

Методика уточнения параметров строгой модели РСА по данным, полученным в результате автоматического поиска ключевых точек на оптическом и радиолокационном изображении

Б. С. Савченко

*Московский физико-технический институт (НИИУ)
Долгопрудный, Московская обл., 141700, Россия
E-mail: savchenko.bs@phystech.edu
АО «Фирма «РАКУРС», Москва, 129366, Россия*

Современные радиолокационные системы с синтезированной апертурой (РСА) имеют большое значение в различных сферах, таких как мониторинг окружающей среды, военное наблюдение и гражданские приложения. Тем не менее, несмотря на значительные успехи в области технологий и обработки данных, многие из этих систем всё ещё сталкиваются с трудностями, связанными с точностью определения положения космического аппарата в момент съёмки, а также с определением времени и наклонной дальности до отдельных элементов радиолокационного изображения (РЛИ). Эти параметры представляются ключевыми при осуществлении геометрической трансформации РЛИ при формировании информационных продуктов второго уровня обработки. Наличие аппаратных ошибок в определении этих параметров приводит к ошибкам при расчёте наземных координат элементов снимка. Получение уточнённой информации об эфемеридах платформы зачастую занимает несколько дней. В таких условиях актуальной задачей становится разработка методики автоматического уточнения параметров строгой модели РСА с использованием опорных изображений, полученных в оптическом диапазоне. В работе приведено описание методики автоматического уточнения параметров строгой модели РСА по опорным оптическим данным. Дано обоснование преобразованию оптического опорного изображения в проекцию наклонной дальности с использованием строгой модели РСА из метаданных РЛИ. Приведён алгоритм перевода изображения из картографической проекции в проекцию наклонной дальности. Для поиска ключевых точек в работе предложено использование алгоритмов SIFT (*англ.* Scale-Invariant Feature Transform) и RANSAC (*англ.* Random Sample Consensus). Представлена модификация в решающем правиле отбора точек-кандидатов в зависимости от режима съёмки. Описана методика анализа пар соответствующих друг другу ключевых точек для определения ошибки по времени и по дальности. Полученные значения ошибок позволяют осуществить коррекцию параметров строгой модели РСА. Предложенная в работе методика реализована в виде программного комплекса. В рамках работы было осуществлено тестирование комплекса на реальных данных. По результатам эксперимента сделан вывод о существенном улучшении качества привязки итоговых РЛИ уровня обработки 2В1, полученных путём орторектификации уточнённого автоматическим методом РЛИ уровня 1А.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, уточнение геопривязки, «Кондор-ФКА», «Кондор-Э»

Одобрена к печати: 13.03.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-42-52

Введение

Радиолокационное изображение (РЛИ) первого уровня обработки представляет собой растр с комплексным типом данных в проекции наклонной дальности (ПНД). Кроме самого раstra продукт первого уровня обработки содержит метаданные. В метаданных указывается информация о положении космического аппарата (КА) в момент осуществления съёмки, характерных параметрах радиолокатора с синтезированной апертурой (РСА), режиме съёмки, времени начала съёмки, наклонной дальности до ближайшего пикселя и других параметрах. Для получения продукта второго уровня обработки РЛИ из ПНД с использованием информации, указанной в метаданных, переводится в картографическую проекцию (Денисов

и др., 2015). Операция преобразования РЛИ из ПНД в картографическую проекцию без учёта локальных возвышений рельефа над опорным эллипсоидом называется геокодированием. Операция преобразования, учитывающая локальные возвышения рельефа, называется орторектификацией.

При реализации цели геокодирования или орторектификации решается задача нахождения геодезических координат точки на поверхности Земли для каждой точки РЛИ в путевой системе координат (Верба и др., 2010). Геодезические координаты точки находятся на пересечении так называемого доплеровского конуса (сферы равной дальности от платформы-носителя РСА) и эллипсоида (или сферы), представляющего собой приближённую модель Земли. Доплеровский конус формируется направлением от платформы РСА к точкам с равными доплеровскими частотами. Точность решения этой задачи во многом зависит от точности определения положения КА в момент съёмки, векторов скорости и ускорения КА, привязки навигационной информации КА ко времени.

