

Результаты географической привязки изображений AVHRR/NOAA в условиях оперативной обработки

С.Н. Катаманов

*Институт автоматизирующей и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, 690041, Россия
E-mail: sergey@satellite.dvo.ru*

Представлены результаты географической привязки, полученные при оперативной обработке изображений AVHRR/NOAA в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды (РСЦМОС) ДВО РАН. Технология географической привязки спутниковых изображений, созданная в РСЦМОС ДВО РАН, позволяет полностью в автоматическом режиме привязывать каждое изображение полного сеанса приёма с пиксельной точностью. Разработанный метод географической привязки основан на орбитальной модели движения SGP4 (с телеграммами NORAD TLE) в сочетании с математической моделью, которая достаточно точно учитывает все аспекты формирования изображения. Пиксельная точность привязки каждого изображения достигается вычислением оптимальных значений углов ориентации спутниковой платформы (крен, тангаж и рысканье) по автоматически рассчитанным реперным точкам или прогнозированием. При прогнозе привязки выполняется перенос значений углов ориентации спутниковой платформы, вычисленных по реперным точкам на изображениях, которые были сформированы на близлежащих витках орбиты с одинаковым направлением. Представлены результаты привязки длительной серии изображений AVHRR с действующих спутников серии NOAA (-15, -18, -19), полученных с 2009 г. по 2015 г. в РСЦМОС ДВО РАН. Также приведено сравнение с результатами привязки альтернативных методов, полученных при оперативной обработке в зарубежных спутниковых центрах. По web-ссылке (http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image) сайта РСЦМОС ДВО РАН размещена галерея RGB-изображений, по которым можно непосредственно оценить результаты автоматической привязки данных AVHRR/NOAA, полученных с 2006 г.

Ключевые слова: NOAA, AVHRR, спутниковые изображения, автоматическая географическая привязка, реперные точки, углы ориентации спутниковой платформы (крен, тангаж и рысканье), пиксельная точность, прогноз привязки, близлежащие витки орбиты, картографическая проекция

*Одобрена к печати: 30.11.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-187-202*

Введение

После запуска первого спутника серии NOAA с установленным на борту радиометром AVHRR (TIROS-N в 1978 г.) основным предназначением данных AVHRR было применение для метеорологических и океанографических целей. Но впоследствии данные AVHRR стали активно применяться в различных исследованиях поверхности Земли как в глобальном, так и региональном масштабе: океанологические исследования, мониторинг пожаров, проведение экологического и сельскохозяйственного мониторинга и т.п. Также в последнее время изображения AVHRR стали широко использоваться для изучения экосистем и изменений климата в связи с наличием данных в виде длинных временных рядов. Свободный доступ к большому объёму архивной информации делает данные AVHRR очень востребованными во многих исследованиях. AVHRR устанавливается на спутники серии NOAA и MetOp, которые запускаются на солнечно-синхронные орбиты с высотой около 850 км и наклоном 98°. Сравнительно большая ширина полосы обзора (2700 км) радиометра в совокупности с его работой на солнечно-синхронной орбите позволяет выполнять полное покрытие практически всей поверхности Земли за одни сутки. Наибольший интерес для исследователей представляют изображения AVHRR в формате HRPT, которые в режиме реального времени транслируются с ИСЗ. Данные HRPT содержат изображения

в 5 спектральных каналах (в видимом и инфракрасном диапазонах) с пространственным разрешением 1,09 км в надири и имеют 1024 градаций яркости на пиксел.

Изображения AVHRR/NOAA имеют геометрические искажения, вызванные вращением и кривизной поверхности Земли, неточным предсказанием положения ИСЗ на орбите, ошибками бортовых часов спутника и нестабильным положением спутниковой платформы с установленным на ней радиометром (Rosborough et al., 1994; Brunel, Marsouin, 2000). Неучёт вышеуказанных искажений, возможно, не так критичен в метеорологических приложениях, где высокая геометрическая точность не требуется. Но при проведении исследований, целью которых является локализация точечных объектов и/или выявление динамических характеристик явлений/процессов, неучёт этих искажений может привести к серьезным ошибкам, что обычно выражается в виде искажения реальных природных объектов и/или появления артефактов на изображении. Также совместная обработка длинных временных рядов изображений может быть серьезно затруднена, если нет геометрического соответствия между каждым изображением в серии. Одним из основных способов устранения геометрических искажений на спутниковых изображениях является приведение спутниковых данных к стандартным картографическим проекциям, в результате чего значительно упрощается процесс синтеза разнородных/разновременных данных и проведение сравнительного анализа с *in situ* данными (Eugenio, Marcello, 2009). Но для построения картографических проекций по спутниковым данным требуется, чтобы каждое изображение было географически привязано с необходимой точностью, так как от этого зависят результаты дальнейшей тематической обработки.

