

УДК 621.383.4/5

Программная модель преобразований изображения в ИК ВЗН-системах и ее применение для оптимизации ВЗН-фотоприемников

С. В. Орлов

Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Московская обл.

Ю. Р. Винецкий

Государственное унитарное предприятие «НПО «Орион»», Москва, Россия

Создана программная модель, позволяющая проследить влияние различных физических процессов, происходящих в оптико-электронном тракте системы с ВЗН-фотоприемником, на исходное изображение. Модель предназначена для использования разработчиками ВЗН-систем в качестве инструмента оптимизации конструкции фотоприемников и входных устройств. Достоинства модели наиболее ярко проявляются в случае моделирования системы с фотоприемником сложной топологии, а также в случае «неидеального» движения изображения в фокальной плоскости системы. С помощью созданной программы осуществлялось моделирование системы на основе ВЗН-фотодетектора в спектральном диапазоне 3—5 мкм.

В последнее время системы с фотоприемниками (ФП) на основе принципа временной задержки накопления (ВЗН) [1] заменяют в различных областях более традиционные фотоприемники с линейной топологией. Например, интерес представляет использование вместо линейного ВЗН-фотоприемника в системах дистанционного зондирования и картографирования поверхности Земли, где развертка изображения в фокальной плоскости может осуществляться естественным путем за счет движения летательного аппарата, вследствие чего отпадает необходимость в использовании сканирующей системы. По сравнению с линейными фотоприемниками ВЗН-системы обладают двумя очевидными преимуществами — большей надежностью беспропускной регистрации элементов изображения и улучшенным отношением сигнал/шум. В то же время последнее преимущество ощутимо в полной мере только в случае идеальной синхронизации между движением изображения, с одной стороны, и темпом суммирования, а также пространственной «привязкой» суммируемых откликов к элементам фотоприемника — с другой. В классической схеме реализации ВЗН-приемника с помощью ПЗС-регистров сдвига с внутренним суммированием упомянутая синхронизация достигается лишь в весьма ограниченном круге ситуаций, когда вектор движения изображения строго постоянен и параллелен направлению «столбцов» фотоприемника, осуществляющих перенос заряда. На практике такая ситуация встречается достаточно редко [2, 3]. Для устранения этого недостатка можно предложить раздельно считывать данные с каждой «строки» фотоприемника и суммировать отклики от соответствующих независимых элементов ФП, лежащих на траектории движения изображения в фокальной плоскости.

Предполагается, что для решения этой задачи будет использован внешний цифровой процессор и что удастся получить хороший результат даже в случае

непараллельности траекторий движения изображения и "столбцов" ФП. Структура подобного ФП, в настоящий момент разрабатываемого в «НПО «Орион»», схематично показана на рис. 1, а—г. Возможные траектории движения изображения в плоскости ФП показаны на рис. 1, д—ж. Поскольку вектор скорости движения изображения может меняться во времени и априорная информация о характере подобных изменений может отсутствовать, очевидно, что для реконструкции изображения по выходным данным ВЗН-системы необходимо использовать адаптивный алгоритм.

