

УДК 528.852.3

СТРУКТУРНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ОТ МНОГОМАТРИЧНЫХ СКАНЕРНЫХ ДАТЧИКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*Кузнецов А.Е., д.т.н., НИИ «Фотон» РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru;
Пресняков О.А., к.т.н., НИИ «Фотон» РГРТУ, e-mail: foton@rsreu.ru;
Мятов Г.Н., к.т.н., АО «РКЦ «Прогресс».*

STITCHING OF REMOTE SENSING IMAGES FROM STAGGERED TDI CCD

Kuznetsov A.E., Presniakov O.A., Myatov G.N.

The paper is devoted to geometrical stitching of images from staggered TDI CCD. Factors affecting adjacent CCD images displacement are discussed. Stitching methods, including those which authors used for development of software for processing of imagery from «Resurs-DK», «Resurs-P» and other satellites, are reviewed and analyzed. Methods for precise stitching process organization are proposed.

Keywords:

Ключевые слова: «сшивки», ПЗС ВЗН, многоматричный датчик.

Введение

Разрешающая способность и полоса захвата современных высокоточных спутниковых систем наблюдения Земли (табл. 1) требуют формирования изображений с высокой строчной частотой и большим числом пикселей в строке (например, строка панхроматического изображения от КА «Ресурс-П» содержит 54 тысячи пикселей). Для повышения времени экспонирования и чувствительности датчика используются матрицы ПЗС, работающие в режиме временной задержки и накопления (ПЗС ВЗН, «TDI-CCD»). Имеющаяся в наличии элементная база не позволяет охватить одной ПЗС-матрицей всю полосу захвата, поэтому распространен подход, при котором для достижения требуемых характеристик систем ДЗЗ в фокальной плоскости размещают несколько ПЗС-матриц в шахматном порядке [1] (рис. 1). В иностранной литературе такое размещение могут описывать терминами «staggered», «non-collinear» [2, 3].

Статья посвящена вопросу геометрической «сшивки» изображений от многоматричных датчиков. Рассмотрены факторы, влияющие на смещение общих точек в изображениях от соседних ПЗС-матриц. Выполнен анализ методов, используемых для «сшивки», включая методы, использованные авторами при разработке программного обеспечения обработки данных от КА «Ресурс-ДК», «Ресурс-П» и других. Рассмотрены вопросы организации процесса высокоточной сшивки.

В процессе съемки каждая ПЗС-матрица формирует отдельное изображение, так называемый скан.

Концепция функционирования наземных комплексов обработки информации для всех типов КА предусматривает выдачу потребителям выходной продукции, не учитывающей специфику построения и функционирования сканирующего датчика. В нашем случае это означает, что потребителям должно выдаваться непрерывное изображение наблюдаемой территории (рис. 2), а не набор отдельных сканов. Отсюда возникает задача высокоточного структурного восстановления информации или, так называемой, геометрической «сшивки».

Таблица 1. Характеристики спутников с многоматричными видеодатчиками

Спутник	Страна	Год запуска	Полоса захвата, км	Разрешение, м
IRS-1C	Индия	1995	70	5,8
IKONOS	США	1999	11	0,82 (ПХ), 3,2 (МС)
QuickBird 2	США	2001	18	0,61 (ПХ), 2,44 (МС)
СBERS-02В	Бразилия-Китай	2003	113	20
«Ресурс-ДК»	Россия	2006	28,3 (H=350 км)	не хуже 1
WorldView-1	США	2007	17,7	0,5
GeoEye-1	США	2008	15,3	0,41 (ПХ), 1,65 (МС)
Worldview-2	США	2009	16,4	0,46 (ПХ), 1,84 (МС)
ZY-1 02С	Китай	2011	27 (1 прибор)	2,36
«Ресурс-П» №1, №2	Россия	2013, 2014	38	не хуже 1 (ПХ)
Worldview-3	США	2014	13,1	0,31 (ПХ)

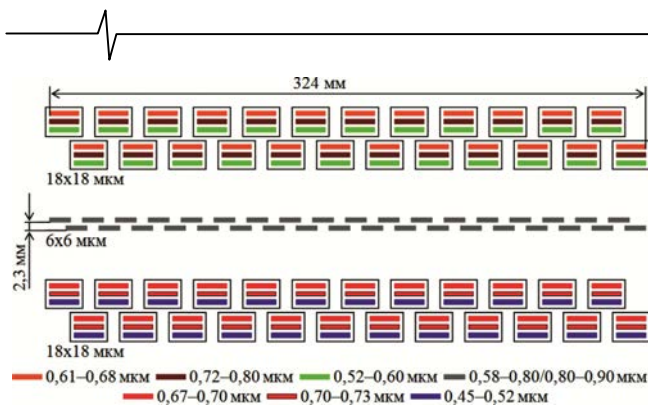


Рис. 1. Размещение ПЗС-матриц

в фокальной плоскости датчика КА «Ресурс-П»

Для последующего анализа известных технических решений проанализируем основные факторы, влияющие на характер смещений изображений от соседних ПЗС-матриц.

