

УДК 629.785

НАПРАВЛЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ С ЗАРЯДОВОЙ СВЯЗЬЮ ЛИНЕЙНОГО ТИПА

И.А. Перл

Рассмотрена внутренняя организация сенсора, основанного на линейном фотоприборе с зарядовой связью. Проанализированы зависимости между различными характеристиками подобных приборов, выделено наиболее важное направление для оптимизации их работы и повышения производительности.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), прибор с зарядовой связью (ПЗС), оптимизация, анализ.

Введение

Линейки фотоприбора с зарядовой связью (ФПЗС) по их внутренней организации можно разделить на две большие категории: с разделением областей накопления и переноса и без разделения. Оба варианта представлены на рис. 1.

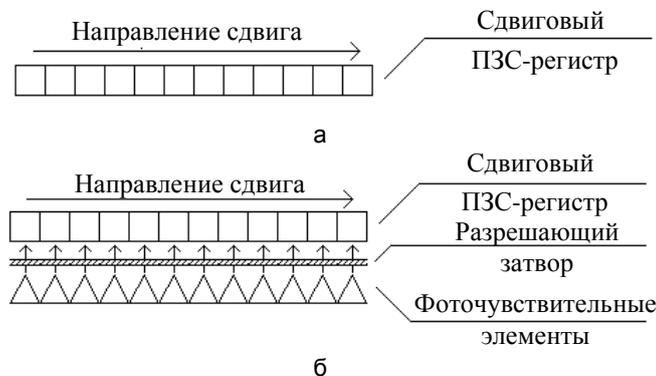


Рис. 1. Типы линейных ФПЗС: без разделения областей накопления и переноса (а); с отдельными фотодиодами и сдвиговым регистром (б)

Вариант построения линейки ФПЗС без разделения областей накопления и переноса заряда является наиболее простым, однако такие сенсоры не применимы в областях, где требуется высокое качество получаемых изображений [1]. Это связано с тем, что накопление и перенос заряда выполняется одними и теми же элементами, и процесс накопления не прекращается после начала переноса заряда. Это приводит к образованию смаза на результирующем изображении, так как пиксель с дальнего края (по отношению к направлению сдвига регистра), проходя через всю линейку, получает дополнительный заряд, накапливаемый в остальных ячейках ПЗС-структуры (рис. 1, а). Альтернативное решение состоит в разделении областей накопления и транспортировки заряда (рис. 1, б). Для реализации этого подхода используют независимую линейку фотоприемных элементов и сдвиговой ПЗС-регистр. Для защиты сдвигового регистра от попадания лишних зарядов используется разрешающий затвор. Этот элемент разбивает рабочий цикл линейки ФПЗС на два этапа: первый этап – это накопление заряда в фотоприемных элементах, как только время экспозиции заканчивается, разрешающий затвор открывается и происходит параллельная передача накопленного заряда и ячеек фотоприемного устройства в соответствующие ячейки ПЗС-регистра. После окончания передачи заряда разрешающий затвор закрывается, и фотодиоды снова переходят в состояние накопления, а ПЗС-регистр начинает сдвигаться, возвращая накопленные данные из сенсора. Это решение имеет целый ряд достоинств. Во-первых, оно решает проблему смаза на результирующем изображении. Во-вторых, оно позволяет варьировать длительность времени экспозиции независимо от скорости сдвигания ПЗС-регистра, но время накопления не может быть меньше времени полного сдвига регистра.