Накопленный в течение более трёх десятилетий опыт показал, что добиться пиксельной точности решения задачи географической привязки данных AVHRR/NOAA можно только с помощью метода реперных точек (Ground Control Points, GCPs), суть которого заключается в определении истинных координат некоторых объектов на изображении (Rosborough et al., 1994; Brunel, Marsouin, 2000; Катаманов, 2014). Определение реперных точек на изображениях может производиться вручную, в интерактивном режиме оператором или автоматическим способом (вычислительными алгоритмами идентификации объектов относительно эталонных изображений). В прошлом многие разработчики методов привязки данных AVHRR/NOAA, учитывая значительные трудности автоматизации расчёта реперных точек (из-за сложных условий наблюдения своего региона и необходимости обработки данных ночных сеансов приёма), сделали выбор в пользу интерактивного задания точек на изображении (Moreno, Melia, 1993; Rosborough et al., 1994; Эпштейн, Гербек, 2001). В то же время параллельно шло развитие методов привязки, основанных на автоматическом расчёте реперных точек на изображениях (Bordes et al., 1992; Pergola, Tramutoli, 2000; Scheidgen et al., 2002; Eugenio, Marques, 2003; Emery et al., 2003). Вследствие постоянного увеличения числа запускаемых на орбиту спутников дистанционного зондирования и многократного роста объёмов передаваемой информации с ИСЗ многие спутниковые центры отказались от ручного задания реперных точек на изображениях в пользу автоматических процедур. (Brunel, Marsouin, 2000; Pergola, Tramutoli, 2003; Craw-

ford et al., 2003; Huseby et al., 2005; Esquerdo et al., 2006; Eugenio, Marcello, 2009; Katamanov, 2010; Khlopenkov et al., 2010).

При любом способе привязки основной проблемой оставалась точная привязка данных AVHRR/NOAA, у которых конфигурация реперных точек является неудачной или точки вовсе отсутствуют (сплошная облачность, открытые морские акватории и пр.). Привязку изображений такого рода с необходимой точностью можно выполнить только прогнозированием параметров коррекции привязки (Brunel, Marsouin, 2000; Emery et al., 2003; Crawford et al., 2003; Katamanov, 2010). В работе (Катаманов, 2014) приведён обзор с анализом результатов применения подхода прогнозирования, который был предложен в альтернативных методах привязки (Brunel, Marsouin, 2000; Emery et al., 2003). В другой работе (Pergola, Tramutoli, 2003) также был проведён анализ для оценки точности привязки при использовании альтернативного подхода прогнозирования. В результате этого анализа были вычислены коэффициенты корреляции между значениями углов положения платформы спутников NOAA (-12, -14, -15), рассчитанных для изображений, принятых в различное время (с разницей не более одних суток). Диапазон значений коэффициентов корреляции для каждого из углов составил: от 0,07 до 0,13 для рысканья, от 0,2 до 0,6 для крена и от 0,38 до 0,69 для тангажа (Pergola, Tramutoli, 2003). В работах (Катаманов, 2014, 2015) был предложен и исследован совершенно другой подход для прогноза привязки для данных AVHRR, получаемых со спутников серии NOAA и MetOp. По результатам апробации данного подхода не менее 90% изображений имели пиксельную точность привязки.

Используемые методы и данные

На *рис. 1* приведена блок-схема метода автоматической географической привязки изображений AVHRR, который используется при оперативной обработке в РСЦМОС ДВО РАН. При задании базы эталонных участков маски «суша/вода» были использованы участки с характерными особенностями – наличием резких изменений в направлении берегового контура (заливы, острова, мысы, озера, извилистые русла крупных рек и т.п.). Процедура привязки для каждого изображения выполняется один раз и сразу по истечении сеанса приёма данных с ИСЗ.

