приходилось два элементарных переноса. Для таких устройств приближение ε→0 не применимо и следует использовать более подробное описание процессов, протекающих внутри регистра, отличное от принятой схемы (38). Необходимое соотношение было получено в рамках математической модели ИК ФПУ в следующем виде:

$$(q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(m)) = (q_{\text{ВЗН}}(m))_2 + (u_{\text{ВЗН}})_2 (q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(m-1)). \quad (39)$$

В выражении (39) использованы следующие обозначения: $(q_{\text{ВЗН}}(m))_2$ – вектор входных воздействий размерности $[2(N_{\text{ВЗН}} - 1)N_{\text{выб}} + 1] \times 1$ (см. рис. 13) в цикле m ; $(u_{\text{ВЗН}})_2$ – матрица ВЗН-преобразования размерности $[2(N_{\text{ВЗН}} - 1)N_{\text{выб}} + 1] \times [2(N_{\text{ВЗН}} - 1)N_{\text{выб}} + 1]$; $(q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(m))$ – вектор состояния ВЗН-регистра в цикле m , состоящий из элементов $q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(l, n_{\text{яч}}, m)$, $n_{\text{яч}}$ – номер емкости хранения ВЗН-регистра (каждая ячейка состоит из двух емкостей хранения). Сигналы на выходе ВЗН-регистра в цикле накопления m соответствуют последнему элементу вектора $(q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(m)) - q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(l, 2(N_{\text{ВЗН}} - 1)N_{\text{выб}} + 1, m)$. Тогда сигналы после ВЗН суммирования $U_{\text{ВЗН}}(l, m)_2'$ для всех $m \leq M$ определяются как $K_{\text{ВЗН2}} \times q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(l, 2(N_{\text{ВЗН}} - 1)N_{\text{выб}} + 1, m)$, где $K_{\text{ВЗН2}}$ – линейный коэффициент преобразования заряда в напряжение.

$$(u_{\text{ВЗН}})_2 = \begin{pmatrix} \varepsilon & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 1-\varepsilon & \varepsilon & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1-\varepsilon & \varepsilon & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\varepsilon & \varepsilon & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1-\varepsilon & \varepsilon & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1-\varepsilon & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1-\varepsilon & \varepsilon \end{pmatrix} \quad (q_{\text{ВЗН}}(m))_2 = \begin{pmatrix} q_{\text{ВЗН}}(l, 1, m) \\ 0 \\ \dots \\ q_{\text{ВЗН}}(l, 2, m) \\ 0 \\ \dots \\ q_{\text{ВЗН}}(l, N_{\text{ВЗН}} - 1, m) \\ \dots \\ 0 \\ q_{\text{ВЗН}}(l, N_{\text{ВЗН}}, m) \end{pmatrix} \quad (q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(m)) = \begin{pmatrix} q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(l, 1, m) \\ \dots \\ q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(l, 2N_{\text{выб}}, m) \\ \dots \\ q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(l, 4N_{\text{выб}}, m) \\ \dots \\ q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(l, 6N_{\text{выб}}, m) \\ \dots \\ q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(l, 2(N_{\text{ВЗН}} - 1)N_{\text{выб}}, m) \\ q_{\text{ВЗН}}^{\text{рег}}(l, 2(N_{\text{ВЗН}} - 1)N_{\text{выб}} + 1, m) \end{pmatrix}$$

Рис. 13. Матрица оператора ВЗН-преобразования (слева), столбец входных сигналов (по центру) и столбец зарядов на емкостях ВЗН-регистра (справа).

После ВЗН-суммирования осуществляется коммутация сигналов с каждого ВЗН-канала на один или несколько выходов. Для примера предположим, что сигналы с каждой из четырех субматриц топологии, представленной на рис. 5 (слева), коммутируются последовательно на один выход. Пронумеруем каналы четырех субматриц

как $l_{11} \dots l_{1/l_{\max}}; l_{21} \dots l_{2/l_{\max}}; l_{31} \dots l_{3/l_{\max}}; l_{41} \dots l_{4/l_{\max}}$, где первый индекс соответствует номеру субматрицы, а второй индекс – номеру канала внутри субматрицы, $l_{1/l_{\max}} + l_{2/l_{\max}} + l_{3/l_{\max}} + l_{4/l_{\max}} = L_{\max}$. Объединим информацию со всех каналов, полученную за кадр, в матрицу $(U_{\text{ВЗН}})'$ размерности $M \times L_{\max}$, представленную на рис. 14.

