

ТЕХНОЛОГИИ ВЫСОКОТОЧНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ И ВЫСОКОУРОВНЕВОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2025

В. А. Ушенкин

кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник
НИИ обработки аэрокосмических изображений (НИИ «Фотон»);
Рязанский государственный радиотехнический
университет имени В.Ф. Уткина;
foton@rsreu.ru

Решается задача автоматического обеспечения высокоточной привязки радиолокационных космических изображений. Рассматриваются три варианта решения задачи: 1) путём фокусировки радиоголограмм с учётом калибровочных данных, содержащих поправки к измерениям угловой ориентации антенны радиолокатора в ходе съёмки; 2) путём автофокусировки радиоголограмм с уточнением значений доплеровского центроида и смещения шкалы быстрого времени (наклонной дальности); 3) путём корреляционно-экстремального совмещения радиолокационных и опорных изображений с уточнением траектории движения фазового центра антенны радиолокатора в ходе съёмки. Уменьшение погрешности геодезической привязки до величины, сопоставимой или не превышающей размер проекции пикселя изображения на земную поверхность, позволяет существенно упростить высокоуровневую обработку наборов разновременных радиолокационных изображений. Рассмотрены вопросы совмещения радиолокационных изображений при их высокоуровневой обработке на основе строгой геометрической модели и корреляционно-экстремального совмещения радиолокационных и оптических изображений при их комплексировании. Приведены результаты экспериментальных исследований в части оценки точности совмещения радиолокационных и оптических изображений. Визуальный контроль и полученная верхняя граница численной оценки погрешностей подтверждают пиксельную точность совмещения.

Радиолокационное космическое изображение; радиолокатор с синтезированной апертурой антенны; геодезическая привязка; высокоуровневая обработка; совмещение

Цитирование: Ушенкин В.А. Технологии высокоточной автоматической привязки и высокоуровневой обработки радиолокационных космических изображений // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2025. Т. 24, № 2. С. 74-86. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-74-86

Введение

Точность геодезической привязки является одной из основных характеристик материалов космического дистанционного зондирования Земли, в том числе изображений, формируемых космическими радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны. В оптических системах основными факторами, ограничивающими точность привязки изображений, являются погрешности измерения направления визирования, включающие погрешности измерения угловой ориентации космического аппарата (внешние элементы ориентирования) и погрешности знания конструктивных и установочных углов съёмочной аппаратуры (внутренние элементы ориентирования) [1]. В радиолокационных системах бокового обзора с синтезом апертуры антенны требования к точности измерения углов снижаются. Привязка изображений основана на измерении наклонной дальности на траверзе и эффекте Доплера с учётом знания орбитального движения космического аппарата [2]. Знание угловой ориентации требуется при привязке лишь для разрешения азимутальной неоднозначности, период которой обычно составляет десятки километров в пересчёте на земную поверхность. Основное использование угловой ориентации в радиолокации осуществляется при синтезе изображения из радиоголограммы и последующей радиометрической коррекции [3]. Эффект Допле-

ра после разрешения азимутальной неоднозначности позволяет с высокой точностью привязать изображение при отсутствии ошибок измерения дальности, временных шкал и орбитального движения космического аппарата. Потенциально достижима привязка радиолокационного изображения с ошибкой, не превышающей шаг пикселя, что также подтверждается характеристиками зарубежных радиолокационных космических аппаратов. Это позволяет выполнять геометрическое совмещение разновременных радиолокационных изображений при их высокоуровневой обработке по строгой модели, без использования корреляционных методов.

Цель настоящей работы – разработка технологий высокоточной автоматической привязки радиолокационных изображений при различной точности измерительной информации, сопровождающей целевые данные. Также рассматривается вопрос совмещения качественно привязанных разновременных радиолокационных изображений при высокоуровневой обработке: по строгой модели при пиксельной точности совмещения и с дополнительным корреляционным субпиксельным уточнением при необходимости сверхточного совмещения. Кроме того, предлагается алгоритм корреляционно-экстремального совмещения радиолокационных изображений с оптическими снимками, отличающимися меньшей точностью привязки.

Основные источники ошибок геодезической привязки радиолокационных изображений

Строгая модель привязки изображений, сформированных радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны, имеет следующий вид.

В результате синтеза апертуры и устранения миграции по каналам дальности сжатый импульсный отклик радиолокатора регистрируется на нулевой доплеровской частоте по азимуту (вдоль столбца изображения) и минимальной наклонной дальности (дальности на траверзе) вдоль строки изображения. Помимо истинного нуля Доплера имеются ложные нули, сдвинутые друг относительно друга в частотной области на частоту повторения зондирующих импульсов. Во временной области сдвиг между ними в азимутальном направлении определяется отношением частоты повторения импульсов к скорости изменения доплеровской частоты. В пересчёте на земную поверхность этот сдвиг составляет единицы или десятки километров. Для правильного выбора нуля Доплера необходимо разрешить азимутальную неоднозначность, зная направление визирования с точностью не хуже нескольких десятых долей градуса. Если из-за ошибок измерения угловой ориентации антенны нуль Доплера выбран неправильно, наблюдается также сдвиг импульсного отклика в направлении наклонной дальности на десятки или сотни метров из-за некорректного устранения миграции по каналам дальности.