В представленном методе привязки для предсказания положения спутника на орбите используются модель орбитального движения SGP4 в сочетании с прогнозными телеграммами NORAD TLE (Vallado et al., 2006). Телеграммы TLE для спутников серии NOAA могут быть получены с общедоступных Интернет-ресурсов и/или из административных сообщений, передаваемых в потоке данных со спутников серии MetOp (Катаманов, 2015). Математическая модель формирования изображения радиометром AVHRR, используемая в разработанном методе, учитывает все геометрические аспекты работы сканера типа *cross-track* и практически не отличается от предложенных подходов в альтернативных методах (Patt, Gregg, 1994; Rosborough et al., 1994; Brunel, Marsouin, 2000; Crawford et al., 2003).



Рис. 1. Блок-схема метода географической привязки изображений AVHRR

Построение системы координат (СК), связанной с ИСЗ при движении по орбите, полностью совпадает с общепринятым подходом (Marsouin et al., 2011). Для решения прямой и обратной задач географической привязки изображений за основу были взяты алгоритмы, приведённые в работе (Эпштейн, Гербек, 2001), с соответствующими доработками. Необходимость доработок была вызвана следующими двумя основными моментами. Во-первых, для построения оси СК, которая полностью определяется вектором нормали от ИСЗ к поверхности референц-эллипсоида Земли, был использован итерационный метод из работы (Patt, Gregg, 1994). Во-вторых, при решении задач географической привязки был полностью устранён эффект *scan skew* (Rosborough et al., 1994), который проявляется как нелинейность развертки радиометра вдоль скана изображения. В результате чего для каждого пиксела скана изображения вычисляется точное время сканирования. При прямой задаче привязки время сканирования пиксела рассчитывается по стандартной (исходя из характеристик сканера) линейной формуле (Brunel, Marsouin, 2000; Marsouin et al., 2011). При обратной задаче привязки время сканирования пиксела вычисляется итеративным

способом с помощью метода хорд относительно времени сканирования в надир определённой строки изображения.

Для достижения пиксельной точности привязки рассчитываются параметры коррекции, в качестве которых используется углы ориентации платформы с радиометром в пространстве (крен, тангаж и рысканье). При вычислении значений углов принимается гипотеза о том, что для «полного» изображения (сформированного в течение всего сеанса приёма длительностью до 15 минут) они постоянны (Rosborough et al., 1994; Brunel, Margouin, 2000). Вычисление оптимальных значений углов основано на минимизации рассогласований между видимыми (модельными) и истинными (рассчитанными) положениями реперных точек на изображении. Для этого используется способ из работы (Rosborough et al., 1994), где определение значений углов сведено к решению системы линейных уравнений. Если реперные точки проходят проверку согласно разработанному критерию оценки точности привязки (см. ниже), то расчёт углов выполняется по ним, иначе в качестве значений углов используются их прогнозные оценки, которые были вычислены для сеансов с близлежащих трасс витков орбиты с одинаковым направлением (Катаманов, 2014, 2015). В качестве меры, определяющей пространственное рассогласование трасс витков орбиты на поверхности Земли, используется величина абсолютной разницы долгот ближайших узлов орбиты. Для прогнозной привязки используются телеграммы TLE, которые были сгенерированы не ранее 1-х суток относительно времени начала сеанса приёма данных с ИСЗ (Катаманов, 2014).

После проведения автоматической привязки по каждому сеансу выполняется построение стандартных картографических проекций различного вида (в зависимости от типа тематической обработки и/или выбранного географического района): цилиндрические (обычные и поперечные), конические (Ламберта, Альберса и др.), азимутальные и т.п. (более 15 видов). При построении картографических проекций по данному сеансу используется один и тот же вычисленный набор параметров коррекции привязки. С этой целью была реализована процедура построения стандартных картографических проекций, основанная на математическом аппарате из работы (Snyder, 1987). При построении картографических проекций вычисление геодезических координат (широта и долгота) может выполняться в различных системах референц-эллипсоида (WGS84, Крассовского, WGS72 и т.п.) согласно преобразованию Молоденского. По web-ссылке (http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image) сайта РСЦМОС ДВО РАН размещена галерея RGB-изображений стандартных картографических проекций для выбранных географических районов, построенных по данным полярно-орбитальных ИСЗ (в том числе и по изображениям AVHRR) с помощью разработанной процедуры.