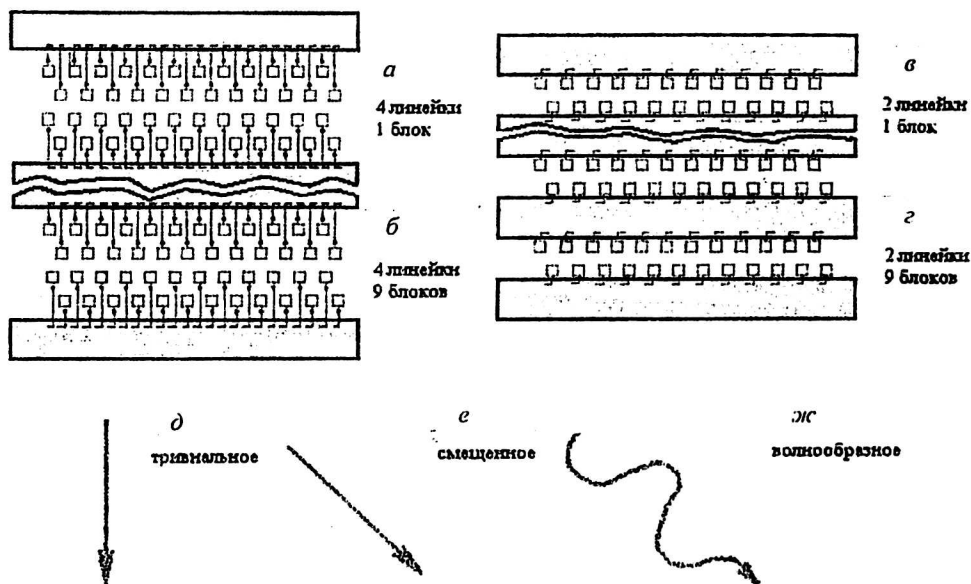


Рис. 1. Варианты топологии ФП (а—г) и типы движения изображения (д—ж)

Таким образом, создание подобного алгоритма становится нетривиальной задачей, связанной с конструкцией конкретного ФП.

Для оптимизации структуры ФП необходимо наличие расчетных средств, количественно характеризующих проектируемую систему. Для описанной выше системы с относительно сложной организацией ФП и предназначенной для работы, в том числе в ситуациях неидеального движения изображения, традиционные аналитические методы вычисления характеристик системы становятся слишком громоздкими и запутанными. Их применение возможно только в ограниченном наборе ситуаций либо для относительно грубых, качественных оценок.

В данной работе применен альтернативный подход [3, 4]. Нами была разработана имитационная модель (рис. 2), представляющая различные физические процессы при преобразованиях сигнала каждой системной компонентой. Модель, по нашему мнению, является удобным инструментом для разработчиков ВЗН-систем, позволяет "проигрывать" варианты и оптимизировать систему до ее физической реализации. Кроме того, созданная модель является составной частью более общей, разрабатываемой в настоящее время программы анализа эффективности различных алгоритмов реконструкции изображения по ВЗН-откликам.

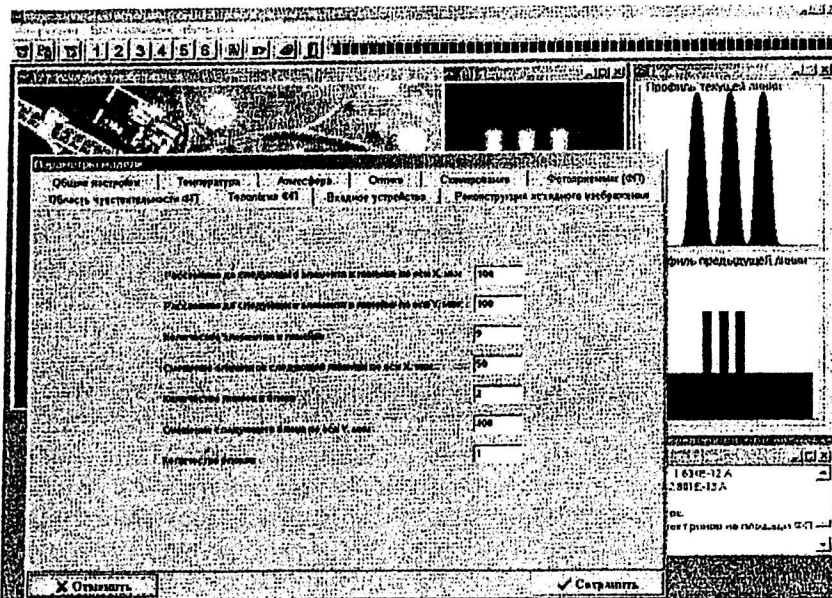


Рис. 2. Окно настроек модели

Структура модели

Программа состоит из нескольких последовательно обрабатываемых блоков, отвечающих различным физическим процессам. Каждый блок воздействует на изображение, полученное от предыдущего блока, и изменяет его в соответствии с моделируемым процессом. Результирующее изображение представляет собой набор пикселей, получаемых на выходе ВЗН-матрицы. В процессе работы пользователь системы может изменить параметры обработки, перерассчитать произвольный блок модели и сравнить полученный результат с предыдущим. В окне информации о протекающих процессах можно увидеть параметры текущего блока, а также результаты обработки изображения в данном блоке.