Структурные искажения многоскановых изображений

При съемке с использованием ПЗС ВЗН заряды в них должны переноситься параллельно движению изображения в фокальной плоскости. В противном случае будет возникать смаз изображения, а при использовании ПЗС-матриц, расположенных в шахматном порядке, возможно также снижение перекрытия между сканами вплоть до появления разрывов. Поэтому на параметры движения изображения в фокальной плоскости (а значит, на движение КА) накладываются определенные ограничения [1]. Система управления движением КА (СУД) на основе данных о его орбитальном и угловом движении, конструкции датчика, вращении Земли и т.д. должна таким образом управлять ориентацией спутника, чтобы обеспечить стабильность скорости движения и минимизировать наклон вектора скорости движения изображения относительно направления столбцов ПЗС ВЗН. Полностью влияние перечисленных

факторов скомпенсировать, как правило, невозможно или не удастся, что приводит к отклонению смещения сканов от номинального величиной несколько пикселей. Это отклонение непостоянно и плавно изменяется в пределах снимка. Влияние ряда других факторов на движение изображения и зависящее от него смещение сканов в принципе не может быть скомпенсировано СУД. К таким факторам в первую очередь относятся высокочастотное изменение углов ориентации КА и рельеф местности, приводящий к параллактическим искажениям [1, 2, 4].

Изменение углов ориентации спутника. Одна и та же точка земной поверхности фиксируется соседними ПЗС-матрицами с некоторым временным интервалом. За это время изменяются углы тангажа (α), крена (ω) и рысканья (χ) спутника, что приводит к значительным поперечным и продольным смещениям одноименных точек в соседних сканах. В первом приближении при съемке в надире изменение угла тангажа $\Delta\alpha$ (в радианах) приводит к смещениям точек на Земле вдоль направления полета $\Delta X = \Delta\alpha H$; изменение угла крена $\Delta\omega$ вызывает смещения в поперечном направлении $\Delta Y = \Delta\omega H$; изменение угла рысканья $\Delta\chi$ приводит к развороту строк на угол $\Delta\chi$ и смещению вдоль направления полета на разную величину в пределах снимка.

Рельеф местности. Рассмотрим, как влияет отклонение Δh высоты точек от некоторой средней геодезической высоты в пределах снимка \bar{h} на смещения соседних сканов в этих точках (рис. 3). Если точка T на поверхности Земли имеет высоту \bar{h} , она регистрируется соседними ПЗС-матрицами в положениях на орбите 1 и 2. При высоте точки $\bar{h} + \Delta h$, ее смещение в соседних сканах изменится на величину, эквивалентную расстоянию ε на поверхности Земли.

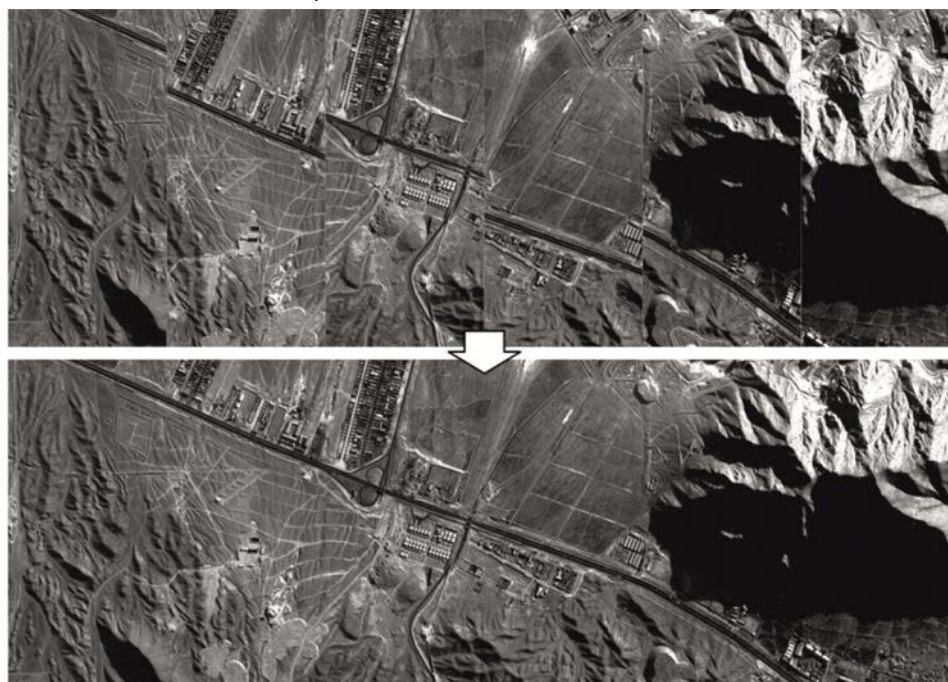


Рис. 2. Многоскановое и структурно восстановленное изображения

В первом приближении, рассматривая надирную съемку и пренебрегая кривизной поверхности Земли и участка орбиты в районе снимка, $\varepsilon = \Delta h \frac{\ell}{f}$, где ℓ – расстояние между ПЗС-матрицами в фокальной плоскости, f – фокусное расстояние оптической системы. Часто удобнее использовать оценку смещения в пикселях $k = \frac{\Delta h \ell}{H r}$, где H – высота полета спутника, r – размер фотозлемента ПЗС-линейки. Выразив через N номинальное смещение ПЗС-линейек в пикселях, получим $k = N \frac{\Delta h}{H}$. В табл. 2 приведены значения k для некоторых спутников при высоте полета H и перепаде высот в районе съемки 1 км.