Анализ параметров работы линейки ФПЗС

Рабочий цикл линейки ФПЗС можно разделить на два основных этапа – накопление заряда в фотодиодах и возврат накопленного заряда сдвиговым ПЗС-регистром. Положим, что время, необходимое

для сдвига ПЗС-регистра на один элемент, равно $T_{\text{элемента}}$, а количество элементов в ПЗС-структуре – L , тогда время, необходимое для полного сдвига регистра $T_{\text{ПЗС}}$, будет равно

$$T_{\text{ПЗС}} = T_{\text{элемента}} \times L \text{ или } T_{\text{ПЗС}} = \frac{L}{\nu_{\text{ПЗС}}}, \quad (1)$$

где $\nu_{\text{ПЗС}}$ – частота работы ПЗС-регистра. Так как процесс накопления идет параллельно процессу выдачи результата, накопленного за время предыдущего цикла накопления (рассматриваются линейки ПЗС с разделенными областями накопления и переноса заряда), то вернуть результаты текущего цикла накопления можно только после того, как будет завершен перенос предыдущих результатов в ПЗС-структуре. Такая архитектура накладывает жесткие ограничения на минимальное время накопления, т.е. минимальное время накопления не может быть меньше $T_{\text{ПЗС}}$, и, как следствие, зависит от длины линейки ФПЗС и частоты ее работы, таким образом, минимальное время накопления можно рассматривать как функцию от этих параметров. На графике показана зависимость минимального времени накопления от частоты работы и длины ПЗС-регистра (рис. 2).

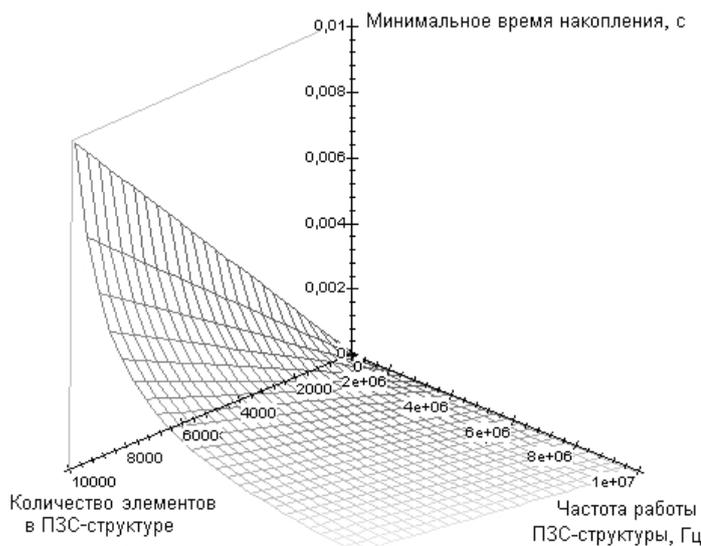


Рис. 2. График зависимости функции минимального времени накопления от тактовой частоты и количества элементов ПЗС-регистра

В системах ДЗЗ необходимо за один проход получить как можно больше данных о снимаемом участке, поэтому предпочтение отдается линейкам средней длины. Современные технологии позволяют производить фотодиоды большой емкости, которые можно экспонировать в течение долгого времени без потери качества результирующих снимков, однако этот подход неприменим в системах ДЗЗ, так как изображение в фотозоне меняется достаточно быстро, что приводит к наслоению и, как результат, к негодности данных, накапливаемых за длительное время экспонирования [2–3].

С целью исследования механизмов работы сенсоров данного типа была разработана модель, позволяющая более детально и наглядно изучить процессы, происходящие в линейке ФПЗС. Модель представляет два независимых процесса, отвечающих за процесс накопления заряда в фотодиодах и процесс перемещения заряда в регистре ПЗС соответственно. Входными параметрами для модели положим желаемое время экспозиции и тактовую частоту системы съемки, тогда выходным параметром будет длина линейки, которую можно использовать в рассчитываемой системе.

Так как ДЗЗ представляет собой процесс съемки движущегося объекта, то возникает необходимость использовать дополнительный метод фокусировки оптической системы на снимаемом участке [4]. Этот метод называется методом тангажного замедления, и его основная идея представлена на рис. 3.