Модель состоит из следующих блоков:

Блок ввода исходного изображения. Предназначен для ввода исходного изображения в модель, а также для ввода обработанных и сохраненных ранее изображений во внутреннем формате модели. Исходное изображение представляет собой стандартный графический файл формата "TIFF" с 256 оттенками серого цвета. В процессе ввода исходное изображение конвертируется во внутренний формат. Все графические данные модели содержатся во внутреннем формате, содержащем информацию о разрешении исходного изображения, параметрах преобразования данных и набор 64-битовых положительных чисел, что является гарантией достаточной точности всех производимых вычислений.

Блок формирования потока квантов. Устанавливает соответствие между яркостью точки исходного изображения и определенной температурой. По значению температуры определяется поток квантов в данной точке. Пользователь модели может по своему усмотрению задать диапазоны длин волн и температур, а также спектральную чувствительность атмосферы, оптики и ФП в избранном диапазоне. Результатом работы блока является набор данных, содержащий потоки квантов для каждой точки исходного изображения.

Блок учета оптики. Предназначен для учета характеристики рассеяния точки оптической системы. Пользователь системы может изменить характеристическую длину рассеяния. В результате действия блока изображение “размывается”.

Блок учета характера движения изображения. Моделирует два типа неидеального движения изображения относительно ФП. Первый тип неидеального движения представляет собой движение “с перекосом”, когда вектор скорости движения не совпадает с направлением столбцов сканирующей матрицы. Другой тип неидеального движения — это “дрожание” изображения, когда вектор движения изображения периодически отклоняется от своего первоначального направления (см. рис. 1, е). Пользователь может контролировать оба этих эффекта путем указания тангенса вектора скорости движения относительно столбцов матрицы, частоты синусоидальных отклонений и их амплитуды.

Блок фотодетектора. Предназначен для моделирования преобразования падающего квантового потока в электрический ток на выходе каждого фоточувствительного элемента. При этом учитываются квантовая эффективность, апертурная характеристика ФП (в том числе эффект периферической чувствительности фоточувствительных элементов), расположение апертур ФП в фокальной плоскости. Чувствительность фоточувствительного элемента в его внутренней области и за пределами его геометрических границ задается в модели с помощью матрицы, которая сохраняется в настройках модели и может быть использована для анализа других изображений. Элементы матрицы чувствительности могут быть изменены произвольным образом, что позволяет смоделировать различные апертурные эффекты, например эффект взаимного влияния соседних апертур ФП. Топология ФП гибко задается с помощью большого набора параметров, что дает возможность моделировать ФП, состоящие из одной линейки апертур, набора “смещенных” линеек, блоков из “смещенных” линеек и т. д. (см. рис. 1). Параметры топологии ФП также сохраняются в настройках модели для дальнейшего использования. Результатом действия блока является набор данных, представляющий электрический ток, поступающий от каждого фоточувствительного элемента. Следует отметить, что вследствие сложности и универсальности алгоритма сканирования изображения фотоприемниками различной топологии, скорость работы текущего блока достаточно мала (например, требуется около 30 мин для прохождения блока с ФП из четырех линий и девяти блоков по изображению размером 400 на 400 точек). Этот недостаток предполагается исправить модификацией алгоритма в сторону большей машинной ориентированности.

Блок генерации шума. Предназначен для учета возможных источников шумов в электронно-оптическом тракте моделируемых систем, а именно, фонового шума, темнового и избыточного шумов фотодетектора, шума ввода заряда, шума переноса в регистре сдвига и шума считывания во входном устройстве. Темновой шум фотодетектора зависит от его конструкции и задается в настройках модели. Фоновый шум вычисляется на основе электрических токов на выходе ФП, полученных в предыдущем блоке.

Блок входного устройства. В этом блоке моделируются эффекты инерционности ввода [5] и накопления заряда во входном устройстве. Пользователь может изменять удельную емкость, паразитную емкость, емкость входного устройства, подпороговый коэффициент, рабочую температуру входного устройства.

Блок реконструкции исходного изображения. Предназначен для воссоздания исходного изображения по многочисленным изображениям, полученным от всех фоточувствительных элементов ФП. В настоящее время реализована

только тривиальная реконструкция изображения, т. е. суммирование с задержкой сигналов от вертикально перемещаемых апертур фотодетектора. В дальнейшем предполагается разработать более сложные алгоритмы реконструкции исходного изображения, компенсирующие эффекты "перекоса" и "дрожания" изображения.