Исследования влияния ошибок навигационных параметров КА на точность измерения координат целей показали, что в первом приближении ошибки измерения пространственного положения цели примерно равны ошибкам измерения положения центра масс КА на орбите. Дополнительные ошибки измерения координат цели возникают вследствие неточности знания скорости относительного движения КА, причём влияние отдельных составляющих вектора скорости существенно различно. Анализ влияния неточности установки радиотехнических параметров РСА X-диапазона на погрешность измерения координат показал, что при выполнении условий к стабильности частоты опорного генератора максимальная величина смещения координаты дальности не превысит 3 м, а смещением азимутальной координаты можно пренебречь. Ошибка определения вектора скорости КА приводит к сдвигу положения цели по азимуту, поскольку возникает неучтённый доплеровский сдвиг частоты. Для РСА X-диапазона при ошибке определения радиальной составляющей скорости КА в 0,1 м/с ошибка измерения азимутальной координаты цели составит порядка 11 м.

Для современных РСА в рамках технического задания выдвигаются требования к точности привязки. Для аппаратов в составе космической системы (КС) «Кондор-ФКА» допустимая ошибка привязки РЛИ к топографическим координатам в детальном прожекторном и непрерывном режимах при отсутствии реперных точек должна составлять 30–90 м, а при их наличии — 10–30 м (Руководство..., 2023). Существующий на практике алгоритм привязки РЛИ к топографическим координатам с использованием информации о реперных точках предполагает участие оператора и интерактивное задание координат для выбранных реперных точек. В условиях работы с большими объёмами данных актуальной является задача автоматизации этого процесса.

Предварительная подготовка данных для автоматического поиска ключевых точек

При наличии в доступе глобального оптического покрытия с требуемым пространственным разрешением возможно его использование в качестве опорных данных. Также в качестве опорных могут быть использованы оптические снимки, полностью покрывающие зону, по которой была осуществлена радиолокационная съёмка. Точность геометрической привязки опорного оптического изображения должна на порядок превышать точность представления баллистических данных и быть достаточной для выполнения требований к космической системе в части привязки РЛИ.

При условии выполнения этих требований для поиска соединительных точек предлагается использовать алгоритм, представленный на *рис. 1* (см. с. 44). Под соединительными точками понимается пара соответствующих друг другу ключевых точек на оптическом снимке и РЛИ.

На первом этапе необходимо определить область, для которой требуется получить опорную оптическую информацию. Для этого осуществляется процедура прямого геокодирования

угловых точек входного изображения на среднюю высоту, полученную из метаданных снимка. На *рис. 2* приведён пример определения координат области для загрузки опорного оптического снимка.



Рис. 1. Алгоритм автоматического поиска соединительных точек на РЛИ и оптическом опорном снимке

Красной рамкой отмечены границы РЛИ, полученные в результате прямого геокодирования исходного РЛИ на среднюю высоту. Чёрной линией указана определённая по результатам геокодирования исходного РЛИ на среднюю высоту область, по которой будет осуществлена загрузка опорного оптического снимка. Красной штриховой линией отмечены эталонные границы геометрически привязанного РЛИ. Как видно из *рис. 2*, с увеличением ошибки привязки область пересечения РЛИ и оптического снимка снижается. В случае, когда значения ожидаемых ошибок смещения стремятся к половине размеров РЛИ по широте или длине, эффективность работы автоматических алгоритмов поиска соединительных точек сильно снижается.

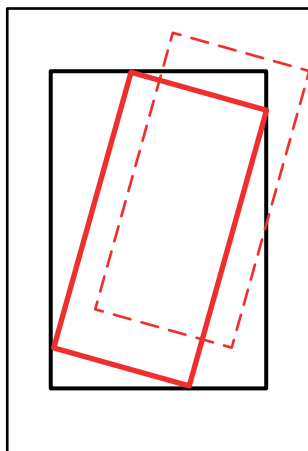


Рис. 2. Пример определения координат области для загрузки опорного оптического снимка

После определения координат области интереса осуществляется загрузка оптического опорного изображения из доступных источников. Если рассмотреть возможность совмещения РЛИ и опорного оптического изображения в картографической проекции, то полученные в результате поиска ключевые точки не будут учитывать вклад рельефа. В таком случае смещение будет меняться в зависимости от высоты найденных точек и рассчитанное среднее смещение не будет корректным. Совмещение же орторектифицированных изображений осложнено тем, что для орторектификации РЛИ необходимо получить цифровую модель рельефа (ЦМР), а координаты области для её загрузки (как и в случае с оптической подложкой) будут определены с некоторым смещением. При этом преобразование оптического изображения в ПНД производится с использованием ЦМР, загруженной с точностью, соответствующей точности привязки опорного оптического изображения, что позволяет исключить ошибку, связанную с высотой.