Пусть наблюдение ведется в надири, тогда при движении космического аппарата (КА) угол тангажа изменяется таким образом, чтобы надири был направлен в одну и ту же точку. Примем следующие обозначения: $V_{\text{КА}}$ – линейная скорость движения КА; $V_{\text{сдв}}$ – скорость сдвига изображения в фотозоне оптико-электронного преобразователя (ОЭП); $V_{\text{пст}}$ – линейная скорость подспутниковой точки; f' – фокусное расстояние объектива оптико-электронного комплекса дистанционного зондирования поверхности Земли из Космоса (ОЭК_{ДЗЗ}); H – высота орбиты КА относительно подспутниковой точки; $W_{\text{сдв-ОЭП}}$ – необходимая скорость движения изображения для обеспечения требуемой экспозиции при съемке; δ – размер пикселя фотозоны ОЭП; $W_{\text{КА-танг-ОЭП}}$ – скорость сдвига изображения в фотозоне ОЭП при тангажировании; $\tau_{\text{пр}}$ – необходимое время накопления сигнала на пикселе при съемке (свойство фотозоны); N – число шагов накопления (число повторения засветки пикселя для получения сигнала требуемого уровня); $\omega_{\text{танг}}$ –

угловая скорость тангажирования; $1L_K$ и $2L_K$ – величина 1-го и 2-го равных кадров; $l_{ПП}$ – проекция пикселя на поверхность Земли; L_S – величина слепого участка поверхности; φ_1 и φ_2 – углы между радиусами Земли ($R_3 = 6371$ км), проведенными через подспутниковую точку C и точку визирования; α_B – угол визирования ОЭК_{ДЗЗ}.

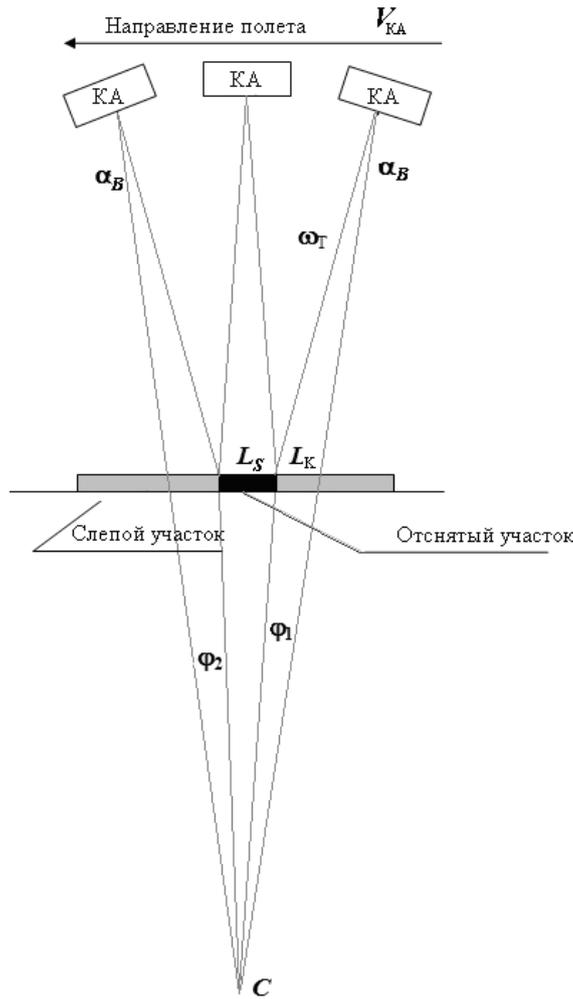


Рис. 3. Общая схема метода тангажного замедления

Для проведения расчетов будем использовать следующие исходные данные ОЭК_{ДЗЗ} при наблюдении в надир: $H=575$ км; $f'=1670$ мм; $V_{ПСТ}=6,948$ км/с; $t_{пр}=1,5 \times 10^{-3}$ с; $\delta=5$ мкм; $V_{СДИнадир}=20,18$ мм/с.