Блок анализа изображения. Результатом моделирования является изображение, полученное из исходного после прохождения всех блоков модели. Специальный блок анализа позволяет вычислить такие количественные характеристики результирующего изображения, как контраст и функция передачи модуляции, минимально разрешимая разность температур и т. д. В процессе анализа результирующего изображения пользователь выбирает две точки на изображении для вычисления в пределах образованного прямоугольника фона и шума, затем еще две точки для вычисления сигнала. Используя выделенные области, блок анализа вычисляет контраст и функцию передачи модуляции (ФПМ) в указанном направлении для исходного изображения, изображения после прохождения оптического тракта и результирующего изображения. Затем блок анализа вычисляет сигнал, фон и шум для указанных областей, отношение сигнал/шум и сигнал/фон. После этого блок оценивает минимально разрешимую разность температур. Пользователь имеет возможность построить профили интенсивности по произвольной горизонтали и вертикали результирующего изображения.

Основные характеристики и достоинства модели

Основные характеристики программы

Созданная модель обладает следующими основными чертами и характеристиками:

- диапазон длин волн — произвольный (SWIR, MWIR, LWIR);
- минимальный шаг приращения длины волны — 0,01 мкм;
- температурный диапазон — произвольный;
- минимальная обрабатываемая разность температур — 0,001 К;
- размерность матрицы спектральной чувствительности — динамическая (зависит от диапазона и шага длины волны);
 - размерность матрицы оптического рассеяния точки — 21x21;
 - скорость сканирования — произвольная;
 - возможные типы движения изображения — идеальное, с произвольным перекосом, волнообразное и любые их комбинации;
 - расстояние между соседними точками в фокальной плоскости — произвольное;
 - размер матрицы чувствительности апертуры фотоприемника — динамический (зависит от размера апертуры и расстояния между соседними точками);
 - точность вычисления тока и заряда — 0,1 %;
 - варианты задания топологии ФП — от простой линейки до линеек и блоков линеек апертур;
 - скорость вычисления (400x400 изображение, две линейки один блок ФП, Pentium 200) — ~10 мин;
 - механизм вычислений по всем блокам — в "одно касание".

Программная реализация модели нетребовательна к аппаратным ресурсам вычислительной машины: для успешного функционирования достаточно пер-

сонального компьютера типа Pentium, 32 МВ оперативной памяти; Windows 95 и выше; монитор с разрешением не менее 800x600 точек при цветовой глубине 16 бит на точку.

Как уже было отмечено, скорость вычисления блоков модели в настоящий момент не оптимизирована и сильно зависит от размеров исходного изображения и сложности топологии ФП. Для исходного изображения размером 400x400 точек и фотодетектора, состоящего из двух линеек по 16 элементов в виде одного блока, весь цикл вычислений занимает около 10 мин на компьютере с процессором Pentium 200.

Достоинства модели

Перечислим основные достоинства представленной модели.

1. Разработчик ВЗН-систем имеет возможность проследить влияние каждого элемента оптико-электронного тракта на результирующее изображение. Исходное изображение, промежуточные изображения модели, результирующее изображение — все это картинки на мониторе вычислительной машины. Поэтому очень удобно наблюдать последствия изменения какого-либо параметра системы. Пользователь имеет возможность сохранить полученные изображения в стандартных графических файлах формата "TIFF" и использовать их для анализа внешними программами.

2. Модель обладает большим числом изменяемых параметров. Пользователь получает доступ к ним по однократному нажатию кнопки мыши, может изменить необходимые параметры и сохранить полученную конфигурацию в отдельном файле настроек. Этот набор параметров может быть в дальнейшем применен для анализа различных изображений.

3. Программная реализация модели построена по блочному принципу. Это означает, что каждый блок модели является независимым от других блоков и может быть легко изменен или дополнен при необходимости. Добавление или удаление блока модели является довольно простой процедурой. Кроме того, модель имеет удобный механизм вычислений "в одно касание": пользователю достаточно выбрать исходное изображение и нажать всего лишь одну кнопку для того, чтобы смоделировать прохождение указанного изображения через все блоки модели.