$$(U_{\text{ВЗН}})' = \begin{pmatrix} U_{\text{ВЗН}}(l_{11},1)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{1/l_{\max}},1)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{21},1)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{2/l_{\max}},1)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{4/l_{\max}},1)' \\ U_{\text{ВЗН}}(l_{11},2)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{1/l_{\max}},2)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{21},2)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{2/l_{\max}},2)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{4/l_{\max}},2)' \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{\text{ВЗН}}(l_{11},m)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{1/l_{\max}},m)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{21},m)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{2/l_{\max}},m)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{4/l_{\max}},m)' \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{\text{ВЗН}}(l_{11},M)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{1/l_{\max}},M)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{21},M)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{2/l_{\max}},M)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{4/l_{\max}},M)' \end{pmatrix}$$

Рис. 14. Матрица ВЗН-сигналов до коммутации.

Предположим, что все сигналы коммутируются на один выход. Матрица $(u_{\text{ком}})$ оператора коммутации размерности $L_{\max} \times L_{\max}$ для такого слу-

чая представлена на рис. 15. Результат коммутации $(U_{\text{ком}})$ показан на рис. 16.

$$(u_{\text{ком}}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}$$

Рис. 15. Матрица оператора коммутации.

$$(U_{\text{ком}}) = \begin{pmatrix} U_{\text{ВЗН}}(l_{11},1)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{21},1)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{31},1)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{41},1)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{4/l_{\max}},1)' \\ U_{\text{ВЗН}}(l_{11},2)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{21},2)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{31},2)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{41},2)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{4/l_{\max}},2)' \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ U_{\text{ВЗН}}(l_{11},M)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{21},M)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{31},M)' & U_{\text{ВЗН}}(l_{31},M)' & \dots & U_{\text{ВЗН}}(l_{31},M)' \end{pmatrix}$$

Рис. 16. Матрица ВЗН-сигналов после коммутации.

Информация, содержащаяся в каждой строке матрицы $(U_{\text{ком}})$ выводится последовательно за время $T_{\text{стр}}$ (см. рис. 9) на частоте $L_{\max}/T_{\text{стр}}$. Если коммутация производится на несколько выходов БИС, то матрица сигналов $(U_{\text{ком}})_p$, соответствующая выводу p , вычисляется как произведение матриц $(U_{\text{ВЗН}})'$ с соответствующей ей матрицей $(u_{\text{ком}})_p$.

$$(U_{\text{ком}})_p = (U_{\text{ВЗН}})' \times (u_{\text{ком}})_p \quad (40)$$

Дальнейшее преобразование аналоговых сигналов внутри БИС осуществляют выходные усилители с коэффициентом передачи $K_{\text{вых}}$ и частотной передаточной функцией $W_{\text{вых}}(f)$. Объединим все строки $(U_{\text{ком}})_p$ последовательно в одну строку и получим $(U_{\text{ком}}^1)_p$, тогда выражение для сигналов на p -м выходе БИС будут определяться следующим образом:

$$(U_{\text{БИС}})_p = F^{-1}[W_{\text{вых}}(f) \times \times F \left[K_{\text{вых}} \times (U_{\text{ком}}^1)_p \right] + (U_{\text{БИСпост}})], \quad (41)$$

где F и F^{-1} – прямое и обратное преобразования Фурье соответственно, $(U_{\text{БИСпост}})$ – постоянные составляющие сигналов, формируемые выходным каскадом БИС.

Блок сопряжения в модели описывается аналогичным (41) выражением с учетом коэффициента передачи $K_{\text{БС}}$ и частотной передаточной функции $W_{\text{БС}}(f)$. Внутри блока сопряжения может быть расположен высокочастотный фильтр, устраняющий постоянную составляющую БИС и «привязывающий» постоянную составляющую сигналов на выходе к уровню $U_{\text{БСпост}}$.