Расчеты, проведенные по методике априорного определения линейного разрешения на местности (ЛРМ) для ФПЗС с размером пикселя 5 мкм, показывают, что для получения ЛРМ на уровне 2,5 м необходимо иметь число шагов накопления (ЧШН) равное 6, что эквивалентно времени накопления $t_H \approx 1,5$ мс и должно быть обеспечено за счет уменьшения скорости движения изображения (СДИ) путем тангажирования до величины $W_{СДИ-ОЭП}$

$$W_{СДИ-ОЭП} = \frac{\delta}{\tau_{пр}} = \frac{5}{1,5 \times 10^{-3}} = 3,33 \text{ мм/с} . \quad (2)$$

Угловая скорость тангажирования ω_T (угловая скорость перемещения линии визирования в плоскости орбиты относительно узловой точки объектива) определяется из выражения

$$\left. \begin{aligned} W_{СДИ-ОЭП} &= \frac{\delta}{\tau_{пр}} = W_{ПСТ-ОЭП} - W_{КА-танг-ОЭП} \\ W_{ПСТ-ОЭП} &= V_{ПСТ} \times \cos(\alpha_B + \phi) \times \frac{f'}{D_H} \\ W_{КА-танг-ОЭП} &= W_{ПСТ-ОЭП} - \frac{\delta}{\tau_{пр}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_T(\alpha_B) = \frac{V_{ПСТ} \times \cos(\alpha_B + \phi)}{D_H} - \frac{\delta}{\tau_{пр} \times f'}$$

При прохождении линии визирования через надир

$$\omega_T = \frac{V_{\text{ПСТ}}}{D_H} - \frac{W_{\text{СДИ-ОЭП}}}{f} = 0,012 - 0,002 = 0,01 \text{ с}^{-1}.$$

При отклонении линии визирования на угол визирования α°

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{СДИ-ОЭП}}(\alpha_B) &= V_{\text{ПСТ}} \times \cos(\alpha_B + \phi) \times \frac{f}{D_H} - \omega_T(\alpha_B) \times f \\ D_H &= (R_3 + H) \cos \alpha_B - \sqrt{R_3^2 - (R_3 + H)^2 \times \sin^2 \alpha_B} \\ \phi &= \arcsin\left(\frac{D_H}{R_3} \times \sin \alpha_B\right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \omega_T(\alpha_B) = \frac{V_{\text{ПСТ}} \times \cos(\alpha_B + \phi)}{D_H} - \frac{W_{\text{СДИ-ОЭП}}(\alpha_B)}{f},$$

где D_H – наклонная дальность до точки визирования; ϕ – угол между радиусами Земли, проведенными в подспутниковую точку и точку визирования.

Большинство комплексов ДЗЗ использует не очень высокие тактовые частоты для компонентов системы – не выше 10 МГц (обычно около 4–6 МГц), так как системы с высокой частотой системной шины более подвержены помехам и могут быть менее стабильны. Это накладывает ограничения на основные параметры работы сенсора. Для того чтобы получать изображения достаточного размера, необходимо использовать линейки максимально возможной длины. С одной стороны, время накопления должно удовлетворять соотношению (2), а с другой – оно не должно быть меньше, чем минимально возможное время накопления для сенсора данного типа (1), т.е.

$$\left. \begin{aligned} W_{\text{СДИ-ОЭП}} &= \frac{\delta}{\tau_{\text{пр}}} \Rightarrow \tau_{\text{пр}} = \frac{\delta}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}} \\ T_{\text{ПЗС}} &= \frac{L}{v_{\text{ПЗС}}} \\ T_{\text{ПЗС}} &\leq \tau_{\text{пр}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{L}{v_{\text{ПЗС}}} \leq \frac{\delta}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}} \Rightarrow L \leq \frac{\delta \times v_{\text{ПЗС}}}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}} \approx 6600 \text{ элементов}.$$

Таким образом, количество элементов, которые могут быть использованы в линейке, зависит от размера фоточувствительного элемента, тактовой частоты системной шины и скорости бега изображения в фотозоне.