4. Модель проста, удобна, имеет интуитивно понятный Windows интерфейс. Все функциональные кнопки продублированы в меню программы, существует прогресс-индикатор длительных операций и т. д.

Достоинства модели наиболее полно проявляются в случае анализа сложных движений изображения (например, когда вектор движения изображения не совпадает с направлением столбцов апертур ФП, что имеет место в реальных ВЗН-системах) и в случае сложной организации топологии ФП. В этих случаях пользователь имеет возможность применить различный набор параметров к одному и тому же изображению и оценить влияние каждого из них на качество результирующего изображения.

Результаты тестирования

Для подтверждения корректности вычислений разработанной модели был проведен ряд тестов. В качестве контролирующего метода было избрано сравнение параметров результирующего изображения, полученных в результате моделирования, с параметрами, полученными путем традиционного аналитического расчета при определенных условиях, когда подобное сравнение возможно.

Ниже приведен список оцениваемых параметров:

темновой и фоновый токи (заряды) ФП;

контраст результирующего изображения (при использовании стандартной трехшпальной тестовой миры с двумя температурными значениями и различной пространственной частотой линий, вертикально и горизонтально ориентированных);

шум, отношение сигнал/шум, сигнал/фон по результирующему изображению;

функция передачи модуляции (ФПМ) в направлении оси X (по строкам) и Y (по столбцам апертур фотоприемника).

Следующие параметры являлись общими для всех проводимых тестов:

диапазон длин волн — 2,6–5,7 мкм;

шаг длины волны — 0,1 мкм;

температурный диапазон — 295–300 К;

скорость сканирования — 20 мм/с;

размер одной апертуры (ФП) — 50 мкм;

расстояние между соседними точками в фокальной плоскости — 5 мкм;

время накопления — 2,5 мс;

темновой ток — 30 пА;

характеристическая длина периферической чувствительности — 10 мкм;

расстояние между соседними апертурами по оси X — 100 мкм;

расстояние между соседними апертурами по оси Y — 100 мкм;

расстояние между блоками по оси Y — 400 мкм;

рабочая температура входного устройства — 80 К;

суммарная емкость фотоприемника и входного устройства — 1 пФ;

размерность исходного изображения — 220x380 точек;

пространственная частота линий исходного изображения — 5 линий/мм.

Во всех проведенных тестах численные результаты моделирования находятся в соответствии с данными, полученными аналитическим путем, в пределах точности вычислений. Для сравнения и оценки функционирования модели использовались следующие тесты.

Влияние топологии фотоприемника

Основные параметры моделируемой системы:

фоновая температура — 292,8 К;

сигнальная температура — 293,3 К;

сумма фонового и темнового токов — 44 пА;

суммарная емкость — 2 пФ.

Топология ФП первой моделируемой системы представлена на рис. 1, б. Фоточувствительные элементы ФП первой системы организованы в виде одного, а второй системы — в виде девяти блоков, состоящих из двух линеек. Топология второй системы изображена на рис. 1, г.

Результаты моделирования показаны на рис. 3, а–г.

В результате моделирования первой системы (см. рис 1, в) были получены следующие результаты (см. рис. 3):

сигнал/шум — 88;

сигнал/фон — 0,01;

контраст в направлении оси X — 0,044;

контраст в направлении оси Y — 0,039;

ФПМ в направлении оси X — 0,37;

ФПМ в направлении оси Y — 0,33.