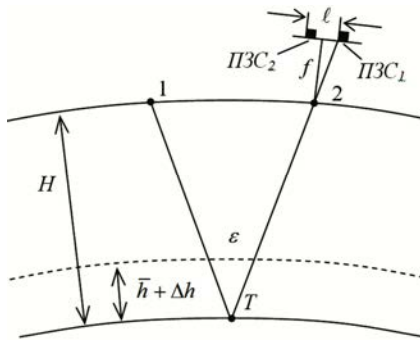


Рис. 3. Схема оценки смещения одноименных точек соседних сканов из-за рельефа местности

Таблица 2. Смещение общих точек в соседних сканах из-за рельефа местности

Датчик (КА)	N, пикс.	H, км	k, пикс.
Геотон («Ресурс-ДК»)	256	350–600	0,43–0,73
Геотон-Л1 («Ресурс-П №1»), ПХ	384	475	0,81
Геотон-Л1 («Ресурс-П №1»), МС	414	475	0,87
HR1/HR2 (ZY-1 02C)	2600	779	3,3

На рис. 4 представлены графики смещений номеров строк одноименных точек на соседних сканах, идентифицированных при помощи корреляционно-экстремаль-

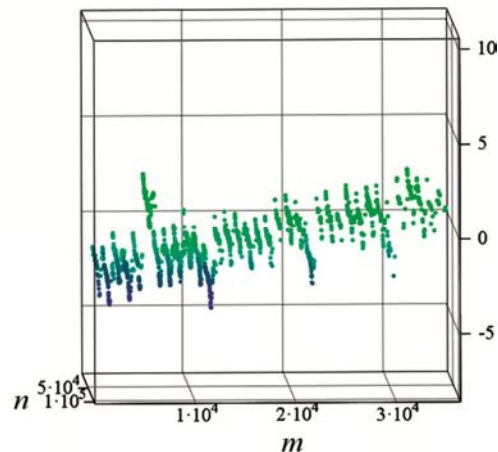
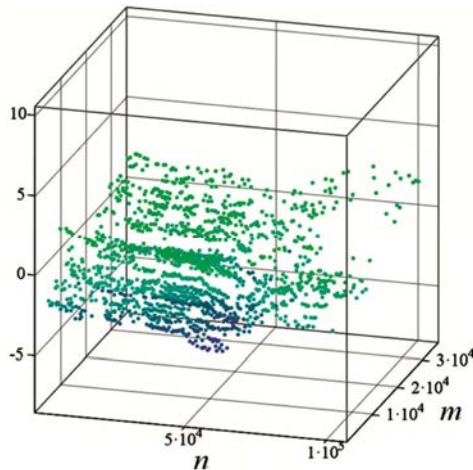


Рис. 4. Графики изменения смещения одноименных точек в пикселях в строчном направлении в пределах снимка

ной процедуры, для реального сканового изображения от КА «Ресурс-ДК». Длинные «борозды», тянущиеся в кадровом направлении и хорошо различимые на графике справа, обусловлены неточностями установки ПЗС-линейек в фокальной плоскости. Общий наклон графика определяется орбитой спутника, углами съемки и вращением Земли. Колебания углового движения приводят к волнообразным изменениям смещений в зависимости от номера строки. Рельеф местности на приведенном примере вносит незначительные локальные несистематические искажения.

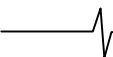
Методы «сшивки» сканов

В литературе рассмотрены различные варианты решения задачи «сшивки» изображений от многоматричных датчиков с ПЗС ВЗН [2-9]. К сожалению, в доступных источниках не для всех коммерческих спутников удалось найти описание используемых алгоритмов «сшивки».

«Сшивка» плоскопараллельным сдвигом. Из анализа факторов, влияющих на перекрытие соседних сканов, понятно, что субпиксельной точности «сшивки» этим методом можно достичь только при условии максимально близко расположенных друг к другу в кадровом направлении ПЗС-матриц, поэтому для большинства эксплуатируемых сегодня датчиков с шахматным расположением ПЗС ВЗН его применение нецелесообразно.

Методы «сшивки» на основе определения перекрытий по видеоданным. В литературе [2] для обозначения таких методов также встречается термин «ориентированные на пространство изображения» («image-space-oriented»).

В работе [5] описано получение функции смещения соседних сканов на основе оригинального метода функционализации параметров изображений. К достоинствам метода можно отнести возможность достижения точности совмещения изображений в области шва лучше 0,1 пикселя. Для работы алгоритма не требуется высокоточных измерений положения и ориентации КА. Авторы отмечают высокое быстродействие алгоритма, позволяющее использовать его на борту. К сожалению, в работе не приводится алгоритм собственно «сшивки» на основе полученной функции.



В работе [3] рассмотрен метод «сшивки» путем заполнения пробела между видеоданными нечетных матриц информацией от четных, используемой в качестве «заплатки». Рассматривая процесс «сшивки» изображений от трех ПЗС-матриц, авторы вводят понятие виртуальной ПЗС-матрицы ВПЗС₂, закрывающей пробел между ПЗС₁ и ПЗС₃ и расположенной на одной линии с ними (рис. 5). Трансформирование координат между ПЗС₂ и ВПЗС₂ выполняется по кусочно-полиномиальной модели, параметры которой определяются на основе связующих точек. Идентификацию связующих точек предлагается выполнять по алгоритму SIFT с последующей фильтрацией.

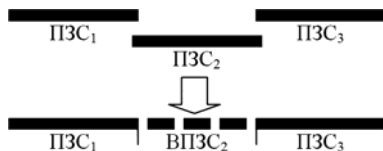


Рис. 5. Размещение виртуальной ПЗС-матрицы в методе заполнения пробелов

Область применения методов этой группы имеет ограничения, которые накладывает сюжет снимков. Так, могут возникнуть сложности с обработкой не подвергающихся идентификации сюжетов: содержащих преимущественно воду, снежные поля и т.п.

Другим общим недостатком методов «сшивки» на основе определения перекрытий по стыкам является то, что положение точек, удаленных от краев сканов, не будет зависеть от рельефа местности в этих точках. Использование таких моделей в случае, когда расстояние между ПЗС-матрицами в кадровом направлении составляет сотни пикселей, может привести к ошибкам геопривязки «сшитого» изображения. Величина ошибок будет соответствовать параллактическому смещению точек в соседних сканах (табл. 2).