Если предположить, что возможно ведение съемки без использования тангажного замедления, то $W_{\text{СДИ-ОЭП}}$ будет равно 17 мм/с, что даст на следующие характеристики для основных параметров сенсора:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{пр}} &= \frac{\delta}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}} = \frac{5 \text{ мкм}}{17 \text{ мм/с}} = 0,29 \text{ мс}, \\ L &\leq \frac{\delta \times v_{\text{ПЗС}}}{W_{\text{СДИ-ОЭП}}} \Rightarrow L \leq \frac{5 \text{ мкм} \times 4 \text{ МГц}}{17 \text{ мм/с}} \Rightarrow L \leq 1176. \end{aligned} \quad (3)$$

Как видно из приведенных расчетов, ведение съемки без применения методик замедления бега изображения в фотозоне приводит к наложению жестких ограничений на минимальное время накопления и на длину сенсора. С одной стороны, использование линеек такой длины в системах ДЗЗ недостаточно эффективно, так как полоса захвата у них слишком узкая, с другой – такое время накопления является недостаточным для получения изображения необходимого качества. Таким образом, новая задача может быть сформулирована следующим образом: оптимизировать работу сенсора таким образом, чтобы можно было вести процесс съемки без использования тангажного замедления с характеристиками линейки (время накопления и длина сенсора), приближенными к характеристикам сенсора, работающего с использованием тангажного замедления.

Если сократить время экспонирования линейки без сокращения длины выходного регистра, то возникает наложение данных зондирования между соседними кадрами, так как не все данные из предыдущего кадра успевают покинуть сенсор. Так как сокращение длины линейки крайне нежелательно с точки зрения характеристик результатов ДЗЗ, то необходимо произвести оптимизацию именно методов возврата данных из сенсора ФПЗС.

Моделирование процесса съемки с использованием классической линейки ФПЗС с применением метода тангажного замедления для торможения изображения в фотозоне подтверждает высокую эффективность этого подхода с точки зрения получения высокого качества изображения, однако в то же время ярко демонстрирует наличие обширных слепых участков.

Рис. 4 иллюстрирует моделирование съемки с использованием тангажного замедления. Если отказаться от использования тангажного замедления, сохранив при этом параметры работы линейки (один кадр получается за 1,5 мс), то результат съемки представляет собой набор достаточно широких полос, который соответствует участку поверхности земли, над которым пролетел КА за время накопления. Схе-

ма на рис. 4 показывает соотношение реальных участков поверхности Земли с соответствующими им строчками изображения.

В случае использования тангажного замедления скорость движения изображения в фотозоне составляет 3 мм/с, т.е. за время накопления ФПЗС линейки (1,5 мс) изображение сместится на $3 \times 10^{-3} \times 1,5 \times 10^{-3} \text{ м} = 4,5 \text{ мкм}$, т.е. смещение изображения на 10% меньше, чем размер пикселя, что позволяет снять данные зондирования с последовательно расположенных проекций участков поверхности Земли в фотозоне с небольшим перекрытием, обеспечивающим повышение уровня достоверности данных зондирования. Если же тангажирование отсутствует, то скорость бега изображения в фотозоне составляет 17 мм/с и смещение изображения за один интервал накопления равно $17 \times 10^{-3} \times 1,5 \times 10^{-3} \text{ м} = 25,5 \text{ мкм}$, что превышает размер пикселя фотозоны более чем в 5 раз и приводит к соответствующим потерям данных зондирования.

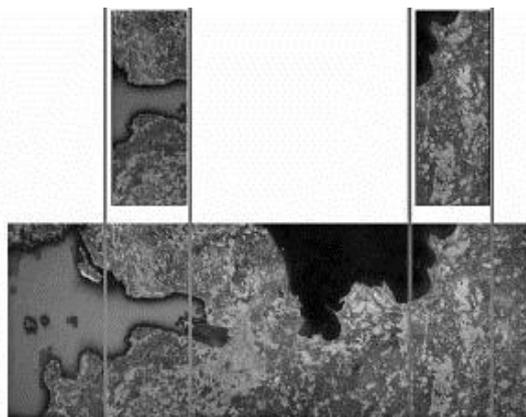


Рис. 4. Результаты моделирования процесса съемки с использованием тангажного замедления: сверху – результат съемки; снизу – реальное изображение, использованное как объект съемки