Метод расчёта реперных точек

Расчёт реперных точек на изображениях выполняется с помощью метода, который был ранее разработан и апробирован (Katananov, 2010) при автоматической привязке дан-

ных, получаемых с метеорологических полярно-орбитальных и геостационарных ИСЗ. В последнее время метод был усовершенствован, что было достигнуто следующими результатами. Заданная для нашего региона база эталонных участков маски «суша/вода» (далее «эталонные участки») имеет сравнительно высокую плотность (2160 шт.). Предварительная фильтрация облачности и льда на спутниковых изображениях не проводится при определении реперных точек. Расчёт точек выполняется по всем доступным спектральным каналам одновременно. При отбраковке неправильно рассчитанных точек используется итерационная процедура с динамическим порогом. Всё это в конечном итоге позволило значительно увеличить число правильно рассчитываемых точек на изображении. Отказ от фильтрации облачности был вызван тем, что в результате проведения фильтрации отбраковывается некоторая часть реперных фрагментов изображения, по которым метод может правильно рассчитать точки.

Для вычисления истинных местоположений реперных точек используются эталонные участки. Маска «суша/вода» представлена в виде стандартной картографической конической проекции Ламберта (Snyder, 1987) со средним разрешением 0,5 км и была создана на основе географической контурной базы GSHHG (Wessel, Smith, 1996). Расчёт рассогласований между видимым и истинным положением реперной точки (dX', dY') основан на поиске максимума меры рассогласования между средними значениями яркостей для суши и водной поверхности реперного фрагмента изображения:

$$D(dX', dY') = \max_{dX, dY \in [-15, +15]} |Image_{land}(dX, dY) - Image_{water}(dX, dY)|,$$

где (dX, dY) – смещение по строке и столбцу эталонного участка на изображении; $Image_{land}$ и $Image_{water}$ – средние значения яркостей суши и водной поверхности для реперного фрагмента изображения. Значения $Image_{land(water)}$ рассчитываются относительно эталонного участка при каждом новом смещении (dX, dY) . В вычислении участвуют значения только тех пикселей изображения, которые находятся вблизи границы «суша-вода» эталонного участка. Т.е. если пиксел, соответствующий суши (водной поверхности), находится на расстоянии не более 2-х пикселей от пиксела, соответствующего водной поверхности (суши).

Далее, для каждой реперной точки вычисляется нормированное значение статистического критерия, который основан на t-критерии Стьюдента:

$$\Psi_{crit}(dX', dY') = \frac{D(dX', dY') \sqrt{n_{land} n_{water} / (n_{land} + n_{water})}}{\sqrt{(n_{land} - 1) \sigma_{land}^2 + (n_{water} - 1) \sigma_{water}^2}},$$

где n_{land} и n_{water} – количество пикселей суши и водной поверхности эталонного участка соответственно, которые участвуют в расчёте; σ_{land} и σ_{water} – оценки значений стандартных отклонений яркостей для суши и водной поверхности реперного фрагмента изображения соответственно. В расчёте также участвуют только те пиксели изображения, которые находятся вблизи границы «суша-вода» эталонного участка (см. выше).

После расчёта реперных точек на изображении выполняется отбор правильно рассчитанных точек на основании следующего соотношения:

$$\Psi_{crit}(dX', dY') \geq threshold, \quad (1)$$

где *threshold* является динамическим порогом и может принимать значения от 0 до 1,6 с шагом 0,4. После отказа от проведения предварительной фильтрации облачности на изображении отбор точек согласно соотношению (1) с фиксированной величиной *threshold* равной 0,4 (Катаманов, 2010) не обеспечивал надёжную отбраковку неправильно рассчитанных точек. Поэтому в настоящее время для отбраковки таких точек применяется итерационная процедура. В основе этой процедуры используется критерий отбраковки по величине 2σ , где σ – среднеквадратичное отклонение остаточных невязок (по каждой из координат изображения – строка и столбец) в реперных точках после исполнения привязки с учётом вычисленных углов, т.е. которые прошли отбор согласно критерию (1). Данная процедура выполняется рекурсивно: на каждом шаге отбраковывается только одна точка (у которой значение Ψ_{crit} наименьшее из всех точек, не прошедших по критерию 2σ) с последующим перевычислением углов по оставшимся точкам. Выход из рекурсивной процедуры осуществляется на основании удовлетворительного результата проверки конфигурации оставшихся реперных точек согласно критерию оценки точности привязки (см. ниже) либо отсутствия отбракованных точек на последнем этапе. Если конфигурация отобранных реперных точек не проходит проверку согласно критерию оценки точности привязки, то выполняется следующая итерация отбора правильно рассчитанных точек с обновлённой величиной порога *threshold* (т.е. увеличенной на 0,4). На *рис. 2* приведён пример отбора правильно рассчитанных точек в результате проведения коррекции привязки одиночного изображения NOAA-19/AVHRR (№ орбиты 31577, 26.03.2015 г., 04:30:54 UTC). Чёрным тоном на *рис. 2* отмечены точки, которые были использованы при вычислении оптимальных значений углов ориентации спутниковой платформы (в данном случае отбор был проведён по величине *threshold* равной 0,4).

Критерий оценки точности географической привязки по конфигурации реперных точек

Помимо оценки величин остаточных невязок в реперных точках после проведения коррекции привязки необходимо учитывать конфигурацию точек на изображении (Brunel, Marsouin, 2000; Катаманов, 2014). В нашем случае основной характеристикой конфигурации реперных точек является «база по строке», которая определяется отношением максимальной разницы координат точек по строке изображения к числу пикселей в строке. Если величина параметра *база по строке* небольшая (не более 30% от длины скана), то оценки углов тангажа и рысканья будут неустойчивы по отношению к изменению положений реперных точек вдоль скана изображения (Brunel, Marsouin, 2000; Катаманов, 2014).

Это связано с тем, что определение значений углов тангажа и рысканья является взаимозависимым. В результате изображение с такими параметрами коррекции нельзя считать привязанным с необходимой точностью. В связи с чем было проведено исследование, которое позволило выяснить, каким критериям должны удовлетворять основные статистические параметры конфигурации реперных точек, чтобы точность привязки по всему изображению была не хуже пиксельной.

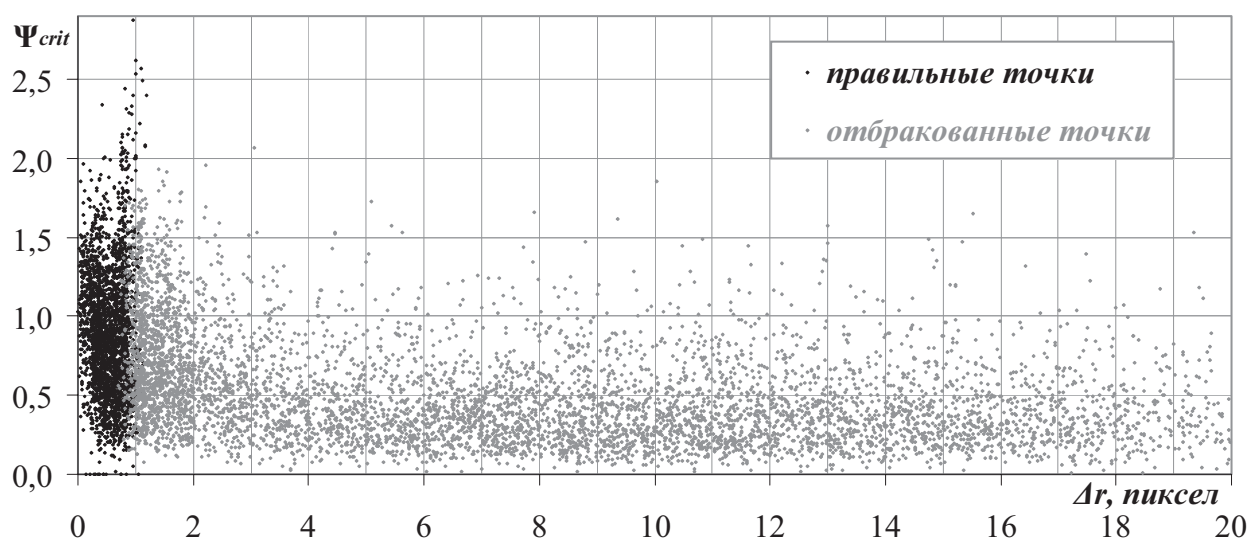


Рис. 2. Зависимость между значением Ψ_{crit} и величиной модуля остаточных невязок в реперных точках (Δr) после проведения коррекции привязки