Регрессионный метод «сшивки», впервые предложенный в 2004 г. [6], позднее доработанный [7] и подробно рассмотренный в литературе [4], предполагает определение на основе общих точек параметров модели, адекватно описывающей трансформирование сканов в пределах всего структурно восстановленного изображения. За счет избыточности точек по отношению к неизвестным параметрам функции достигается высокая надежность метода; он нечувствителен к локальным ошибкам идентификации и невозможности идентифицировать общие точки в локальных областях. «Сшитое» изображение представляет собой изображение от виртуальной (несуществующей) ПЗС-линейки, размещенной в фокальной плоскости датчика и перекрывающей совокупное поле зрения всех ПЗС-матриц, что позволяет получить преимущества, которые дает использование строгой модели.

Для трансформирования устанавливается следующее соответствие между координатами (m_k, n_k) , $k = \overline{1, K}$, точек сканов и координатами (m, n) структурно восстановленного изображения. При переносе пикселей нечетных сканов используются только установочные параметры. Для четных сканов ($k = 2, 4, \dots$) трансформирование выполняется по формуле (рис. 6):

$$m_k(m, n) = U_{mk}(m) + P_m[m, t(n)] + A_m[t(n)],$$

$$n_k(m, n) = t_k^{-1} [U_{nk}(m) + P_n[m, t(n)] + A_n[t(n)]]. \quad (1)$$

Здесь:

– $U_{mk}(m)$, $U_{nk}(m)$ – функции компенсации ошибок совмещения сканов из-за неточности установки ПЗС-матриц в фокальной плоскости;

$$P_m(m, t) = a_0 + a_1 t + a_2 m + a_3 t^2 + a_4 m^2,$$

$P_n(m, t) = b_0 + b_1 t + b_2 m + b_3 t^2 + b_4 m^2$ – полиномы, компенсирующие отклонение видеоданных отдельных ПЗС-линеек от номинального положения из-за орбитального движения КА, его ориентации и вращения Земли;

– $A_m(t)$, $A_n(t)$ – кусочно-линейные функции, учитывающие высокочастотные изменения углов крена и тангажа КА;

– $t(n)$, $t^{-1}(t)$ – прямая и обратная функции, устанавливающие связь между номером строки и временем ее съемки, необходимость введения которых обусловлена возможностью смены частоты сканирования в процессе съемки.

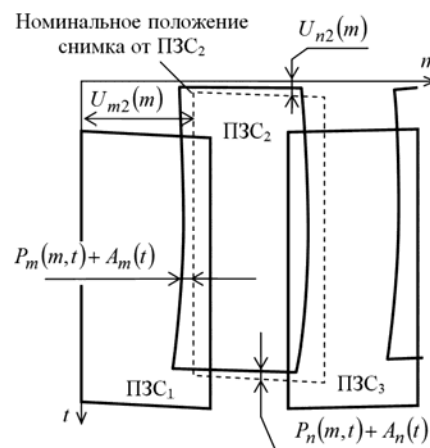


Рис. 6. Параметры, определяющие взаимное положение сканов в регрессионном методе «сшивки»

Функции $U_{mk}(m)$, $U_{nk}(m)$ определяются в результате калибровки относительного положения ПЗС-матриц. Параметры функций P_m , P_n , A_m , A_n определяются по общим точкам, для поиска которых используется корреляционно-экстремальная идентификация.

Метод успешно применяется при обработке снимков с перепадами высот до 2000 м от КА «Ресурс-ДК», для которого точность определения элементов внутреннего ориентирования съемочной аппаратуры приводит к несогласованию геодезических координат общих точек на соседних сканах до 3–5 пикселей.

Регрессионный метод, как и методы на основе определения перекрытий, снижает точность геопривязки на величину параллактических искажений между соседними сканами. Также возникают сложности с обработкой сюжетов, включающих плохо идентифицируемые области, но при условии, что сцена состоит преимущественно из таких областей. Следует отметить невозможность применения или снижение эффективности рассмотренного метода при небольшом количестве ПЗС-матриц в составе датчика (две или три).

Методы сшивки на основе точной геодезической привязки. Аппаратура современных систем ДЗЗ позволяет после ее геометрической калибровки достичь точности геопривязки, при которой рассогласование геодезических координат общих точек в соседних сканах не превышает 0,3 пикселя. В этом случае представляется возможным выполнить точное структурное восстановление в автоматическом режиме. Использование строгой геометрической модели датчика ряд авторов отмечают как необходимое условие для обеспечения высокой измерительной точности изображений [2, 8].

Один из вариантов высокоточной «сшивки» рассмотрен в работе [8]. Автором предлагается применить процедуру маршрутной фототриангуляции с использованием опорных и связующих точек, в результате которой минимизируется разность геодезических координат в общих точках сканов. Связующие точки предлагается определять автоматически с помощью цифрового коррелятора. Подход безусловно правильный, но, к сожалению, автор не уделил внимания решению собственно задачи «сшивки», т.е., получения структурно восстановленного изображения. На основе точной геопривязки можно выполнить трансформирование или ортотрансформирование сканов и сформировать «сшитое» изображение в системе координат картпроекции, но это не удовлетворяет в полной мере требованиям сложившейся международной практики, в соответствии с которыми потребителю могут также выдаваться исходные снимки с большой полосой обзора, геопривязка которых выполняется по RPC или строгой модели. Можно также отметить потенциальную чувствительность метода к ошибкам из-за идентификации связующих точек на облачности.