Для исследования формирования изображения в процессе съемки с использованием линейки ФПЗС была разработана вторая модель. Как и первая использованная модель, эта система состоит из двух независимых потоков, что наиболее точно отображает реальный процесс съемки. В качестве исходных данных в модель загружается изображение, которое представляет снимаемую поверхность. Первый поток модели отвечает за движение этого изображения, за его скорость и направление. Второй поток отвечает за моделирование поведения спутника и построение результирующего изображения с учетом заданных характеристик съемки (использование тангажирования, ширина линейки, время экспонирования и др.). Таким образом, первый процесс отвечает за относительное движение поверхности Земли в системе координат, привязанной к спутнику, что есть суперпозиция движения поверхности Земли и спутника относительно Земли. Второй поток моделирует поведение покоящегося спутника, который находится над движущейся поверхностью и может только отклоняться по углу тангажа. К достоинствам этой модели можно отнести ее относительную простоту и, в то же время, полноту описания процесса съемки. Еще одной полезной особенностью является возможность загрузки различных снимков земной поверхности (с разным увеличением) что позволяет моделировать различные настройки оптической системы, а также возможность загрузки тестовых изображений для оценки качества передачи элементов различных типов (вертикальных или горизонтальных относительно положения линейки, более ярких или темных). На рис. 5 показан результат моделирования съемки с учетом скорости бега изображения в фотозоне, равной 17 мм/с.

Приведенный результат моделирования отличается от реальной картинке, которую можно было бы получить при тех же исходных условиях, тем, что на приведенном рисунке присутствуют белые полосы, которых нет во время ведения реальной съемки. Так как смещение изображения в 5 раз превышает ширину сенсора, то в реальной жизни снимок будет состоять из полос шириной, равной 5 ширинам активного пикселя. Иными словами, вместо 5 информативных узких полос будет получаться одна, в 5 раз более широкая и содержащая информацию обо всех 5 участках. Такое ведение съемки не допустимо, так как не дает достоверной информации о каждой узкой полоске, а усредненная широкая полоса не является достаточно информативной из-за существенного смаза, вызванного сильным смещением изображения. Рис. 6 иллюстрирует результат строчного восстановления такого изображения с использованием данных о соседних известных точках. Как видно из снимка модели, восстановленное изображение позволяет четко получить данные только о положении береговой линии. Детали объектов, расположенных в море или на суше, практически полностью утеряны.

Используемое время экспонирования, равное 1,5 мс, является аппаратным ограничением, так как это минимальное время, за которое в ФПЗС-системе успевает накопиться заряд, необходимый для получения снимков нужного качества. Однако это ограничение может быть отброшено, если фотодиоды экс-

понировать не напрямую, а с использованием усилителя яркости (например, Photonis-DEP (Нидерланды)), выход которого посредством прямого сочленения связан с волоконно-оптическим входным окном ПЗС. Использование усилителя яркости в качестве оптического входного затвора позволяет существенно, в пределе до десятков наносекунд, снизить время экспонирования. Чтобы отказаться от использования тангажного замедления без ухудшения качества результирующих снимков, необходимо сохранить соотношение смещения изображения и времени экспонирования линейки. Как показано в [3], в этом случае время экспонирования должно быть 0,29 мс или в 5,2 раза меньше, чем при использовании замедления изображения в фотозоне. Указанное время экспонирования существенно превосходит сотни наносекунд и, как следствие, такое уменьшение времени экспозиции вполне возможно за счет использования усилителя яркости в качестве входного затвора.