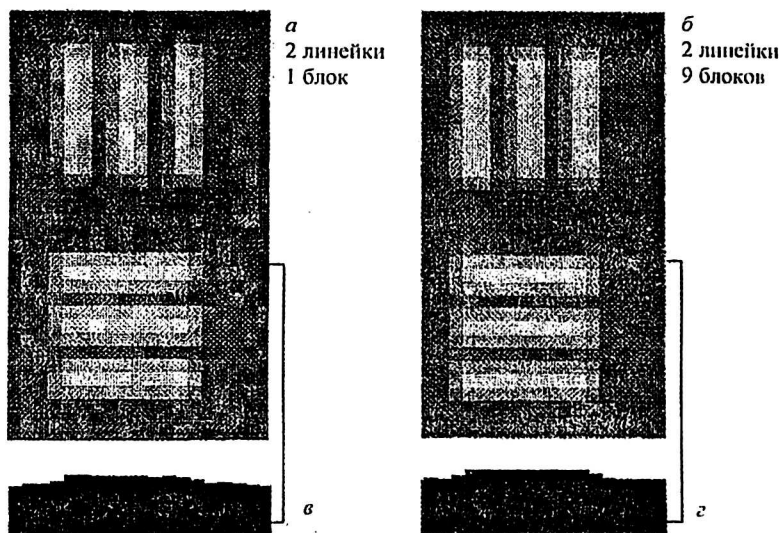


Рис. 3. Влияние топологии фотоприемника (а—б) и профили яркости изображения (в—г)

Для второй моделируемой системы (см. рис 1, г) были получены следующие результаты (см. рис. 3, б):

сигнал/шум — 245;

сигнал/фон — 0,01;

контраст в направлении оси X — 0,042;

контраст в направлении оси Y — 0,040;

ФПМ в направлении оси X — 0,35;

ФПМ в направлении оси Y — 0,34;

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что отношение сигнал/шум для системы с фотоприемником из девяти блоков приблизительно в 3 раза лучше, чем для системы с одним блоком апертур. Это соответствует теории шума, согласно которой отношение сигнал/шум должно быть пропорционально квадратному корню от количества блоков в системе. Улучшение отношения сигнал/шум можно наглядно проследить при сравнении профилей яркости изображений на рис. 3, в и рис. 3, г.

Влияние инерционности ввода заряда

Моделируемая система обладала следующими параметрами:

фоновая температура — 282 К;

сигнальная температура — 294 К (контраст увеличен по сравнению с предыдущим примером для уменьшения влияния шума на вычисление ФПМ);

сумма фонового и темнового токов — 34 пА;

апертуры фотодетектора организованы так, как показано на рис. 1, в.

Суммарная емкость фотоприемника и входного устройства первой моделируемой системы составляет 0,7 пФ, второй — 5 пФ.

Влияние инерционности ввода заряда во входное устройство видно из рис. 4.

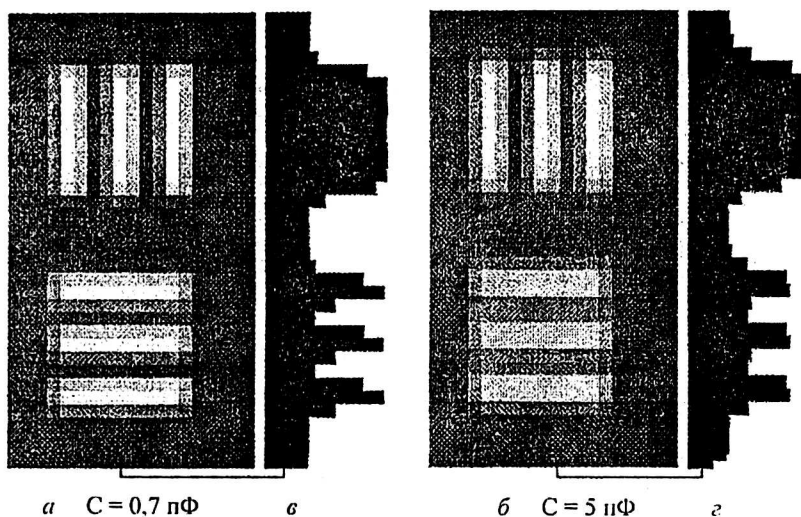


Рис. 4. Влияние инерционности ввода заряда (а–б) и профили яркости изображения (в–г)

Для первой системы с суммарной емкостью 0,7 пФ были получены следующие результаты моделирования (см. рис. 4, а):

ФПМ в направлении оси X — 0,49;

ФПМ в направлении оси Y — 0,45.

Для второй системы с суммарной емкостью 5 пФ были получены следующие результаты моделирования (см. рис. 4, б):

ФПМ в направлении оси X — 0,49;

ФПМ в направлении оси Y — 0,27.