В работе [2] «сшитое» изображение помещается в плоскость проекции вдоль траектории съемки, которая задается по положению первого и последнего пикселей первого столбца первого скана. Сканы трансформируются в «сшитое» изображение по данным геопривязки на средней высоте местности. Структурно восстановленное изображение сопровождается коэффициентами дробных полиномов. Метод используется в штатной системе обработки изображений от спутника ZY-1 02C для «сшивки» снимков с перепадом высот до 300 м. При более сильных перепадах авторы рекомендуют использовать дополнительную геометрическую коррекцию на основе методов, ориентированных на пространство изображения. Отметим, что в предложенном варианте решения можно было бы использовать ортотрансформирование сканов, и даже с использованием достаточно грубой ЦМР происходила бы точная «сшивка» снимков горных районов. Однако использование грубой ЦМР резко отрицательно сказалось бы на измерительной точности выходной продукции.

Идея метода «сшивки» на основе точной геопривязки, обобщенного на двумерный и трехмерный (с использованием ЦМР) случай, предложена авторами в работах [4, 9]. «Сшитое» изображение предлагается считать сформированным виртуальной ПЗС-линейкой, перекрывающей совокупную полосу обзора ПЗС-матриц датчика. При такой постановке оказывается возможным использовать достаточно грубую ЦМР только для устранения межска-

новых параллактических искажений, когда ошибки высоты 300 – 1000 м в зависимости от датчика являются приемлемыми. «Сшитое» изображение может распространяться потребителям в сопровождении коэффициентов RPC либо параметров строгой модели, при этом в дальнейшем потребители могут применять свои высокоточные ЦМР для обработки интересующих их участков либо выполнять ориентирование по высокоточной опорной информации. Рассмотрим алгоритм реализации этого метода применительно к обработке с использованием ЦМР, поскольку ЦМР с грубым разрешением доступна для всей территории Земли. Кроме того, снижение ошибки «сшивки» даже на 0,1–0,2 пикселя также целесообразно, поскольку рельефная составляющая является лишь одной из частей общей ошибки. Алгоритм апробирован при обработке снимков от российского КА «Ресурс-П».

Будем считать, что исходные сканы приведены к единой частоте сканирования и номер строки n_k линейно связан с временем t . Обозначим вектор координат точки на k -м скане, дополненных высотой над поверхностью эллипсоида, как $\mathbf{r}_k = (m_k, n_k, h)$, $k = \overline{1, K}$. Вектор-функцию геопривязки, определяющую в указанной точке для заданной высоты геодезические координаты $\mathbf{g} = (B, L, h)$ (с тождественным преобразованием высоты), обозначим через \mathbf{G}_k ,

$$\mathbf{g} = \mathbf{G}_k(\mathbf{r}_k).$$

Аналогично определим вектор-функцию геопривязки для структурно восстановленного изображения как $\mathbf{g} = \mathbf{G}(\mathbf{r})$, $\mathbf{r} = (m, n, h)$.

Тогда прямое координатное соответствие исходных сканов и структурно восстановленного изображения можно представить в виде функции $\mathbf{T}_k(\mathbf{r}_k)$,

$$\mathbf{r} = \mathbf{T}_k(\mathbf{r}_k) = \mathbf{G}^{-1}[\mathbf{G}_k(\mathbf{r}_k)],$$

где $\mathbf{G}^{-1}(\mathbf{g})$ – вектор-функция, обратная функции $\mathbf{G}(\mathbf{r})$. В аналитическом виде такое обращение часто невозможно выполнить. Поэтому можно прибегнуть к численному обращению методом Ньютона.

Формирование пикселей структурно восстановленного изображения с использованием $\mathbf{T}_k(\mathbf{r}_k)$ требует сложной процедуры интерполяции в нерегулярной решетке [10], поэтому на практике обработка строится с использованием обратных функций геометрического соответствия. Их можно получить двумя способами. Во-первых, воспользоваться преобразованием, аналогичным \mathbf{T}_k , т.е. $\mathbf{r}_k = \mathbf{G}_k^{-1}[\mathbf{G}(\mathbf{r})]$. Для организации скоростной обработки также необходимо выполнить кусочно-линейную аппроксимацию полученной зависимости. При такой обработке могут возникнуть сложности при численном обращении \mathbf{G}_k , связанные с необходимостью расширения измерений за пределы скана и нахождением области определения скана в плоскости структурно восстановленного изображения. К численному обращению функции \mathbf{G} это относится в меньшей степени. Поэтому для организации скоростной обработки по обратному закону геометрического соответствия выполним кусочно-линейную аппроксимацию функции

$T_k(\mathbf{r}_k)$ функцией $\hat{T}_k(\mathbf{r}_k)$, после чего функцию $\hat{T}_k^{-1}(\mathbf{r})$, обратную $\hat{T}_k(\mathbf{r}_k)$, аппроксимируем, в свою очередь, кусочно-линейной вектор-функцией $P_k(\mathbf{r})$, $\mathbf{r}_k = P_k(\mathbf{r})$.

Далее для учета рельефа местности, получим для каждой точки структурно восстановленного изображения компоненту h вектора \mathbf{r} и выполним трехмерную кусочно-линейную аппроксимацию $T_k(\mathbf{r}_k)$ и $\hat{T}_k^{-1}(\mathbf{r})$.

Для определения высоты в каждой точке структурно восстановленного изображения строится равномерная решетка, шаг которой определяется размером пикселя ЦМР. В узлах решетки находится пересечение сканирующего луча с поверхностью Земли при помощи функции $\mathbf{g} = \mathbf{G}_{\text{ЦМР}}(m, n)$. Каждая такая операция является сложной в вычислительном отношении, но требования к точности ЦМР невысоки и при использовании ЦМР низкого разрешения операция трансформирования лишь незначительно увеличивает общее время обработки. Восстановленную при помощи билинейной интерполяции непрерывную функцию высоты обозначим $\tilde{H}(m, n)$. При заполнении высот в узлах решетки также определяются минимальная и максимальная высоты, которые необходимы для аппроксимации и обращения $T_k(\mathbf{r}_k)$.