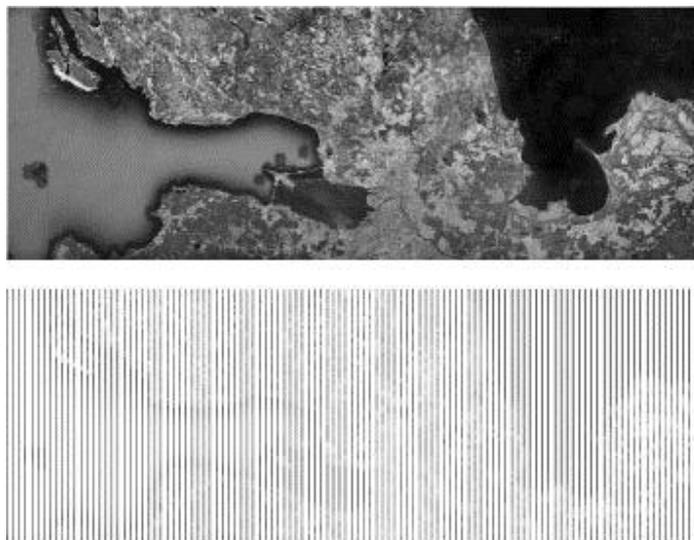


Рис. 5. Результат моделирования процесса съемки с использованием ФПЗС-линейки без применения метода тангажного замедления (сверху – оригинальное изображение, внизу – результат моделирования процесса съемки)

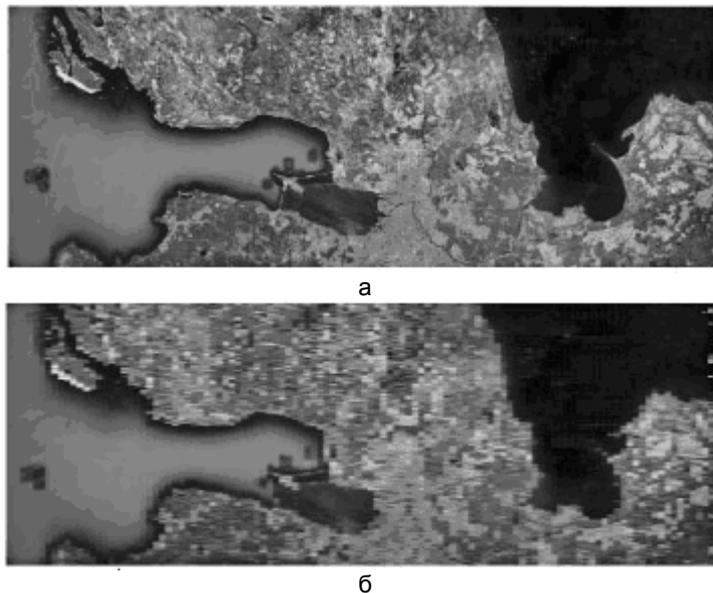


Рис. 6. Оригинальное изображение, использованное как объект съемки (а); результат восстановления изображения, полученного в результате маршрутной съемки с использованием линейки ФПЗС (б)

Заключение

Таким образом, оптимизация и повышение производительности работы сенсоров ФПЗС линейного типа должны быть сфокусированы именно на развитии механизмов вывода данных, так как из всех операций, происходящих внутри сенсора подобного типа, именно выдача результатов съемки является наиболее длительной. В дополнение к требованиям производительности, использование подобных сенсоров в системах ДЗЗ выдвигает еще требование повышенной надежности сенсора, что не позволяет повышать скорость выдачи данных из сенсора простым повышением частоты работы системы.

Литература

1. Пресс Ф.П. Фоточувствительные приборы с зарядовой связью. – М.: Радио и связь, 1991. – 261 с.
2. Гош С., Чандра А. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. – М.: Техносфера, 2008. – 328 с.
3. Аванесов Г.А., Василевский А.С., Зиман Я.Л., Полянский И.В. Цифровые авиационные съемочные системы на линейных ПЗС-детекторах // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2005. – Т. 2. – С. 189–195.
4. Демин А.В., Денисов А.В., Перл И.А., Третьякова А.А. Оптико-электронный комплекс повышенной производительности // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 3. – С. 3–5.

Перл Иван Андреевич

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, j-pearl@mail.ru