На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что величины ФПМ в X и Y направлениях для системы с меньшей суммарной емкостью, а также для системы с большей суммарной емкостью в направлении оси X приблизительно одинаковы, в то время как в направлении оси Y для системы с большей емкостью наблюдается существенное падение величины ФПМ. Эффект объясняется тем, что инерционность ввода заряда проявляется только в направлении оси времени Y и не проявляется в направлении оси X, оси строк фотоприемника. В случае малой суммарной емкости фотоприемника и входного устройства эффект малозаметен, однако в случае многократного увеличения указанной емкости он оказывает существенное влияние на результирующее изображение.

Влияние пространственной частоты тестовой миры

В этом примере использовались две тестовые миры: одна с пространственной частотой штрихов 5 линий/мм, другая — 10 линий/мм. На рис. 5 показаны результаты обработки тестовых мир. Продемонстрировано падение ФПМ в обоих направлениях в случае более высокой пространственной частоты штрихов (изображения для тестовой миры с частотой 10 линий/мм представлены в масштабе 2:1 для более удобного визуального сравнения с другой мирой).

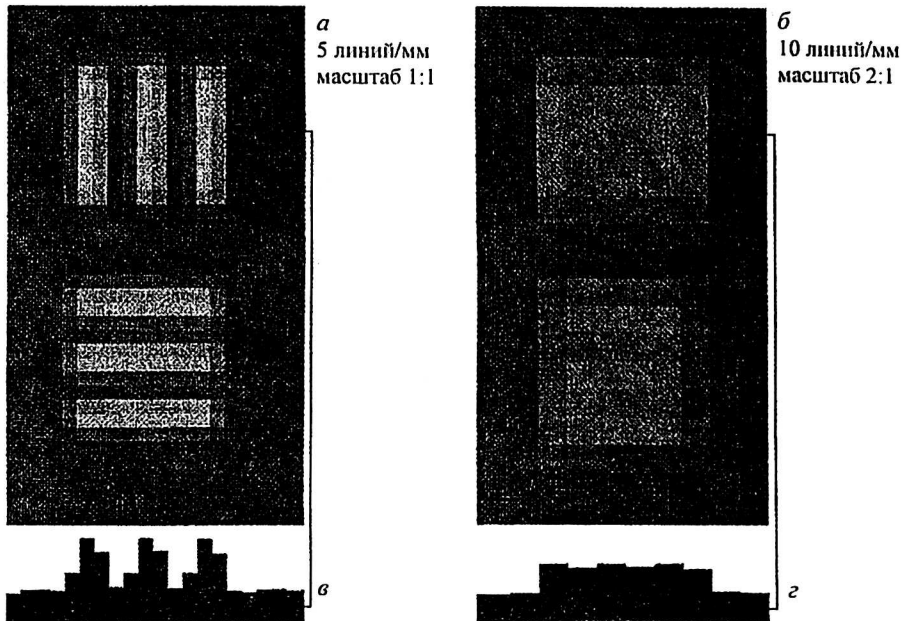


Рис. 5. Влияние пространственной частоты штрихов (а—б) и профили яркости изображения (в—г)

Влияние перекоса вектора скорости движения изображения

Влияние перекоса вектора скорости движения исходного изображения относительно “столбцов” ФП показано на рис. 6. Мы рассматривали две системы, отличающиеся одной от другой направлением вектора движения изображения (см. рис. 1, z — e). На рис. 6, a и b показано результирующее изображение, полученное в случае, когда тангенс вектора движения изображения равен 0 и 0,2, соответственно (см. рис. 1, e).