При трехмерной кусочно-линейной аппроксимации функции $T_k(\mathbf{r}_k)$ в пространстве (m_k, n_k, h) формируется равномерная трехмерная прямоугольная сетка. Ячейки последней – прямоугольные параллелепипеды – разбиваются каждая на 6 треугольных пирамид (рис. 7). Размеры ячеек решетки определяются исходя из требуемой точности аппроксимации [11] с учетом того, что обработка предполагает еще последующую аппроксимацию $\hat{T}_k^{-1}(\mathbf{r})$. В узлах сетки по $T_k(\mathbf{r}_k)$ рассчитываются координаты в пространстве (m, n, h) . По этим узлам $T_k(\mathbf{r}_k)$ в пределах пирамид аппроксимируется трех-

мерными линейными функциями, и находятся обратные функции вида:

$$m_k = a_{ijc0} + a_{ijc1}m_k + a_{ijc2}n_k + a_{ijc3}h,$$

$$n_k = b_{ijc0} + b_{ijc1}m_k + b_{ijc2}n_k + b_{ijc3}h.$$

Эти функции используются для заполнения узлов трехмерной решетки в пространстве (m, n, h) при кусочно-линейной аппроксимации $\hat{T}_k^{-1}(\mathbf{r})$. Учитывая, что высота h является общей для (m_k, n_k, h) и (m, n, h) , можно существенно упростить задачу, выбрав шаг сеток по высоте одинаковым, минимальным из рассчитанных для аппроксимации $T_k(\mathbf{r}_k)$ и $\hat{T}_k^{-1}(\mathbf{r})$. Тогда узлы решетки для аппроксимации $T_k(\mathbf{r}_k)$, пересчитанные в (m, n, h) , будут лежать в тех же плоскостях, что и узлы решетки для аппроксимации $\hat{T}_k^{-1}(\mathbf{r})$, и расчет узлов трехмерной сетки сведется к расчету узлов двумерных треугольных сеток для каждого уровня высоты.

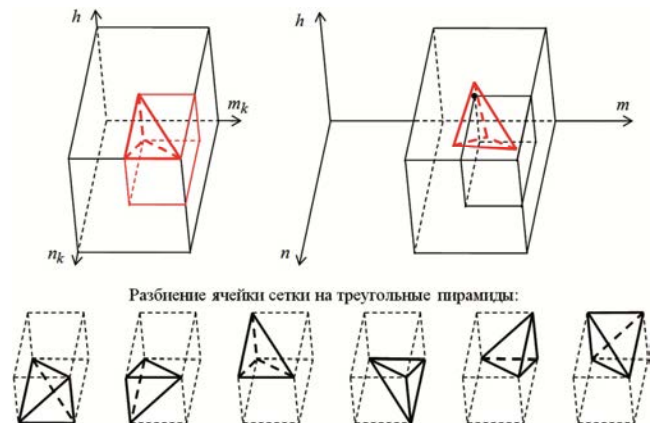
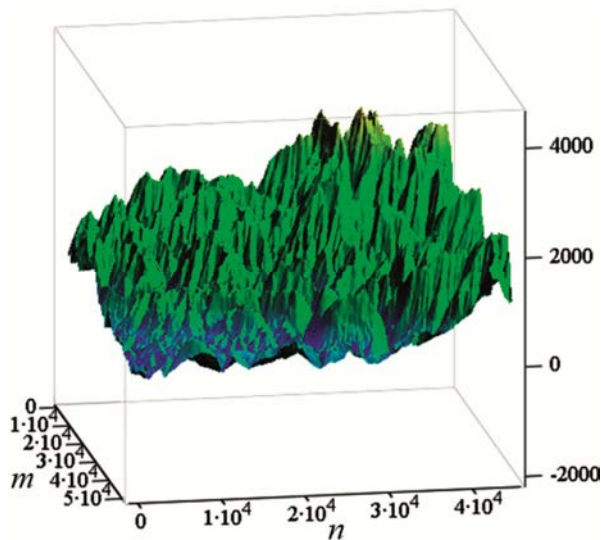
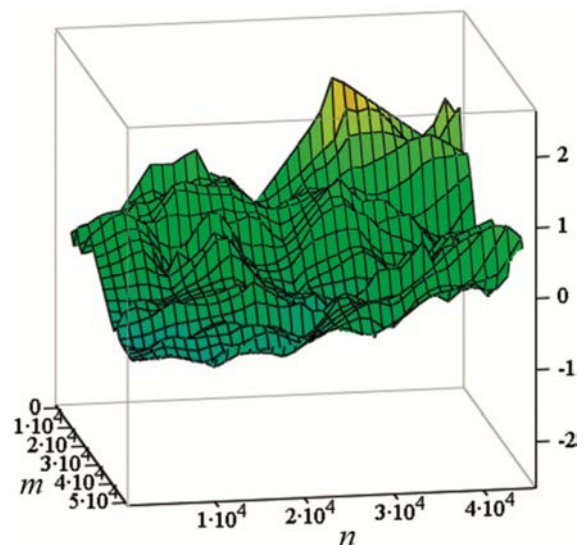