Если нуль Доплера выбран правильно, геодезическая привязка пикселя радиолокационного изображения заключается в решении системы уравнений вида:

$$\begin{cases} V_{px}(\eta_{\perp})(x - x_p(\eta_{\perp})) + V_{py}(\eta_{\perp})(y - y_p(\eta_{\perp})) + V_{pz}(\eta_{\perp})(z - z_p(\eta_{\perp})) = 0, \\ (x - x_p(\eta_{\perp}))^2 + (y - y_p(\eta_{\perp}))^2 + (z - z_p(\eta_{\perp}))^2 = \left(\frac{c\tau_{\perp}}{2} - \Delta R_{\text{атм}} \right)^2, \\ E(x, y, z, h) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\tau_{\perp}$ – значение так называемого быстрого времени для столбца радиолокационного изображения – задержка между излучением и приёмом эхо-сигнала в момент максимального сближения с наблюдаемой целью; $\eta_{\perp}$ – значение медленного времени для строки радиолокационного изображения – момент максимального сближения с наблю-

даемой целью; (x, y, z) – координаты наблюдаемой цели в Гринвичской системе координат; $\mathbf{r}_p(\eta_\perp) = (x_p(\eta_\perp), y_p(\eta_\perp), z_p(\eta_\perp))^T$ и $\mathbf{V}_p(\eta_\perp) = (V_{px}(\eta_\perp), V_{py}(\eta_\perp), V_{pz}(\eta_\perp))^T$ – радиус-вектор положения и вектор скорости движения фазового центра антенны радиолокатора в момент времени $\eta_\perp$; $\Delta R_{\text{атм}}$ – атмосферная задержка зондирующего сигнала; $E(x, y, z, h) = 0$ – уравнение поверхности, расположенной на геодезической высоте h над земным эллипсоидом.

Из (1) видны основные источники ошибок геодезической привязки (в дополнение к ошибкам угловой ориентации, влияющим на выбор нуля Доплера):

- 1) систематическая погрешность знания $\tau_\perp$, вызванная задержками сигнала в приёмопередающем тракте радиолокатора;
- 2) систематическая погрешность $\eta_\perp$, вызванная сдвигами шкалы бортового времени;
- 3) ошибки навигационного обеспечения, вносящие погрешность в $\mathbf{r}_p(\eta_\perp)$ и $\mathbf{V}_p(\eta_\perp)$;
- 4) погрешности расчёта атмосферной задержки $\Delta R_{\text{атм}}$, вызванные недостаточно точным знанием состояния земной атмосферы (пространственного распределения давления, температуры и влагосодержания) и угла визирования;
- 5) погрешности знания геодезической высоты h наблюдаемой цели.

Первые три источника связаны с измерительной информацией, собираемой на космическом аппарате. Четвёртый источник связан с состоянием окружающей среды и не зависит от космического аппарата, однако его влияние достаточно мало: возможные вариации из-за изменения состояния атмосферы составляют лишь доли метра. Пятый источник погрешности связан с точностными характеристиками опорной информации о высотах объектов на наблюдаемом участке земной поверхности и также не зависит от космического аппарата. В отличие от оптических систем, в которых ошибка знания высоты ослабляется при геодезической привязке (и не оказывает никакого влияния при съёмке в нади́р), в радиолокации ошибка знания высоты усиливается при геодезической привязке в $\text{ctg } \alpha_{\text{пад}}$ раз, где $\alpha_{\text{пад}}$ – угол падения зондирующего сигнала. Минимизация этой ошибки возможна за счёт привлечения высокоточных опорных цифровых моделей высот наблюдаемого участка земной поверхности.

Обеспечение высокоточной привязки радиолокационных изображений на основе геометрических калибровок

Если измерительная информация обладает малой случайной погрешностью, возможно автоматическое обеспечение высокоточной привязки радиолокационных изображений за счёт устранения всех систематических ошибок путём проведения геометрических калибровок.

Целью геометрических калибровок является получение оценок систематических погрешностей:

- 1) угловой ориентации антенны за счёт уточнения установочных углов целевой аппаратуры и блоков определения координат звёзд;
- 2) шкалы быстрого времени $\tau_\perp$;
- 3) шкалы медленного времени $\eta_\perp$;
- 4) смещения фазового центра антенны радиолокатора относительно центра масс космического аппарата.

Предлагается следующая технология проведения радиометрических калибровок.

На первом шаге оцениваются систематические погрешности установочных углов рысканья и тангажа. Для этого выполняются съёмки в маршрутном (полосовом) режиме нескольких радиометрически контрастных участков земной поверхности с последующим формированием радиолокационных изображений путём автофокусировки радиоголограмм.