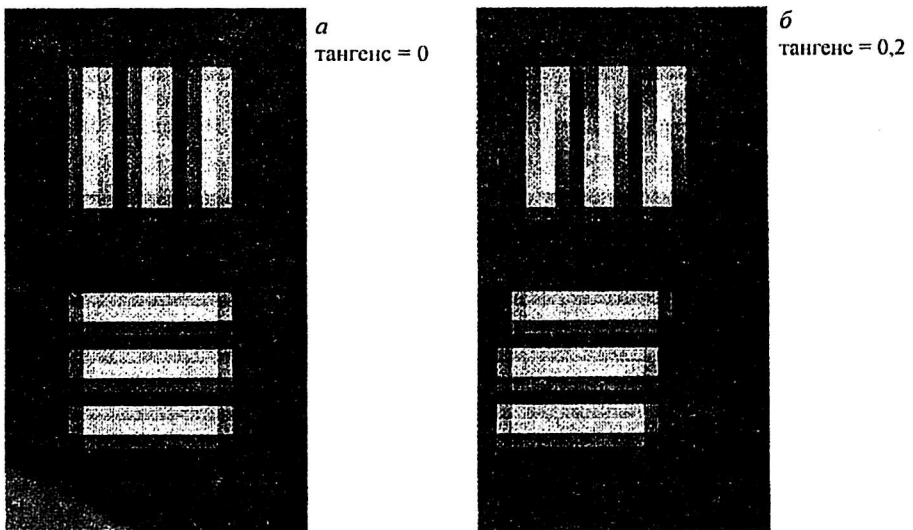


Рис. 6. Влияние смещенного движения изображения (а—б) относительно фотоприемника

Все рассмотренные примеры, а также сравнение численных результатов, полученных в результате моделирования и аналитическим путем, подтверждают правильность и надежность функционирования модели.

Заключение

Была создана программная модель, позволяющая проследить влияние различных физических процессов, происходящих в оптико-электронном тракте системы с ВЗН-фотоприемником, на исходное изображение. В ряде тестов было получено подтверждение правильности и точности моделирования. Модель предназначена для использования разработчиками ВЗН-систем в качестве средства моделирования и оптимизации конструкции фотоприемников и входных устройств мультиплексоров ИК-систем, работающих в различных диапазонах спектра (SWIR, MWIR, LWIR). Достоинства модели наиболее ярко проявляются в случае сложного расположения апертур ФП, а также в случае "неидеального" движения изображения в фокальной плоскости системы. Представленная модель является частью более общей программы по оценке эффективности различных методов и алгоритмов реконструкции и коррекции изображения, разрабатываемой в настоящее время. Модель обладает такими преимуществами, как, например, возможностью пошаговой визуализации, гибкостью в настройке, простотой в использовании. С помощью созданной программы осуществлялось моделирование системы на основе ВЗН-фотодетектора в спектральном диапазоне 3—5 мкм. Эффективность работы модели продемонстрирована на примере системы с ФП сложной топологии, в частности, корректным моделированием эффектов инерционности ввода заряда во входное устройство мультиплексора и перекоса вектора скорости движения изображения относительно столбцов ФП.

Литература

1. Charge-Coupled Devices, Ed. by D. F. Barbe, Springer-Verlag, Berlin — Heidelberg — New York, 1980.
2. Baklanov A. I., Larionov S. V., Scriver A. S. Specialized CCD for the time delay and integration (TDI) regime with variable vector of image movement velocities: Proc. SPIE Vol. 2790. P. 57—66, Fifth Conference on Charge-Coupled Devices and CCD Systems, 1996.
3. Miettinen J., Ailisto H. J. Using a TDI camera in vibration conditions with nonzero viewing angles for surface inspection: Proc. SPIE Vol. 3101. P. 111—118, New Image Processing Techniques and Applications: Algorithms, Methods and Components II, 1997.
4. Marshall A., Murphy K. S. Modeling and simulation of IR scenes and sensors in the UK: current and future capabilities: Proc. SPIE Vol. 2744. P. 591—598, Infrared Technology and Applications XXII, 1996.
5. Трищенко М. А., Винецкий Ю. Р. Приборы с зарядовой связью// Радиотехника и электроника. Сер. Полупроводники. 1981. V. 26. № 4. P. 852—865.

Software for simulation of image conversion in IR TDI systems and optimizing TDI focal plane arrays

S. V. Orlov

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

Yu. R. Vinetsky

State Unitary Enterprise «RD & P Center "Orion"», Moscow, Russia

A program model and relative software tool has been developed allowing to simulate transformations of different physical nature the initial image undergo while passing through electro-optical path of IR TDI system. The developed software is intended to be an everyday-practice focal plane arrays engineer's tool for optimizing PD and multiplexer structure and tradeoff analysis. The software is especially useful in the cases of relatively complex arrangement of photodetector apertures, and/or when image motion trajectory in the focal plane is "non-ideal" (e.g., skewed with respect to its normal direction, or waved-form), which are the cases in practical systems. The preliminary results on the image processing in practical middle-wave infrared TDI system are given demonstrating the influence of various system parameters on final image quality and confirming the validity of the model.