Таким образом, для осуществления операции поиска соединительных точек снимки должны находиться в одной проекции, с одним межпиксельным расстоянием и растровыми размерами. Также это позволит повысить эффективность работы алгоритмов поиска ключевых точек, поскольку в ПНД смещения могут иметься лишь по двум осям — азимуту и дальности. Преобразование оптического опорного изображения из картографической проекции в ПНД осуществляется посредством операции обратного геокодирования с использованием строгой модели РСА из метаданных РЛИ.

Операция обратного геокодирования позволяет для каждой точки на регулярной геодезической координатной сетке определить момент времени t_s и эфемериды КА на момент получения этой точки. Высота для точки определяется из открытой ЦМР Copernicus. Зная эфемериды КА на момент времени t_s , можно определить наклонную дальность до заданной на поверхности Земли точки. Далее, по наклонной дальности и времени определяются файловые (пиксельные) координаты элемента в ПНД. Для преобразования оптического изображения из картографической проекции в ПНД предлагается следующий алгоритм:

Algorithm1. Алгоритм преобразования оптического изображения из картографической проекции в ПНД

Вход:

SAR — РЛИ в ПНД;
 OPT — оптическое изображение в картографической проекции;
 DEM — ЦМР;

 SAR_metadata — метаданные РЛИ;
 OPT_metadata — метаданные оптического изображения.

Выход:

OPT_PND — оптическое изображение в ПНД.

procedure GeoToSlant(SAR, OPT, SAR_metadata, OPT_metadata)

WidthSAR $\leftarrow$ GetWidth(SAR_metadata)
 HeightSAR $\leftarrow$ GetHeight(SAR_metadata)

Geocoords_Opt $\leftarrow$ GetGeocoords(OPT_metadata)
 MinLon $\leftarrow$ GetMinLon(Geocoords_Opt)
 MaxLon $\leftarrow$ GetMaxLon(Geocoords_Opt)
 MinLat $\leftarrow$ GetMinLat(Geocoords_Opt)
 MaxLat $\leftarrow$ GetMaxLat(Geocoords_Opt)

PixelSizeLon $\leftarrow$ GetPixelSizeLon(OPT_metadata)
 PixelSizeLat $\leftarrow$ GetPixelSizeLat(OPT_metadata)

for lat $\in$ [MaxLat, MinLat] **do**

for lon $\in$ [MinLon, MaxLon] **do**

 HeightDEM $\leftarrow$ GetHeight(DEM, lat, lon)

 Rsl, time $\leftarrow$ ReverseGeocoding(lat, lon, HeightDEM)

 I, J $\leftarrow$ CalculateFileCoords(Rsl, time)

if I $\geq$ 0 **and** J $\geq$ 0 **and** I < WidthSAR **and** J < HeightSAR **then**

 OPT_PND[I, J] $\leftarrow$ OPT[

 (lat – MinLat) // PixelSizeLat,

 (lon – MinLon) // PixelSizeLon

]

```

    end if
    lon ← lon + PixelSizeLon
  end for
  lat ← lat – PixelSizeLat
end for
return OPT_PND
end procedure

```

Пример результатов преобразования оптического опорного РЛИ в ПНД представлен на *рис. 3*.