В качестве таких параметров были выбраны следующие: величина RMS остаточных невязок в точках, база по строке и число точек. В нашем случае пиксельная точность привязки достигается при выполнении следующих условий – погрешность вычисления углов ориентации платформы относительно модельных («правильных») величин не превышает 1,0 миллирадиан для крена и тангажа и 1,5 миллирадиана для рысканья. В работе (Brunel, Marsouin, 2000) подробно рассмотрено влияние изменения значений углов на ошибку привязки изображения. Для проведения эксперимента была отобрана серия хорошо привязанных изображений AVHRR/NOAA, у которых рассчитанная конфигурация реперных точек удовлетворяла следующим условиям: число точек не меньше 100 шт., база по строке не меньше 0,9 и максимальные значения остаточных невязок в точках не более одного пиксела. При этом набор вычисленных углов по вышеуказанным конфигурациям реперных точек принимался как *правильный*. Для каждого из изображений моделировалась различные конфигурации реперных точек: случайным образом отбирались точки и также случайным образом добавлялась ошибка по каждой из координат (по закону нормального распределения). Далее, по этим конфигурациям точек вычислялись углы положения спутниковой платформы. Если абсолютная разница между значениями модельных и вычисленных параметров коррекции удовлетворяла вышеуказанному условию, то изображение считалось привязанным с пиксельной точностью.

В результате был сформирован вероятностный критерий в табличном виде следующего вида:

$$P = Table(E_{GCP}, BaseY_{GCP}), \quad (2a)$$

где P – вероятность коррекции привязки изображения с пиксельной точностью; E_{GCP} – значение RMS остаточных невязок в реперных точках; $BaseY_{GCP}$ – база по строке. На *рис. 3* представлена трёхмерная гистограмма рассчитанных величин вероятности (в процентах) привязки с пиксельной точностью для критерия (2a). Жёлтым тоном на *рис. 3* отмечены столбцы, соответствующие величине вероятности не менее 95%. Также на основе полученных статистических данных был сформирован критерий для определения необходимого числа реперных точек (N_{GCP}). Таким образом, для проведения привязки с пиксельной точностью необходимое число точек определяется величиной параметра база по строке:

$$N_{GCP} \geq \begin{cases} 50 \cdot (1,5 - BaseY_{GCP}), & BaseY_{GCP} < 0,8 \\ 35 & \end{cases} \quad (26)$$

В нашем случае изображение AVHRR/NOAA считается привязанным с пиксельной точностью, если согласно критерию (2a) величина вероятности не менее 95% и число реперных точек удовлетворяет соотношению (26). Введение такого жёсткого критерия позволило существенно повысить качество привязки при незначительном уменьшении числа привязанных изображений.