Автофокусировка выполняется в автоматическом режиме в несколько итераций с разделением полной апертуры на две субапертуры и геометрическим совмещением изображений, синтезированных из двух субапертур, в соответствии с [4]. Рассогласование изображений вдоль строки даёт поправку к значению доплеровского центроида (среднего доплеровского сдвига частоты), а рассогласование вдоль столбца – поправку к значению скорости измерения доплеровской частоты. Первая поправка может быть пересчитана в поправки к углам рысканья и тангажа, вторая поправка – в поправки к шкале быстрого времени. Поправки рассчитываются по результатам нескольких съёмок с контролем их стабильности (поправки, рассчитанные по результатам одних съёмок, должны обеспечивать качественную фокусировку результатов других съёмок).

В результате первого шага получаются окончательные значения поправок к углам рысканья и тангажа, которые можно использовать для расчёта значений доплеровского центроида при последующих фокусировках радиоголограмм, и предварительные значения поправок к шкале быстрого времени, точности которых достаточно для качественного синтеза изображения, но недостаточно для его качественной привязки.

На втором шаге оцениваются окончательные значения поправок к шкале быстрого времени, а также поправки к шкале медленного времени и смещению фазового центра антенны. Для этого выполняются съёмки под разными углами в наиболее детальном режиме радиолокатора (как правило, прожекторном) калибровочных полигонов, на которых имеются планово-высотные опознаки в виде уголковых отражателей. Навигационная информация об орбитальном движении космического аппарата должна быть обработана с максимальной (субметровой) точностью за счёт применения методов дифференциальной коррекции и учёта поправок к эфемеридам и атмосферным искажениям.

Путём фокусировки радиоголограмм с учётом ранее найденных поправок к угловой ориентации синтезируются радиолокационные изображения, на которых оператор опознаёт характерные объекты путём указания номеров строки и столбца изображения, в которых они расположены, а также вводит опорные значения широты, долготы и высоты этих объектов. За счёт того, что опознаки являются уголковыми отражателями – яркими точечными объектами, становится возможным субпиксельное уточнение их положения на радиолокационном изображении как точки максимума радиояркости в окрестности пикселя, указанного оператором.

Для всех опознаков на всех изображениях составляются системы уравнений привязки (1), в которые вводятся неизвестные значения поправок $\Delta\tau_{\perp}$, $\Delta\eta_{\perp}$ и $\Delta\mathbf{r}$ (последняя поправка умножается на матрицу поворота, зависящую от угловой ориентации космического аппарата). Значения поправок находятся как псевдорешение переопределённой системы нелинейных уравнений, полученной путём объединения систем, составленных для всех опознаков.

После выполнения геометрической калибровки автоматическая высокоточная привязка радиолокационных изображений обеспечивается учётом найденных поправок к углам рысканья и тангажа при расчёте доплеровского центроида в ходе фокусировки радиоголограммы и учётом поправок $\Delta\tau_{\perp}$, $\Delta\eta_{\perp}$ и $\Delta\mathbf{r}$ при составлении системы уравнений (1) в ходе координатных расчётов для синтезированного изображения. Условием

достижения высокой точности является штатная работа измерительной аппаратуры на космическом аппарате.

Обеспечение высокоточной привязки радиолокационных изображений на основе автофокусировки радиоголограмм

В ходе срока активного существования космического аппарата возможны нештатные ситуации, когда отсутствует часть необходимых измерений на всем интервале радиолокационной съёмки. В этом случае описанная выше технология перестает обеспечивать необходимую точность привязки изображений.

Если в результате выхода из строя или засветки блоков координат звёзд отсутствуют или обладают меньшей точностью измерения угловой ориентации [5], высокоточная привязка может быть обеспечена с помощью следующей технологии.

В ходе наземной обработки целевой информации вместо фокусировки радиоголограммы с учётом калибровочных поправок выполняется автофокусировка с оценкой доплеровского центроида по сигналу радиоголограммы [4], после чего для синтезированного изображения обеспечивается качественная привязка с учётом калибровочных поправок $\Delta\tau_{\perp}$, $\Delta\eta_{\perp}$ и $\Delta\mathbf{r}$.

Автофокусировка корректно работает только для радиометрически контрастных участков земной поверхности и требует существенно больших вычислительных затрат, чем фокусировка, поэтому данную технологию следует применять лишь в нештатных ситуациях.

Обеспечение высокоточной привязки радиолокационных изображений на основе совмещения с опорными изображениями

Если в результате нештатной работы навигационной аппаратуры отсутствуют или обладают меньшей точностью измерения траектории орбитального движения космического аппарата, высокоточная привязка может быть обеспечена лишь с привлечением опорных изображений.