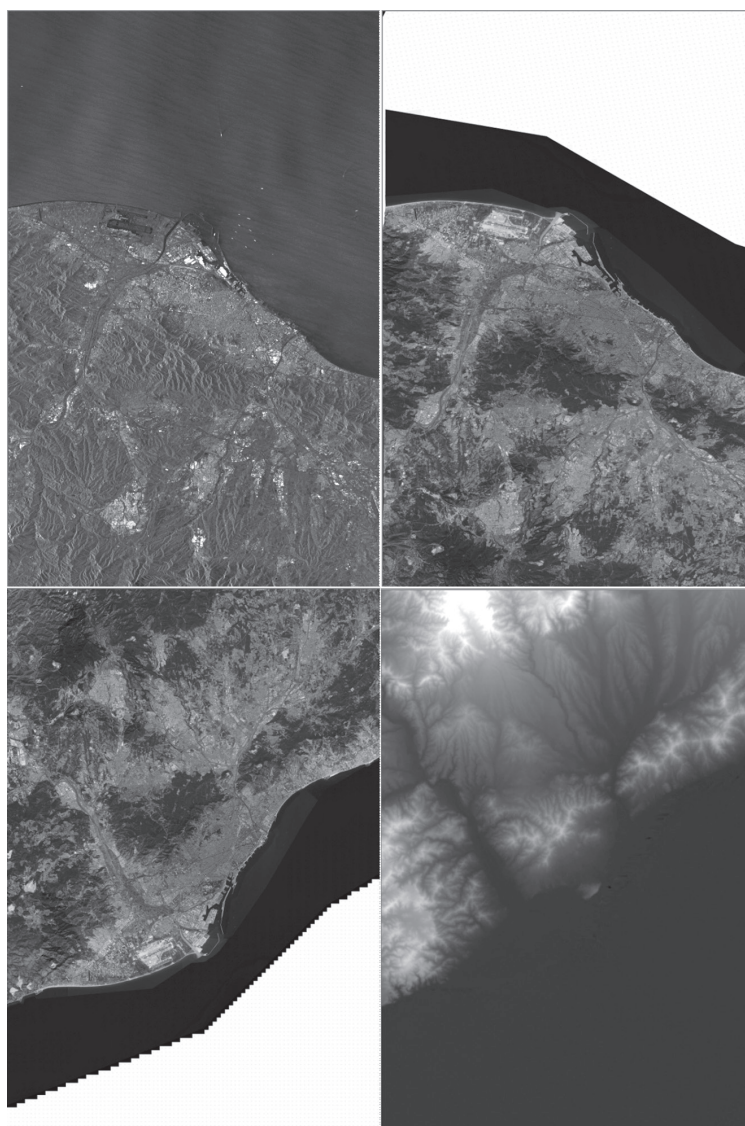


Рис. 3. Пример результатов преобразования оптического опорного изображения в ПНД: исходное РЛИ (*вверху слева*); оптическое изображение, преобразованное в ПНД (*вверху справа*); исходное оптическое изображение в картографической проекции (*внизу слева*); ЦМР, полученная для оптического изображения (*внизу справа*)

Методика автоматического поиска соединительных точек

При наличии двух снимков с единым межпиксельным расстоянием и растровыми размерами можно перейти к решению задачи поиска соединительных точек на снимках.

Поиск на снимках ключевых точек проводится с помощью специализированных операторов-детекторов точек. Наиболее известные детекторы ключевых точек — SIFT (*англ.* Scale-Invariant Feature Transform) и SURF (*англ.* Speeded-Up Robust Features). Алгоритм SIFT включает два основных этапа: выделение ключевых точек и описание этих точек дескрипторами (Lowe, 2004). На первом этапе к изображению применяется фильтр Гаусса с различным размером окна свёртки и радиусом размытия. По полученным отфильтрованным снимкам строится пирамида гауссианов и пирамида их разности (*рис. 4*).

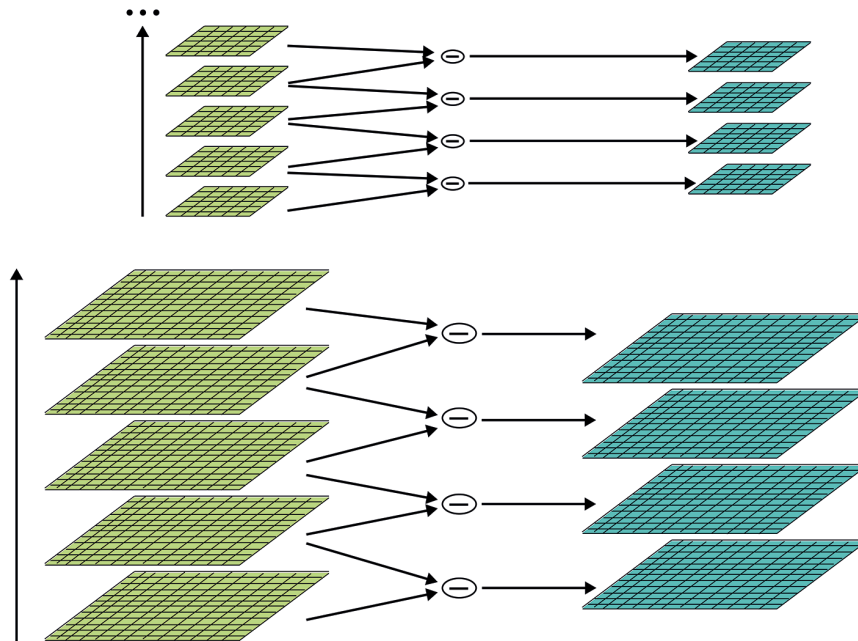


Рис. 4. Схема построения пирамиды отфильтрованных по Гауссу изображений и их разностей в алгоритме SIFT

На следующем этапе на каждом слое пирамиды разности ищутся точки с локальными экстремумами. Если значение точки превышает значение других точек в пределах анализируемой области текущего слоя и на двух соседних уровнях пирамиды, то эта точка является точкой экстремума. Далее проводится проверка пригодности точек экстремума на роль ключевых. Для оставшихся точек строится дескриптор, представляющий собой набор градиентов в окрестности точки. Схема вычисления дескриптора изображена на *рис. 5* (см. с. 48).