Распространенным эффектом, наблюдаемым в ФПУ, является взаимное влияние сигналов, соответствующих одному выходу, после коммутации, что может быть вызвано несогласованностью частотных характеристик различных участков элек-

$$n_{\text{вых_БС}}(l) = \sqrt{\left(K_{\text{БС}} K_{\text{вых}} K_{\text{ш_ВЗН}} K_{\text{яч}} \sqrt{U_{\text{ш_нак}}^2} \right)^2 + \left(K_{\text{БС}} K_{\text{вых}} \sqrt{U_{\text{ш_ВЗН}}^2} \right)^2 + \left(K_{\text{БС}} \sqrt{U_{\text{ш_вых}}^2} \right)^2 + \left(\sqrt{U_{\text{ш_БС}}^2} \right)^2}, \quad (42)$$

где $K_{\text{ш_ВЗН}}$ – коэффициент передачи шума схемой ВЗН-суммирования; $\sqrt{U_{\text{ш_нак}}^2}$ – шум фотодиода и входного каскада, приведенные к заряду на накопительной емкости; $\sqrt{U_{\text{ш_ВЗН}}^2}$ – собственный шум схемы ВЗН-суммирования; $\sqrt{U_{\text{ш_вых}}^2}$ – собственный шум выходного каскада БИС; $\sqrt{U_{\text{ш_БС}}^2}$ – собственный шум электронного усилительного тракта блока сопряжения.

При согласованной фильтрации значения шума на выходе блока сопряжения $n_{\text{вых_БС}}(l)$ суммируются с учетом коэффициентов маски фильтра (см. рис. 4) по закону сложения случайных величин.

Шумы современных многоэлементных фотоприемных устройств часто определяются шумами фотодиода и накопительной ячейки. Основными шумами фотодиода являются дробовой, равный $\sqrt{eI_{\text{вх}}(l,r)T_{\text{нак}}}$ [Кл] [18] и тепловой, равный $\sqrt{2kTT_{\text{нак}}/R_{\text{фд}}}$ [Кл] [18], где T – температура ФЧЭ; k – постоянная Больцмана ($1,381 \times 10^{-23}$ Дж/К); $R_{\text{фд}}$ – дифференциальное сопротивление ФЧЭ. Помимо дробового и теплового шумов фотодиода, на значения пороговых характеристик прибора суще-

ственного влияния могут оказывать шумы сброса (kTC) и широкополосный шум входного усилителя. Интегральное значение шума сброса [Кл] схемы с трансимпедансным усилителем, широко применяемым в ФПУ для низкофоновом режиме работы (при фототоках порядка 10^{-15} – 10^{-12} А), определяется выражением из работы [17]:

$$\sqrt{q_{\text{транс}}^2} = \sqrt{kT \left(C_{\text{нак}} + \frac{C_{\text{нак}} C_{\text{н}}}{C_{\text{н}} + C_{\text{вх}} + C_{\text{нак}}} + \frac{\gamma \alpha C_{\text{вх}}^2}{C_{\text{н}} + C_{\text{вх}} + C_{\text{нак}}} \right)}, \quad (43)$$

где T – температура БИС [К]; $C_{\text{вх}}$ – входная емкость [Ф], включающая в себя емкость фотодиода, усилителя и паразитные емкости; $C_{\text{н}}$ – емкость нагрузки усилителя; γ, α – технологические параметры усилителя.

Выражение (43) приведено для однополярного трансимпедансного усилителя. В случае дифференциального усилителя перед третьим слагаемым в выражении (43) необходимо подставить множитель, равный $\sqrt{2}$.