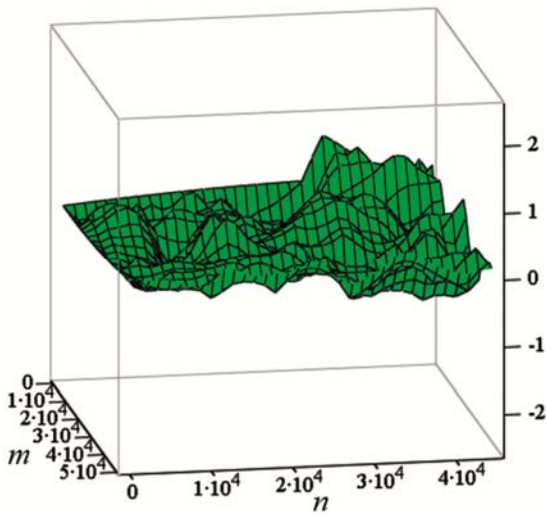
Рис. 7. Схема трехмерной аппроксимации функций геометрического соответствия сканов и структурно восстановленного изображения



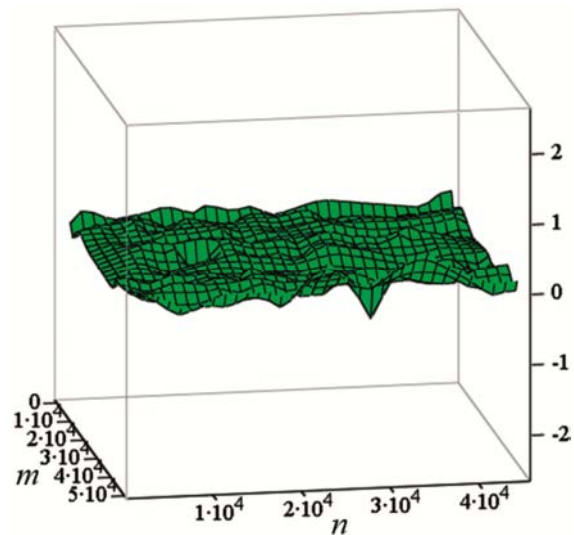
а) высота в плоскости структурно восстановленного изображения



б) ошибка совмещения без использования ЦМР



в) ошибка совмещения с использованием ЦМР с разрешением 30 угл. с



г) ошибка совмещения с использованием ЦМР с разрешением 3 угл. с

Рис. 8. Графики ошибок совмещения сканов в кадровом направлении

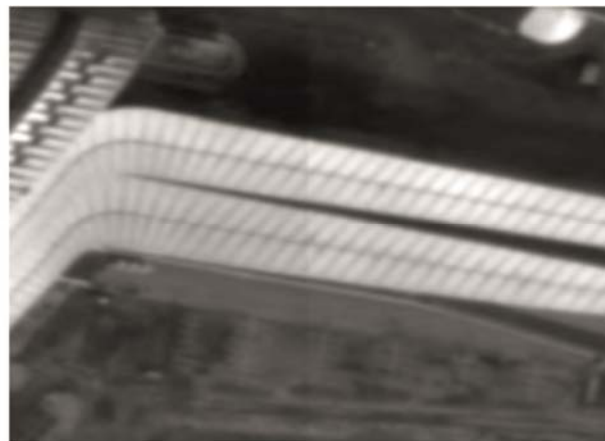
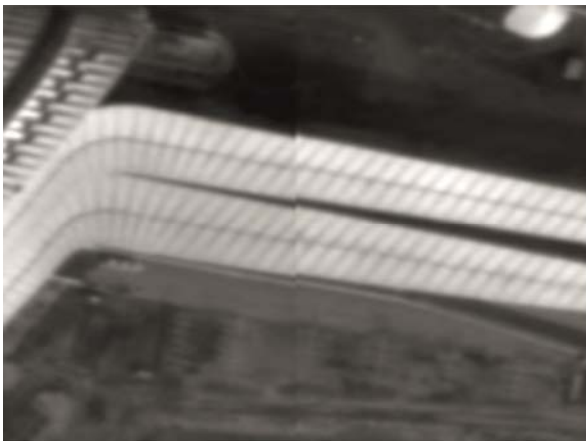


Рис. 9. Фрагменты структурно восстановленных изображений: слева – без ЦМР; справа – с ЦМР

При заполнении строки «сшитого» изображения для каждой точки (m, n) , дополненной высотой $\tilde{H}(m, n)$, определяется пирамида, в которую она попадает, и координаты исходного скана r_k .

На рис. 8 приведены графики ошибки совмещения сканов изображения от КА «Ресурс-П» в контрольных точках, иллюстрирующие эффект от привлечения ЦМР для структурного восстановления. Контрольные точки идентифицированы на соседних сканах при помощи корреляционно-экстремального анализа. Перепад высот в пределах снимка составляет 3192 м, среднеквадратическая ошибка совмещения в кадровом направлении равняется 0,57 пикселя без использования ЦМР и 0,15 пикселя при использовании ЦМР с разрешением 3 угл. с. Фрагмент этого снимка (вокзал «Олимпийский парк», г. Сочи), структурно восстановленного с использованием ЦМР и без использования ЦМР, приведен на рис. 9. Как видим, привлечение ЦМР дает более качественный результат структурного восстановления.

Заключение

Рассмотренный в работе алгоритм практически реализован в составе программного комплекса создания

стандартных продуктов по данным аппаратуры «Сангур» КА «Ресурс-П» №1 и №2. С 2013 г. этот программный комплекс успешно эксплуатируется в Научном центре оперативного мониторинга Земли, г. Москва. При этом отмечена одна важная особенность. Измерительная система спутника в ряде случаев не позволяет получить высокоточные данные об угловом движении КА. Это приводит к снижению точности строгой модели съемки и, как следствие, погрешности «сшивки» до 1–1,5 пикселя. Для выявления подобных ситуаций и организации высокоточной «сшивки» предлагается следующая технологическая схема (рис. 10).