Далее с помощью специального алгоритма RANSAC (*англ.* Random Sample Consensus) (Bolles, Fischler, 1981) на основе датчика случайных чисел проводится сопоставление пар дескрипторов двух снимков и вычисление так называемой фундаментальной матрицы преобразования пары снимков так, чтобы наибольшее число пар ключевых точек лежало в пределах заданного допуска при преобразовании с использованием вычисленной матрицы. Методика сопоставления ключевых точек изображений для определения, являются ли они соединительными, представлена в работе (Проценко, Павельева, 2021).

Изображения, преобразованные ПНД, могут иметь смещения друг относительно друга исключительно по азимуту и дальности, но в практике встречаются снимки с внутренними геометрическими искажениями. Такие искажения зачастую связаны с особенностями синтеза РЛИ и особенно проявляются при прожекторном режиме съёмки. Для учёта этих особенностей предлагается установить правило фильтрации найденных точек. Согласно ему, пара соединительных точек будет исключена, если отношение сдвигов по азимуту и по дальности для этой пары точек превышает наиболее часто встречающееся значение на заданную величину. Для прожекторного режима съёмки максимальная несогласованность найденных пар принята равной 24 пикселя, для маршрутного режима — 12 пикселей. Фрагменты изображений с автоматически найденными точками приведены на *рис. 6* (см. с. 48).