В худшем случае, когда измерения полностью отсутствуют и имеется только прогнозная информация об орбитальном движении, исходная погрешность привязки настолько велика, что не позволяет корректно сопоставить высоты наблюдаемых объектов пикселям радиолокационного изображения. Для данного случая предлагается следующая технология уточнения привязки.

Опорное изображение, представленное в картографической проекции, с привлечением цифровой модели высот трансформируется в антенную или путевую систему координат, в которой синтезировано из радиоголограммы радиолокационное изображение с неточной привязкой. Поскольку опорное изображение обладает точной привязкой, для него описанное геометрическое преобразование корректно: высоты применяются ровно к тем объектам, к которым они относятся.

Далее предлагается выполнять совмещение отдельных фрагментов радиолокационного и трансформированного опорного изображений. За счёт трансформации с привлечением цифровой модели высот остаточные геометрические рассогласования между радиолокационным и опорным изображениями должны описываться моделью с малым числом параметров, например, билинейной функцией вида:

$$\mathbf{p}_p = \mathbf{b} + p_{\text{оп}x} \mathbf{k}_x + p_{\text{оп}y} \mathbf{k}_y + p_{\text{оп}x} p_{\text{оп}y} \mathbf{k}_{xy}, \quad (2)$$

где $\mathbf{p}_p = (p_{px}, p_{py})^T$ – координаты пикселя радиолокационного изображения, соответствующего пикселю $\mathbf{p}_{\text{оп}} = (p_{\text{оп}x}, p_{\text{оп}y})^T$ опорного изображения.

Поскольку опорное высокоточное растровое покрытие для данных радиодиапазона в России в настоящее время не сформировано, в качестве опорных изображений могут применяться оптические снимки. Радиолокационная и оптическая информации достаточно разнородные, и их совмещение – сложная задача. Существуют различные площадные меры нелинейного сходства, например, взаимная информация (Mutual Information MI) [6], а также точечные дескрипторы [7], используемые для совмещения радиолокационных и оптических изображений. Однако точность точечных дескрипторов ограничивается малым размером окрестности, в которой они вычисляются, а площадные меры типа MI характеризуются недопустимо большим объёмом вычислений. В то же время классическое корреляционно-экстремальное совмещение, хотя и затрудняется разнородностью информации, может быть вычислительно эффективно реализовано на основе быстрого преобразования Фурье при достаточно большой площади анализируемого фрагмента и обширной области поиска.

Предлагается следующий алгоритм корреляционно-экстремального совмещения радиолокационного и опорного оптического изображений.

Шаг 1. Изображения приводятся к единому шагу дискретизации, величина которого выбирается так, чтобы возможная разность внутрикадровых искажений на изображениях из-за перепадов высот наблюдаемых объектов была субпиксельной. В случае метрового разрешения снимков и ошибок орбиты, не превышающих нескольких сотен метров, разность внутрикадровых искажений будет субпиксельной без необходимости увеличения шага дискретизации.

Шаг 2. Яркости пикселей радиолокационного изображения переводятся в логарифмическую шкалу.

Шаг 3. К изображениям применяется оператор Собеля. Шаги 2 и 3 позволяют уменьшить различия между совмещаемыми изображениями.

Шаг 4. Выбираются размер фрагмента для корреляции, размер области поиска и начальное значение шага между центрами соседних фрагментов (большее размера фрагмента).

Шаг 5. Для каждого фрагмента выполняется корреляционно-экстремальное совмещение. Затем фрагмент для корреляции делится на 4 части. Для каждой из частей также выполняется корреляционно-экстремальное совмещение. Если для фрагмента и всех его частей максимум коэффициента корреляции превышает выбранный порог, а положения точек максимума отличаются не более чем на выбранную величину, то результаты совмещения признаются надёжными. В противном случае результаты отбраковываются.

Шаг 6. На основе результатов совмещения отдельных фрагментов, признанных надёжными, выполняется построение по методу наименьших квадратов функции (2). Если среднее квадратическое отклонение (СКО) разброса координат центров фрагментов, вовлечённых в регрессию, по какой-либо оси оказывается мало, то во избежание усиления ошибки к краям снимка соответствующий этой оси коэффициент k обнуляется, а по методу наименьших квадратов находятся значения остальных коэффициентов в (2).

Шаг 7. Рассчитываются СКО отклонения результатов совмещения фрагментов от функции (2) по каждой из осей. Если рассчитанные СКО достаточно малы, на предыдущем шаге не выполнялось обнуление коэффициентов k и число фрагментов, вовлечённых в регрессию, достаточно велико, алгоритм завершает работу с построенной функцией (2) в качестве результата. В противном случае выполняются дальнейшие шаги.

Шаг 8. Выполняются начальная отбраковка результатов совмещения фрагментов, отклоняющихся от (2) сильнее, чем на утроенное СКО, повторное построение функции

(2) по меньшему числу фрагментов и пересчёт СКО. Если условие из шага 7 становится истинным, алгоритм завершает работу. В противном случае выполняются дальнейшие шаги.