Для устранения шума сброса (reset noise) применяют процедуру двойной коррелированной выборки (ДКВ), заключающуюся в считывании двух значений сигналов: в начале цикла накопления и в конце и нахождении их разности. В ре-

зультате образуется фильтр верхних частот для шума, постоянная же составляющая фотосигнала беспрепятственно проходит через схему ДКВ. Однако реализация данной схемы требует дополнительного места внутри накопительной ячейки и применяется не во всех случаях. Следует также отметить, что шум усилителя продолжает передаваться на накопительную емкость в процессе накопления и, соответственно, присутствует в выходном сигнале ячейки даже при наличии процедуры ДКВ. Для снижения шума усилителя необходимо уменьшать его спектральную полосу, увеличивая C_n , что, однако, может привести к неустойчивости входного усилителя. При больших (10^{-10} – 10^{-6} А) и средних (10^{-12} – 10^{-10} А) фототоках применяют схемы с прямой и буферной прямой инжекцией соответственно. В работе [17] приведен анализ литературных источников, на основании которого можно сделать вывод, что доминирующую роль в картине шумов входных ячеек БИС с прямой инжекцией и буферной прямой инжекцией, как правило, играют шумы сброса накопительной емкости. Широкополосный шум в данных схемах проявляется в меньшей степени, чем в трансимпедансном усилителе. Также авторами текущей работы был проведен эксперимент по измерению собственных шумов БИС считывания фотоприемного модуля формата 1024×10 с буферной прямой инжекцией во входных ячейках. Результаты эксперимента отражены в [20], где показано, что измеренное полное значение шума БИС совпадает с расчетным значением шума $kTC_{\text{нак}}$, приведенным к выходу БИС, с точностью 8 %.

Таким образом, в рамках математической модели принято, что шумы сброса во входных ячейках с трансимпедансным усилителем определяются выражением (43), а с буферной прямой инжекцией и прямой инжекцией – первым слагаемым в выражении (43), что приемлемо для оценки параметров большинства современных сканирующих ИК ФПУ. При необходимости шум входной ячейки также может быть рассчитан точно в соответствующей схемотехнической САПР, либо определен экспериментально и передан в модель в качестве входного параметра.

Значениями шумов схемы ВЗН-суммирования, выходного каскада БИС, блока сопряжения грамотно спроектированного и качественно изготовленного прибора можно пренебречь, в ином случае значения данных шумов оцениваются при моделировании в САПР либо определяются экспериментально.

Шумы вида $1/f$ фотодиодных структур (не дефектных) и электроники вносят незначительный относительный вклад при расчете интегральных шумов современных сканирующих ФПУ при временах накопления 200–600 мкс. К примеру, в работе

[19] представлены характеристики спектральной плотности мощности шума сканирующего ФПУ с фотодиодами на основе InSb. В результате интегрирования данных характеристик в рабочей полосе частот ФПУ было получено, что вклад $1/f$ -шумов в интегральное значение шума не превышает 5 %. Также в работе [19] показано, что шумы вида $1/f$ оказывают влияние на результирующее отношение сигнал/шум только при количестве каскадов ВЗН, большем 32. Исследование шумов фотоприемного устройства с ФЧЭ на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (с граничной длиной волны $\lambda_{\text{гр}} \approx 3,1$ мкм при температуре фоточувствительного слоя 170 К) с режимом ВЗН по 10 элементам в «холодной зоне», проведенное авторами текущей работы, показало, что вклад $1/f$ -шумов при измерении фотоэлектрических параметров в рабочей полосе частот ФПУ не превышает 3 %. Поэтому в рамках математической модели крупноформатного ИК ФПУ шумы вида $1/f$ не учитываются.

Заключение

Для сложных оптико-электронных систем, таких как сканирующие крупноформатные ИК ФПУ, осуществляющие регистрацию малоразмерных объектов, точный расчет фотоэлектрических параметров требует подробного описания процессов на каждом этапе преобразования сигналов, что обуславливает необходимость использования специализированных математических моделей. В данной работе представлена такая модель, позволяющая прогнозировать параметры ФПУ с учетом погрешностей установки отдельных фотоприемных модулей, паразитной засветки фоточувствительного слоя, шумов оптико-электронного тракта, взаимного влияния сигналов внутри ФПУ, разброса чувствительности и темновых токов фоточувствительных элементов (ФЧЭ), недостатков схемы ВЗН-суммирования и т. д. В модели также реализована возможность моделирования сигналов ФЧЭ, работающих в режиме с адаптивным временем накопления.