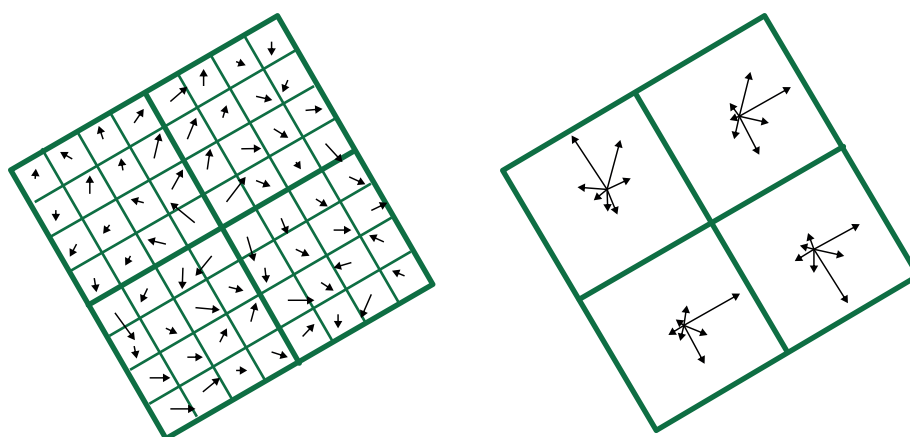


Рис. 5. Схема вычисления дескриптора

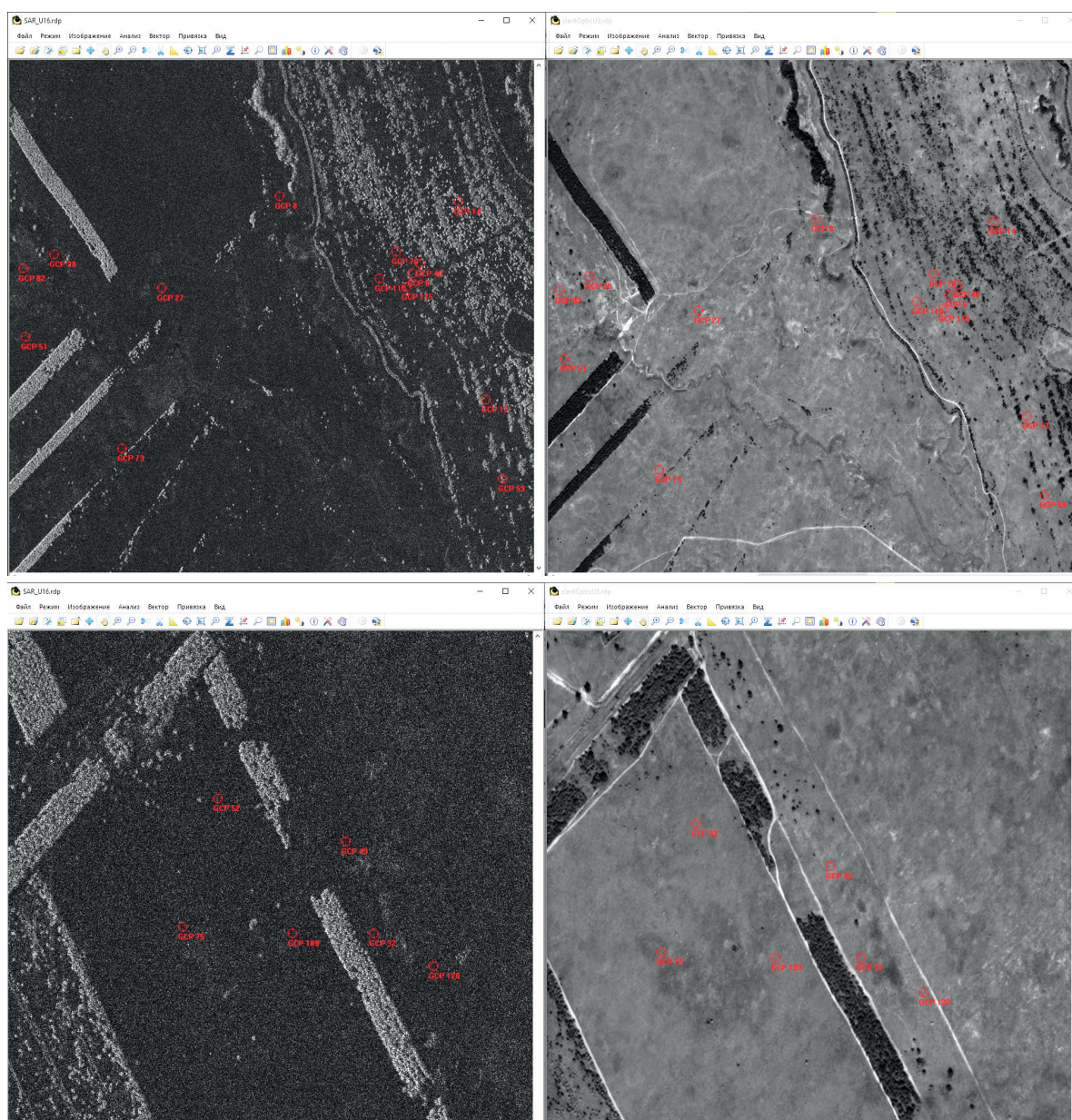


Рис. 6. Фрагменты изображений с автоматически найденными точками:
РЛИ в ПНД (слева), оптическое изображение в ПНД (справа)

Методика коррекции параметров строгой модели РСА

Знание файловых координат соединительных точек, найденных на предыдущем этапе, даёт возможность осуществить коррекцию начального времени и дальности до ближайшего пикселя. Величину ошибки по дальности можно рассчитать согласно формуле:

$$\Delta_{range} = \frac{\text{PixelSpacing} \sum_{i=0}^n x_{sar} - x_{opt}}{n},$$

где Δ_{range} — ошибка по дальности; PixelSpacing — межпиксельное расстояние по дальности; n — количество пар найденных соединительных точек; x_{sar} — номер точки в строке цифрового РЛИ (файловые координаты точки по дальности); x_{opt} — номер точки в строке цифрового оптического изображения (файловые координаты точки по дальности).

Расчёт ошибки по времени представлен в формуле:

$$\Delta_{time} = \frac{\text{LineSpacing} \sum_{i=0}^n y_{sar} - y_{opt}}{\text{linearVp} \cdot n},$$

где Δ_{time} — ошибка по времени; LineSpacing — межпиксельное расстояние по азимуту; linearVp — приведённая скорость КА; y_{sar} — номер строки в цифровом РЛИ (файловые координаты точки по азимуту); y_{opt} — номер строки в цифровом оптическом изображении (файловые координаты точки по азимуту).

На значение полученной ошибки корректируется исходная информация о дальности и начальном времени. При дальнейшей обработке РЛИ до второго уровня следует пользоваться уже скорректированными значениями.