Шаг 9. Итерационно выполняются отбраковка результатов совмещения фрагментов, отклоняющихся от (2) сильнее, чем на СКО, повторное построение функции (2) по меньшему числу фрагментов и пересчёт СКО, пока не будет выполнено условие из шага 7 без учёта требования к числу фрагментов. Если требование к числу фрагментов также выполнено, алгоритм завершает работу. В противном случае выполняются дальнейшие шаги.

Шаг 10. Уменьшается в 2 раза шаг между центрами соседних фрагментов для корреляции, и выполняется переход к шагу 5. При этом могут не перерассчитываться результаты совмещения фрагментов, уже полученные ранее для большего шага между центрами фрагментов. Если значение шага между центрами соседних фрагментов достигло минимально возможного значения, совмещение изображений признаётся неуспешным.

Если совмещение радиолокационного и опорного изображений было успешным, на основе полученных коэффициентов функции (2) рассчитывается поправка к орбитальному движению космического аппарата. Орбитальное движение может быть описано моделью возмущённой орбиты [8], включающей 6 параметров (координаты и вектор скорости космического аппарата в момент начала съёмки), рассчитываемых по методу наименьших квадратов.

Если автоматическое совмещение радиолокационного и опорного изображений было признано неуспешным, требуется уточнение привязки радиолокационного изображения с участием оператора.

Совмещение высокоточно привязанных радиолокационных изображений при высокоуровневой обработке

Разновременные радиолокационные изображения могут быть подвергнуты высокоуровневой обработке: амплитудному и когерентному анализу изменений, объединению в мозаики, интерферометрической обработке.

С учётом того, что из-за спекл-шума на радиолокационных изображениях отсутствуют границы объектов чёткой формы, для большинства видов высокоуровневой обработки достаточно пиксельной точности совмещения исходных изображений. Для высокоточно привязанных изображений такое совмещение может быть выполнено по строгой геометрической модели, основанной на (1), с учётом опорной цифровой модели высот.

В то же время интерферометрическая обработка [9 – 11] для корректного расчёта разности фаз требует совмещения исходных изображений с точностью до одной десятой пикселя. В этом случае сначала может быть выполнено предварительное совмещение по строгой модели, а затем осуществлено его субпиксельное корреляционно-экстремальное уточнение, как это описано в [12]. Область поиска корреляционно-экстремального уточнения задаётся малой, а поправка описывается полиномом малой степени. Это позволяет исключить появления значительных ошибок корреляционно-экстремального совмещения.

Совмещение высокоточно привязанных радиолокационных изображений с оптическими при высокоуровневой обработке

Одним из видов высокоуровневой обработки является комплексирование радиолокационных изображений с оптическими снимками видимого диапазона с целью облегчения восприятия человеком специфичной информации радиодиапазона [13].

Из-за большего влияния ошибок измерения угловой ориентации космического аппарата оптические снимки, как правило, отличаются меньшей точностью привязки, чем радиолокационные. Поэтому в данном случае совмещение по строгой геометрической модели не может обеспечить пиксельную точность, и требуется корреляционно-экстремальное совмещение.

Оно может быть организовано в соответствии с алгоритмом обеспечения привязки радиолокационных изображений по опорным снимкам со следующими модификациями.

Во-первых, поскольку радиолокационное изображение привязано точно, оно может быть корректно ортотрансформировано. Следовательно, совмещение выполняется не в антенной или путевой системах координат, а в картографической проекции.

Во-вторых, в соответствии с построенной функцией (2) уточняется привязка не радиолокационного, а оптического изображения. При этом выполняется трансформация оптического снимка по функции (2).

Экспериментальные исследования

Предложенные технологии реализованы в виде программного обеспечения. В рамках настоящей статьи приводятся результаты экспериментальных исследований предложенных технологий в части алгоритма совмещения радиолокационного и оптического изображений. Экспериментальные исследования автофокусировки приведены в [4]. Детальные экспериментальные исследования точности геометрической калибровки планируется выполнить после запуска отечественного радиолокационного космического аппарата «Обзор-Р».

Экспериментальные исследования алгоритма совмещения осуществлялись с использованием изображений от зарубежного радиолокационного космического аппарата «TerraSAR-X», отличающихся точностью привязки порядка 0,2 м (при наличии высокоточной опорной цифровой модели высот), оптического растрового покрытия в сервисе Google Планета Земля и цифровой модели высот Copernicus DEM.

Поскольку точность привязки данных сервиса Google Планета Земля неизвестна, алгоритм совмещения исследовался в варианте для комплексирования, когда оптическое изображение признается менее точно привязанным, чем радиолокационное. Точность совмещения контролировалась визуально. Более строгая численная оценка точности корреляционно-экстремального совмещения возможна лишь, когда для калибровочного полигона имеются высокоточные цифровая модель высот, оптическое и радиолокационное изображения. В настоящее время в открытом доступе все необходимые высокоточные данные на один и тот же участок земной поверхности отсутствуют.