Следует отметить, что в реальных изделиях могут проявляться такие эффекты, как нелинейности передаточной характеристики вблизи границ динамического диапазона, отклонение формы импульсной характеристики от теоретически рассчитанной, наличие эффекта автогенерации в электронных схемах при некоторых комбинациях питающих БИС напряжений, приводящей к существенному возрастанию шумов, и т. п. Таким образом, помимо прогнозирования параметров, представленная в работе модель позволяет количественно оценить качество разработанного изделия путем сравнения экспериментальных и

теоретических характеристик, выявить неудачные решения и обнаружить ошибки, допущенные при проектировании или изготовлении.

Следующая статья будет посвящена практическим применениям математической модели – результатам прогнозирования параметров крупноформатных ИК ФПУ, работающих в различных спектральных диапазонах.

Особую благодарность авторский коллектив выражает сотруднику ИАиЭ СО РАН к.т.н. Косых Валерию Петровичу за ценные замечания по работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cota S. A., Lomheim T. S., Florio C. J., Harbold J. M., V. Muto M., Schoolar R. B., Wintz D. T., Keller R. A. // *Imaging Spectrometry XVI*. 2011. Vol. 8158.
2. Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Корнеева М. Д., Шабаров В. В. // *Прикладная физика*. 2014. № 1. С. 38.
3. Бурлаков И. Д., Козлов К. В., Патрашин А. И., Соляков В. Н., Филачев А. М. // *Успехи прикладной физики*. 2016. Т. 4. № 4. С. 385.
4. Шювенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010.
5. Cooke B. J., Laubscher B. E., Borel C. C. // *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing VII*. 1996. Vol. 2743. P. 52.
6. Громилини Г. И., Иванов В. А., Косых В. П., Попов С. А. // *Вычислительные технологии*. 2016. Т. 21. № 1 С. 60.
7. Козлов К. В., Соляков В. Н., Кузнецов П. А., Полеский А. В., Хамидуллин К. А., Семенченко Н. А., Бедарева Е. А. // *Успехи прикладной физики*. 2014. Т. 2. № 5. С. 528.
8. Соляков В. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А. // *Прикладная физика*. 2014. № 2. С. 54.
9. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // *Успехи прикладной физики*. 2015. Т. 3. № 1. С. 71.
10. Кузнецов П. А., Моцев И. С. // *Прикладная физика*. 2015. № 5. С. 107.
11. Кузнецов П. А., Моцев И. С., Хромов С. С. // *Успехи прикладной физики*. 2013. Т. 1. № 5. С. 606.
12. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978.
13. Nanyoung Yoon, Byunghyuck Kim, Hee Chul Lee, Hyungcheol Shin, Choong-Ki Kim. // *Infrared Technology and Applications XXIII*, 1997. Vol. 3061. P. 93.
14. Ando K. J. / Proc. Symp. On Charge-Coupled Device Technol. For Sci. Imaging Appl. 1975. No. 75-28841. P. 192.
15. Дрожников Б. Н., Козлов К. В., Кузнецов П. А., Соляков В. Н. // *Успехи прикладной физики*. 2015. Т. 3. № 6. С. 566.
16. Kendrick S. E., Harwit A., Kaplan M., Smythe W. D. // *Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XV*. 2007. Vol. 6678.
17. Козлов К. В., Патрашин А. И., Бурлаков И. Д., Бычковский Я. С., Дрожников Б. Н., Кузнецов П. А. // *Успехи прикладной физики*. 2017. Т. 5. № 1. С. 63.
18. Кузнецов П. А., Хромов С. С. // *Прикладная физика*. 2013. № 4. С. 12.
19. Чижко В. Ф., Касаткин И. Л., Бурлаков И. Д., Лопухин А. А., Пономаренко В. П., Филачев А. М. // *Прикладная физика*. 2007. № 2. С. 64.
20. Бочков В. Д., Дрожников Б. Н., Кузнецов П. А., Козлов К. В., Соляков В. Н. // *Прикладная физика*. 2014. № 1. С. 53.