Анализ полученных результатов

Для оценки эффективности предложенной методики были обработаны четыре РЛИ, полученных КС «Кондор-Э» на территорию Качалинского полигона (Волгоградская область) в детальном непрерывном режиме. Опорная информация взята из открытого источника — NASA Worldwind. Информация о высоте была получена из публично доступной ЦМР Copernicus. Точность геопривязки исходных снимков, согласно требованиям к КС «Кондор-Э» (как и к КС «Кондор-ФКА»), должна быть не хуже 90 м. После того, как все снимки были обработаны согласно предложенной методике, был проведён анализ качества привязки итоговых РЛИ уровня обработки 2В1, полученных путём орторектификации РЛИ уровня 1А с параметрами строгой модели, уточнёнными автоматическим методом. На *рис. 7* на опорном оптическом покрытии отмечены контрольные точки, относительно которых считалась невязка на РЛИ. Точки для анализа выбирались вручную по всему периметру оптической подложки. Если отметка от точки при наложении РЛИ на подложку попадала в границы снимка, то по ней считалась невязка. Далее, производился расчёт среднего значения невязки и среднеквадратического отклонения ошибки (СКО).



Рис. 7. Распределение снимков и контрольных точек

В таблице приведён расчёт невязки для выбранных контрольных точек. Прочерк в таблице говорит о том, что данная контрольная точка находится за границами РЛИ и не участвует в расчёте СКО. Если полученные ошибки привязки смещены в разные стороны, это может говорить о внутренних геометрических искажениях РЛИ. При отсутствии таких проблем ошибки будут смещены в одном направлении.

Результаты анализа геометрической привязки РЛИ относительно выбранных контрольных точек

Точка, №	Невязка, м			
	Снимок № 1	Снимок № 2	Снимок № 3	Снимок № 4
1	5,65	—	—	—
2	8,57	2,69	2,23	
3	9,75	—	—	
4	4,74	4,90	—	
5	6,74	—	8,49	7,15
6	10,13	4,20	8,68	6,69
7	8,16	2,47	—	—
8	7,46	4,01	5,56	2,61
9	2,19	—	6,07	2,16
10	8,53	3,59	3,95	6,69
11	—	1,39	—	—
12	8,05	2,13	7,30	5,03
13	8,94	2,96	—	—
14	5,83	5,75		
15	6,55	8,78	7,75	9,01
16	—	—	9,77	9,24
17			8,77	5,02
18			—	3,73
19				—
20				
21				
22		6,20	4,36	7,79
23		—	—	—
24				
25				
Среднее	7,24	4,09	6,63	5,92
СКО	2,06	1,98	2,27	2,30

Усреднённое значение ошибки геопривязки четырёх продуктов уровня 2В1 в детальном непрерывном режиме после автоматического уточнения составило 5,97 м, СКО = 2,15 м.

Заключение

В представленной работе рассматриваются вопросы обеспечения качества геометрической привязки РЛИ в условиях, когда метаданные продукта уровня 1А содержат недостаточно точную информацию о начальном времени съёмки и наклонной дальности до ближайшего пикселя.

Предложена методика автоматического уточнения параметров строгой модели РСА. Рассмотрены составляющие методики — набор операций автоматической обработки вход-

ных данных, позволяющий определить величину невязки РЛИ по отношению к опорному оптическому снимку. В работе предложен алгоритм автоматического преобразования оптического изображения в ПНД, позволяющий согласовать межпиксельное расстояние и растровые размеры РЛИ и оптического изображения. Использование этого подхода позволяет значительно упростить операцию поиска соединительных точек, поскольку в ПНД смещения могут иметься лишь по двум осям — азимуту и дальности. К тому же совмещение снимков в ПНД позволяет исключить вклад высоты в ошибку определения смещений для пар найденных соединительных точек. Для поиска ключевых точек в работе предложено использование алгоритмов SIFT и RANSAC. Представлена модификация в решающем правиле отбора точек-кандидатов в зависимости от режима съёмки. Алгоритм показывает лучшие результаты при обработке снимков, содержащих искусственные объекты (дома, дороги и др.). Также на эффективности работы алгоритма может отразиться различие в погодных условиях между снимками, полученными в радиолокационном и оптическом диапазонах, и времени года.

Поставленный в рамках исследования эксперимент позволил повысить качество геометрической привязки четырёх продуктов уровня 2В1, полученных путём орторектификации уточнённых автоматическим методом РЛИ, до 5,97 м. Таким образом, экспериментальные исследования подтвердили, что предложенная методика позволяет обеспечить требования к точности определения координат наземных объектов на РЛИ КС «Кондор-Э» уровня обработки 2В1 в автоматическом режиме, без участия оператора.