При экспериментальных исследованиях использовались следующие значения параметров предложенного алгоритма:

- 1) размер фрагмента для корреляции 96×96 пикселей;
- 2) область поиска ± 32 пикселя по каждой оси;
- 3) начальное значение шага между центрами соседних фрагментов 384 пикселя;
- 4) минимальное значение шага между центрами соседних фрагментов 24 пикселя;
- 5) минимально допустимое значение максимума коэффициента корреляции 0,15;

6) предельное отличие координат точек максимума коэффициента корреляции для фрагмента целиком и четырех его частей 1 пиксель по каждой из осей;

7) пороговое значение СКО разброса координат центров фрагментов, вовлечённых в регрессию, 15% от ширины или высоты изображения (в зависимости от координатной оси) для обнуления коэффициента k ;

8) пороговое СКО отклонения результатов совмещения фрагментов от функции (2) для успешного завершения алгоритма 0,75 пикселя;

9) шаг пикселя совмещаемых изображений 4 м в картографической проекции UTM;

10) минимально допустимое число фрагментов, вовлечённых в регрессию, 100.

Исследования показали, что максимумы коэффициента корреляции отдельных фрагментов оптического и радиолокационного изображений принимают значения не выше 0,6...0,7. При этом точка максимума может соответствовать истинному сдвигу фрагментов друг относительно друга, начиная со значения максимума порядка 0,15. Данное соответствие из-за существенной разнородности совмещаемой информации наблюдается лишь в 10...20% случаев, но абсолютное большинство ложных результатов совмещения отбраковывается на шаге 5 предложенного алгоритма. Остальные ложные совмещения отбраковываются в ходе итерационной процедуры построения функции (2) на этапах 8 и 9 за счёт того, что их количество оказывается меньше, чем число корректных совмещений.

Наибольшее число фрагментов для совмещения находится в пределах равнинной местности (рис. 1, а). Для высотной городской застройки (рис. 1, б) наблюдается достаточно хорошая корреляция радиолокационного и оптического изображений, однако из-за недостаточной точности опорной цифровой матрицы высот на изображениях имеются внутрикадровые геометрические искажения высотных объектов (крыши зданий смещены относительно основания). Из-за указанных искажений результаты совмещения существенно отклоняются от регрессионной модели (2) и отбраковываются предложенным алгоритмом. Наиболее сложным сюжетом для корреляционного совмещения является горная местность (рис. 1, в). Различия объектов, представленных на радиолокационном и оптическом снимках, настолько велики, что даже оператору трудно понять, как смещены эти снимки друг относительно друга.

Для 80% результатов маршрутной съёмки «TerraSAR-X», участвовавших в исследованиях, предложенный алгоритм обеспечил положительный результат совмещения, пиксельная или субпиксельная точность которого подтверждена визуальным анализом.

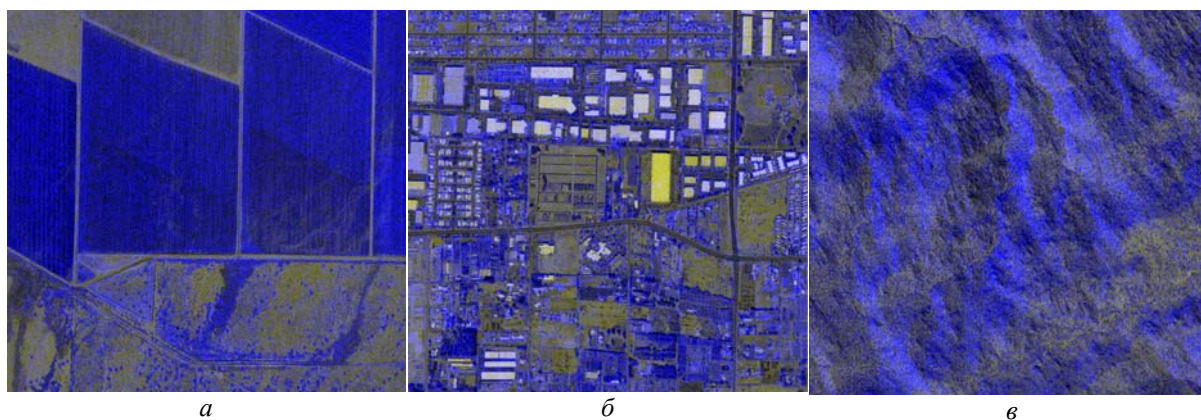


Рис. 1. Примеры совмещения радиолокационного (синий канал) и оптического (красный и зелёный каналы) изображений для равнинной местности (а), городской застройки (б) и горной местности (в)

Обнаруженные геометрические рассогласования снимков в виде среднеквадратического отклонения длины векторного значения функции (2) от нуля по полю снимков в пикселях и в пересчёте на земную поверхность приведены в таблице. Каждая строка таблицы соответствует порядковому номеру отдельного радиолокационного изображения от космического аппарата «TerraSAR-X», совмещаемого с оптическим снимком.