PACS: 42.79.Sz, 85.30.-Z

Mathematical model of the infrared large-format TDI FPA

K. V. Kozlov^{1,2}, A. I. Patrashin¹, and V. A. Streltsov^{1,2}

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 Institute al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received March 3, 2017

Consideration is given to a mathematical model of an optical and electrical route of the large-format infrared (IR) focal plane array (FPA) with time delay integration (TDI), intended for small targets detection. Using this model, one can obtain images at the output of FPA with more than 10000 TDI channels and predict characteristics of such devices, taking into account the installation errors for individual photosensitive modules, parasitic illumination, noise of a photodetector and electrical scheme, the type of TDI summation scheme, adoptive integration time etc. The TDI FPA model contains four main parts: an analytical model of irradiance (AMI), which can be used to calculate the radiation distribution in focal plane; an analytical signal model (ASM), in which the optical and electrical path is described by the product of transfer functions; an imitational signals model (ISM),

which contains the detailed description of real TDI FPAs; an analytical model of noise (AMN), which makes possible to calculate the noise of FPA with different types of a multiplexor.

Keywords: TDI, photosensitive element, FPA, remote sensing, small target.

REFERENCES

1. S. A. Cota, T. S. Lomheim, C. J. Florio, J. M. Harbold, B. Muto M., R. B. Schoolar, D. T. Wintz, R. A. Keller. *Imaging Spectrometry XVI*. **8158**, (2011).
2. A. I. Patrashin, I. D. Burlakov, M. D. Korneeva, and V. V. Shabarov, *Prikl. Fiz.* No. 1, 38 (2014).
3. I. D. Burlakov, K. V. Kozlov, A. I. Patrashin, V. N. Solyakov, A. M. Filachev, *Usp. Prikl. Fiz.* **4** (4), 385 (2016).
4. R. A. Schowengerdt, *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. (Academic Press, 2007).
5. B. J. Cooke, B. E. Laubscher, C. C. Borel. *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing VII*. **2743**, 52 (1996).
6. G. I. Gromilin, V. A. Ivanov, V. P. Kosyh, S. A. Popov, *Computational technologies*. **21** (1), 60 (2016).
7. K. V. Kozlov, V. N. Solyakov, P. A. Kyznetsov, A. V. Polesky, K. A. Hamidullin, N. A. Semenhenko, E. A. Bedareva, *Usp. Prikl. Fiz.* **2** (5), 528 (2014).
8. V. N. Solyakov, K. V. Kozlov, P. A. Kyznetsov, *Prikl. Fiz.* No. 2, 54 (2014).
9. P. A. Kyznetsov and I. S. Moshchev, *Usp. Prikl. Fiz.*, **3** (1), 71 (2015).
10. P. A. Kyznetsov and I. S. Moshchev, *Prikl. Fiz.* No. 5, 107 (2015).
11. P. A. Kyznetsov, I. S. Moshchev and S. S. Khromov, *Usp. Prikl. Fiz.*, **1** (5), 606 (2013).
12. J. M. Lloyd *Thermal imaging systems* (Plenum press, New York and London, 1975).
13. Nanyoung Yoon, Byunghyuck Kim, Hee Chul Lee, Hyungcheol Shin, Choong-Ki Kim. // *Infrared Technology and Applications XXIII*. **3061**, 93 (1997).
14. K. J. Ando / *Proc. Symp. On Charge-Coupled Device Technol. For Sci. Imaging Appl.* 1975. No. 75-28841. P. 192.
15. B. N. Drajnikov, K. V. Kozlov, P. A. Kyznetsov, V. N. Solyakov, *Usp. Prikl. Fiz.* **3** (6), 566 (2015).
16. S. E. Kendrick, A. Harwit, M. Kaplan, W. D. Smythe. *Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XV*. **6678** (2007).
17. K. V. Kozlov, A. I. Patrashin, I. D. Byrlakov, Y. S. Bychkovsky, B. N. Drajnikov, P. A. Kyznetsov, *Usp. Prikl. Fiz.* **5** (1), 63 (2017).
18. P. A. Kyznetsov, S. S. Chromov, *Prikl. Fiz.* No. 4, 12 (2013).
19. V. F. Chishko, I. L. Kasatkin, I. D. Byrlakov, A. A. Lopuhin, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev, *Prikl. Fiz.* No. 2, 64 (2007).
20. V. D. Bochkov, B. N. Drazhnikov, P. A. Kyznetsov, K. V. Kozlov, and V. N. Solyakov, *Prikl. Fiz.* No. 1, 53 (2014).