Литература

1. *Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
2. *Денисов П. В., Елизаветин И. В., Зайцев С. Э., Костюк Е. А., Трошко К. А.* Информационные продукты на основе данных космической системы радиолокационного наблюдения «Кондор-ФКА» // 13-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: тез. докл. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 556.
3. *Проценко М. А., Павельева Е. А.* Сопоставление ключевых точек изображений методом фазовой конгруэнтности // Приклад. математика и информатика. 2021. Т. 67. С. 40–49.
4. Руководство пользователя данными дистанционного зондирования Земли, получаемыми космической системой «Кондор-ФКА». Версия 1. АО «ВПК «НПО машиностроения», 2023. 112 с.
5. *Bolles R. C., Fischler M. A.* Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography // Communications of the ACM. 1981. V. 24. No. 6. P. 381–395. DOI: 10.1145/358669.358692.
6. *Lowe D. G.* Distinctive image features from scale-invariant keypoints // Intern. J. Computer Vision. 2004. V. 60. P. 91–110. DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.

Methodology for refining parameters of the strict SAR model using data from automatic keypoint matching between optical and radar images

B. S. Savchenko

*Moscow Institute of Physics and Technology
Dolgoprudny, Moscow Region 141700, Russia
E-mail: savchenko.bs@phystech.edu
JSC Racurs, Moscow 129366, Russia*

Modern synthetic aperture radar (SAR) systems are crucial in various fields, including environmental monitoring, military surveillance and civil applications. However, despite significant advances in technology and data processing, many of these systems still face problems with the precision

of determining the spacecraft position at the time of imaging, as well as determining the time and slant range to individual elements of the radar image (RI). These parameters are key when performing geometric transformation of RIs to form Level 2 processed information products. Hardware errors in determining these parameters lead to errors in calculating the ground coordinates of image elements. Obtaining refined information about the platform ephemeris often takes several days. In such conditions, a relevant task is to develop a methodology for automatic refinement of SAR rigorous model parameters using reference images obtained in the optical range. This paper describes a methodology for automatic refinement of SAR rigorous model parameters using reference optical data. A rationale is provided for transforming the optical reference image into a slant range projection (SRP) using the SAR rigorous model from the RI metadata. An algorithm for converting the image from a cartographic projection to SRP is presented. For keypoint detection, the use of SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) and RANSAC (Random Sample Consensus) algorithms is proposed. A modification in the decision rule for selecting candidate points depending on the imaging mode is proposed. A method for analyzing pairs of matching keypoints to determine the error in time and range is described. The resulting error values allow for correction of the SAR rigorous model parameters. The methodology proposed in this paper is implemented as a software package. The package was tested on real data. The experimental results demonstrate a significant improvement in the quality of georeferencing of the final RIs processed to Level 2B1, obtained by orthorectification of the refined RI of Level 1A performed via the automatic method.

Keywords: synthetic aperture radar, georeference correction, Kondor-FKA, Kondor-E

Accepted: 13.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-2-42-52

References

1. Verba V. S., Neronskii L. B., Osipov I. G., Turuk V. E., *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-borne Earth surveillance radar systems), Moscow: Radiotechnics, 2010, 680 p. (in Russian).
2. Denisov P. V., Elizavetin I. V., Zaitsev S. E., Kostyuk E. A., Troshko K. A., Information products of the data of the space complex of radar surveillance Kondor-FKA, *13-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa": tez. dokl.* (13th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space": Abstracts), Moscow: IKI RAS, 2015, p. 556 (in Russian).
3. Protsenko M. A., Pavel'eva E. A., Image key point matching by phase congruency, *Computational Mathematics and Modeling*, 2021, V. 32, pp. 297–304, DOI: 10.1007/s10598-021-09532-z.
4. *Rukovodstvo pol'zovatela dannymi distantsionnogo zondirovaniya Zemli, poluchaemymi kosmicheskoi sistemoi "Kondor-FKA"* (User's Guide to Earth remote sensing data received by the Kondor-FKA space system), V. 1, JSC "VPK "NPO mashinostroeniya", 2023, 112 p. (in Russian).
5. Bolles R. C., Fischler M. A., Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography, *Communications of the ACM*, 1981, V. 24, No. 6, pp. 381–395, DOI: 10.1145/358669.358692.
6. Lowe D. G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *Intern. J. Computer Vision*, 2004, V. 60, pp. 91–110, DOI: 10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.