Для двух радиолокационных изображений неотбракованные результаты совмещения с оптическим оказались локализованы в пределах относительно небольших областей, что не позволило построить функцию (2), но если её заменить плоскопараллельным сдвигом на вектор $\mathbf{b}$, алгоритм даёт оценку рассогласования 0,76 пикселя для одного радиолокационного изображения и 0,82 пикселя для другого.

Из-за неизвестной точности привязки снимков сервиса Google Планета Земля эти значения включают как ошибку предложенного алгоритма совмещения, так и ошибку привязки снимков сервиса Google Планета Земля, но могут рассматриваться как верхняя граница погрешностей предложенного алгоритма.

Для изображений, полученных в прожекторном режиме съёмки, из-за малого размера кадра наблюдаемый участок поверхности может быть целиком представлен сложным сюжетом для корреляционного совмещения, поэтому предложенный алгоритм часто приводит к отрицательному результату. Для уменьшения вероятности отрицательного результата можно заменить билинейную функцию (2) на модель остаточных геометрических рассогласований в виде плоскопараллельного сдвига, описываемую вектором $\mathbf{b}$, за счёт пренебрежения вариациями геометрических рассогласований, которые в силу малого размера кадра будут несущественны.

Таблица. Среднеквадратические рассогласования радиолокационного и оптического снимков

№	Среднеквадратическое отклонение	
	пиксели	метры
1	0,98	3,93
2	—	—
3	0,66	2,63
4	0,65	2,60
5	0,78	3,12
6	1,55	6,19
7	1,21	4,84
8	1,63	6,50
9	1,14	4,55
10	—	—
В среднем	1,08	4,3

Заключение

В работе предложены технологии обеспечения высокоточной автоматической привязки радиолокационных изображений для трёх вариантов качества измерительной информации, сопровождающей изображение. Рассмотрены вопросы совмещения изображений при высокоуровневой обработке. Проведены экспериментальные исследования технологии на базе корреляционно-экстремального совмещения радиолокационного и оптического изображений. Визуальный контроль и полученная верхняя граница численной оценки погрешностей подтверждают пиксельную точность совмещения.

Библиографический список

1. Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / под ред. В.В. Еремеева. М.: Физматлит, 2015. 460 с.
2. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Обработка информации от современных космических систем радиолокационного наблюдения Земли. М.: Физматлит, 2019. 320 с.
3. Ушенкин В.А. Математическая модель синтеза радиолокационных изображений дециметрового разрешения из радиоголограмм от космических РСА // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 3. С. 21-25.
4. Ушенкин В.А. Оценивание доплеровского центроида при первичной обработке космических радиоголограмм маршрутного режима съёмки путём амплитудного анализа // Цифровая обработка сигналов. 2024. № 3. С. 31-39.
5. Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И. Структурно-параметрический синтез компонентов малого космического аппарата картографического назначения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. № 69. С. 185-192. DOI: 10.21677/1995-4565-2019-69-185-192
6. Costantini M., Zavagli M., Martin J., Medina A., Barghini A., Naya J., Hernando C., Macina F., Ruiz I., Nicolas E., Fernandez S. Automatic coregistration of SAR and optical images exploiting complementary geometry and mutual information // Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2018 (July, 22-27, 2018, Valencia, Spain). P. 8877-8880. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519242
7. Paul S., Pati U.C. Automatic optical-to-SAR image registration using a structural descriptor // IET Image Processing. 2020. V. 14, Iss. 1. P. 62-73. DOI: 10.1049/iet-ipr.2019.0389
8. Егошкин Н.А. Обработка бортовой навигационной информации для высокоточной оперативной коррекции космических изображений // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 4. С. 23-29.
9. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Интерферометрическая обработка радиолокационной информации на основе комбинации методов развёртывания фазы // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54, ч. 2. С. 21-31.
10. Егошкин Н.А., Еремеев В.В., Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Формирование цифровых моделей рельефа на основе высокоточного развёртывания фазы интерферограмм от систем радиолокационной съёмки Земли // Радиотехника. 2016. № 11. С. 120-127.
11. Ушенкин В.А., Егошкин Н.А. Использование априорной информации при интерферометрической обработке высокодетальной радиолокационной информации // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2016. Т. 15, № 2. С. 208-219. DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-208-219
12. Егошкин Н.А., Ушенкин В.А. Совмещение высокодетальных изображений с использованием опорной цифровой модели рельефа при интерферометрической обработке радиолокационной информации // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 51. С. 72-79.
13. Москвитин А.Э., Ушенкин В.А. Комплексирование радиолокационных и оптических изображений от космических систем дистанционного зондирования Земли // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 5, ч. 2. С. 183-191. DOI: 10.18127/j00338486-201905(II)-20