В начале из набора сканов по строгой модели с использованием ЦМР формируется «сшитое» изображение. Для обеспечения высокой скорости обработки изображение формируется виртуально. Затем выполняется оценка точности «сшивки» на основе вычисления рассогласования координат одноименных объектов в общих частях сканов. Если среднеквадратическая ошибка совмещения $< 0,5$ пикселя, то изображение создается физически в памяти компьютера. Если точность совмещения сканов неудовлетворительная, то выполняется геодезическое ориентирование маршрутов съемки. При геодезическом ориентировании используют

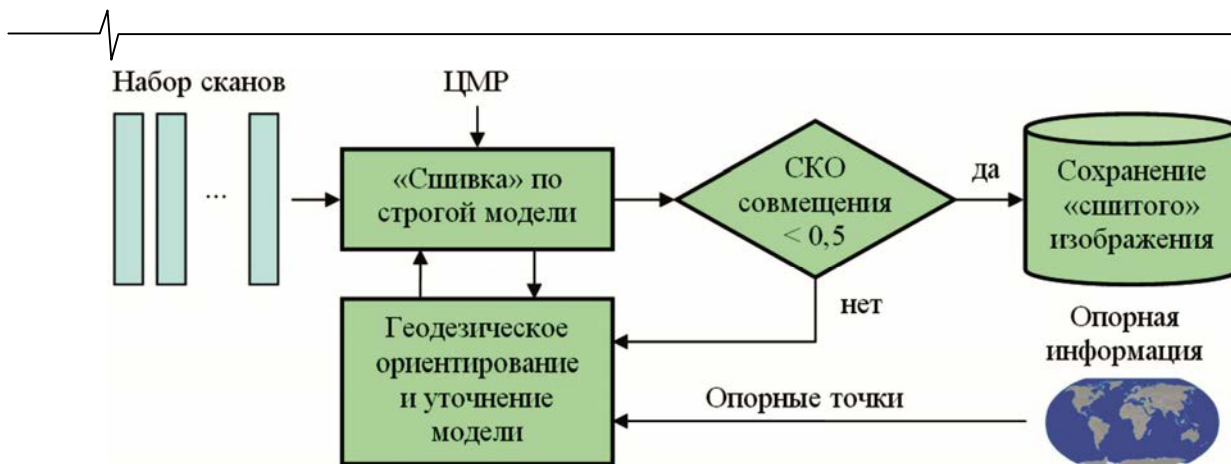


Рис. 10. Технологическая схема высокоточной «сшивки»

зуются опорные точки местности. По результатам ориентирования уточняется угловое движение КА и строгая модель съемки. Затем процесс «сшивки» повторяется, оценивается точность и синтезированное непрерывное изображение сохраняется.

Литература

1. Бакланов А.И. Системы наблюдения и мониторинга: учебное пособие / А.И. Бакланов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 234 с.
2. Tang, X.; Hu, F.; Wang, M.; Pan, J.; Jin, S.; Lu, G. Inner FoV Stitching of Spaceborne TDI CCD Images Based on Sensor Geometry and Projection Plane in Object Space. *Remote Sens.* 2014, 6, 6386–6406.
3. Weican Meng, Shulong Zhu, Baoshan Zhu, Shaojun Bian The research of TDI-CCDs imagery stitching using information mending algorithm. *Proc. SPIE 8908, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2013: Imaging Sensors and Applications, 89081C* (August 21, 2013); doi:10.1117/12.2033285.
4. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли под ред. В.В. Еремеева М., Физматлит, 2015
5. Кузнецов П.К., Мартемьянов Б.В., Скирмунт В.К., Семавин В.И. Методика высокоточной сшивки изображений, получаемых при съемке обстановки многоматричным сканирующим оптико-электронным преобразователем // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки.* 2011. № 3 (32). С. 69–81.
6. Гомозов О.А., Кузнецов А.Е., Лось В.В., Пресняков О.А. Структурное восстановление изображений, формируемых многоматричными сканирующими датчиками. // *Методы и устройства формирования и обработки сигналов в информационных системах. Межвуз. сб. науч. тр.* Рязань: РГРТА, 2004. С. 88–96.
7. Гомозов О.А., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Лось В.В., Пресняков О.А., Соловьева К.К. Алгоритмы и технологии обработки информации от КА «Ресурс-ДК». Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 69–76.
8. Воронин Е. Г. Метод и результаты геометрической сшивки оптико-электронных космических снимков // *Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли: Материалы научн.-техн. конф. - М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, Филиал ФГУП «ГНПРКЦ ЦСКБ-Прогресс» – НПП «ОПТЭК», 2013. С. 256–266.*
9. Eremeev V., Kuznetsov A., Myatov G., Presnyakov O., Poshekhonov V., Svetelkin P. Image structure restoration from sputnik with multi-matrix scanners. *Proc. SPIE 9244, Image and Signal Processing for Remote Sensing XX, 92440F* (October 15, 2014); doi:10.1117/12.2066631
10. Еремеев В.В. Методы и информационные технологии межотраслевой обработки многозональных космических изображений: дис. док. техн. наук. – Рязань: РГРТА, 1997. – 312 с.
11. Shewchuk J. What is a good linear finite element? *Interpolation, conditioning, anisotropy and quality measures*, 2003, Technical report, CS, UC Berkeley.

Уважаемые коллеги!

Для тех, кто не успел оформить подписку на второе полугодие 2015 года через ОАО «Роспечать», сохраняется возможность приобретения журналов непосредственно в редакции по адресу: г. Москва, ул. Авиамоторная, дом 8, Научный Центр МТУСИ, ком. 612. Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи им. А.С. Попова, метро «Авиамоторная», или оформить Заказ в соответствии с требованиями, выставленными на сайте журнала: www.dsra.ru.

Справки по телефонам: (8-495) 362-42-75; (+7 903) 221-79-79 (Алексеева Любовь Ильинична).

E-mail: ntores@mail.ru