TECHNOLOGIES FOR HIGH-PRECISION AUTOMATIC GEOREFERENCING AND HIGH-LEVEL PROCESSING OF SPACEBORNE SAR IMAGES

© 2025

V. A. Ushenkin

PhD, Leading Researcher of Aerospace Image Processing Research Institute;
Ryazan State Radio Engineering University, Ryazan, Russian Federation;
foton@rsreu.ru

Georeferencing quality is one of the main characteristics of the Earth's surface images generated by spaceborne synthetic aperture radars. The paper considers the problem of automatic high-precision georeferencing of spaceborne synthetic aperture radar images. Three options for solving this problem are considered: by focusing the radio holograms with account of the calibration data which contain corrections to the radar antenna attitude measurements; by autofocusing of the holograms, specifying the Doppler centroid values, and estimating the slant range time scale shift; by correlation-extreme matching of radar and reference images, specifying the radar antenna phase center trajectory. Reducing the georeferencing error to a value comparable to or not exceeding the size of the image pixel projection onto the earth's surface makes it possible to significantly simplify high-level processing of multi-temporal synthetic aperture radar image sets. The issues of radar images' matching based on a strict geometric model in their high-level processing and radar and optical images' correlation-extreme matching in their integration are also considered. The results of experimental research in terms of assessing radar and optical images' matching accuracy are presented. Visual inspection and the obtained upper limit of the numerical error estimate confirm the pixel accuracy of the matching.

Radar space mage; synthetic aperture radar; georeferencing; high-level processing; matching

Citation: Ushenkin V.A. Technologies for high-precision automatic georeferencing and high-level processing of spaceborne SAR images. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2025. V. 24, no. 2. P. 74-86. DOI: 10.18287/2541-7533-2025-24-2-74-86

References

1. *Sovremennyye tekhnologii obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* [Modern technologies for the Earth remote sensing data processing / ed. by V.V. Ereemeev]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2015. 460 p.
2. Egoshkin N.A., Ereemeev V.V., Moskvitin A.E., Ushenkin V.A. *Obrabotka informatsii ot sovremennykh kosmicheskikh sistem radiolokatsionnogo nablyudeniya Zemli* [Processing of data from modern space systems of Earth remote sensing radar systems]. Moscow: Fizmatlit Publ., 2019. 320 p.
3. Ushenkin V.A. Decimeter-resolution spaceborne SAR raw data focusing model. *Digital Signal Processing*. 2018. No. 3. P. 21-25. (In Russ.)
4. Ushenkin V.A. Doppler centroid estimation in primary processing of spaceborne StripMap SAR raw data by amplitude analysis. *Digital Signal Processing*. 2024. No. 3. P. 31-39. (In Russ.)
5. Kuznecov A.E., Poshekhonov V.I. Structural and parametric synthesis of cartographic small spacecraft components. *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2019. No. 69. P. 185-192. (In Russ.). DOI: 10.21677/1995-4565-2019-69-185-192
6. Costantini M., Zavagli M., Martin J., Medina A., Barghini A., Naya J., Hernando C., Macina F., Ruiz I., Nicolas E., Fernandez S. Automatic coregistration of SAR and optical images exploiting complementary geometry and mutual information. *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2018 (July, 22-27, 2018, Valencia, Spain)*. P. 8877-8880. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8519242
7. Paul S., Pati U.C. Automatic optical-to-SAR image registration using a structural descriptor. *IET Image Processing*. 2020. V. 14, Iss. 1. P. 62-73. DOI: 10.1049/iet-ipr.2019.0389

8. Egoshkin N.A. Processing satellite navigation information for high-speed operational correction of remote sensing images. *Digital Signal Processing*. 2017. No. 4. P. 23-29. (In Russ.)
9. Egoshkin N.A., Ushenkin V.A. Interferometric processing of SAR data based on combining of phase unwrapping methods. *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2015. No. 54, part 2. P. 21-31. (In Russ.)
10. Egoshkin N.A., Ereemeev V.V., Moskvitin A.E., Ushenkin V.A. Digital elevation models generation based on high-precision phase unwrapping of SAR interferograms. *Radioengineering*. 2016. No. 11. P. 120-127. (In Russ.)
11. Ushenkin V.A., Egoshkin N.A. Using apriori information in interferometric processing of high resolution SAR data. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2016. V. 15, no. 2. P. 208-219. (In Russ.). DOI: 10.18287/2412-7329-2016-15-2-208-219
12. Egoshkin N.A., Ushenkin V.A. DEM-assisted high resolution image coregistration for InSAR processing. *Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*. 2015. No. 51. P. 72-79. (In Russ.)
13. Moskvitin A.E., Ushenkin V.A. Fusion of radar and optical images from the Earth remote sensing systems. *Radioengineering*. 2019. V. 83, no. 5, part 2. P. 183-191. (In Russ.). DOI: 10.18127/j00338486-201905(II)-20