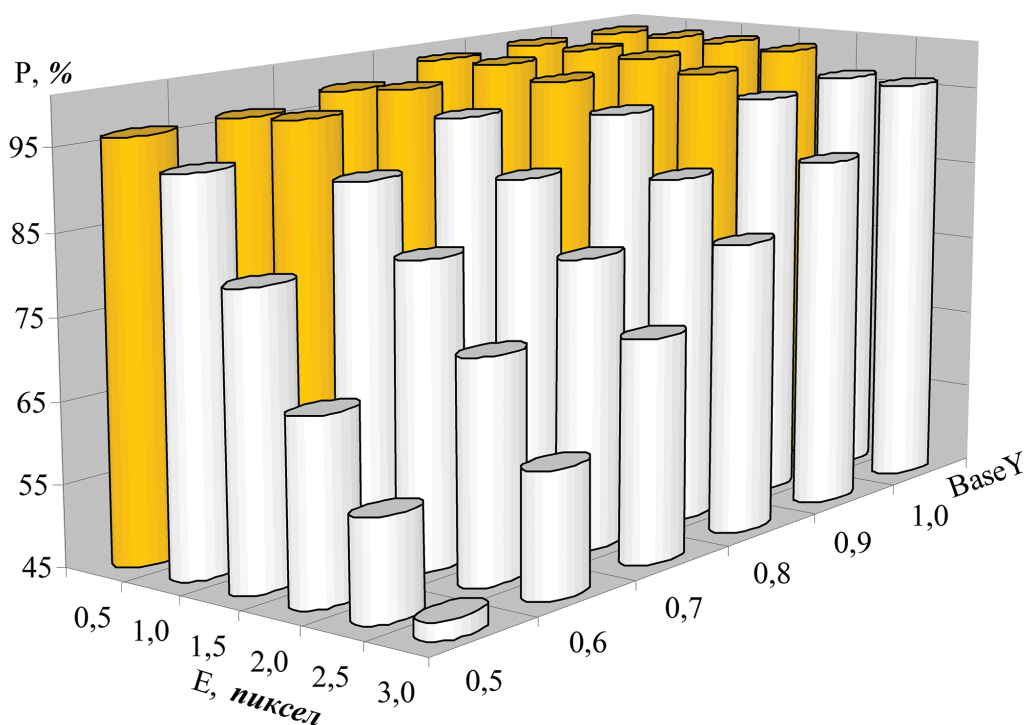


Рис. 3. Зависимость величин критерия оценки точности привязки от параметров конфигурации реперных точек

Результаты географической привязки изображений

По результатам автоматической привязки длительной серии данных AVHRR, полученных с 2009 г. по 2015 г., были построены гистограммы распределений количества изображений в зависимости от параметров, характеризующих качество привязки. На *рис. 4* приведены графики распределений (помесячно) количества изображений по каждому действующему ИСЗ серии NOAA (в процентах от общего числа), у которых коррекция привязка была выполнена только по реперным точкам. Для остальных изображений AVHRR/NOAA при привязке были использованы прогнозные значения углов. Из анализа графиков на *рис. 4* следует, что эффективность привязки по реперным точкам практически остаётся неизменной на протяжении всего времени года. Наблюдаемые единичные провалы графиков были вызваны нестабильным приёмом данных с ИСЗ в соответствующие периоды времени. В частности, значительное снижение количества привязанных данных с NOAA-15, наблюдаемое в марте–апреле 2013 г., было вызвано тем, что в данный период времени приём с ИСЗ вёлся нерегулярно и лимитировано (практически у всех изображений продолжительность сеанса приёма составила не больше 5 минут).

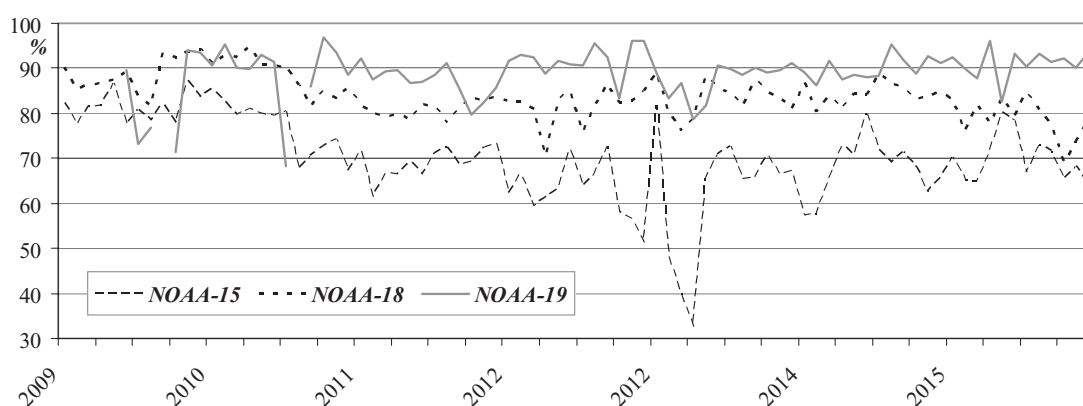


Рис. 4. Распределения количества привязанных изображений AVHRR по реперным точкам для каждого ИСЗ серии NOAA

Далее, для этой же серии данных AVHRR были построены гистограммы распределений количества изображений (в процентах от общего числа) по каждому ИСЗ NOAA в зависимости от статистических параметров конфигураций рассчитанных на них реперных точек. В случае прогнозной привязки рассчитанные на изображения реперные точки являются *проверочными*, т.е. они отбираются согласно прогнозным значениям углов. Условие прохождения отбора в данном случае заключается в том, чтобы величина RMS модуля остаточных невязок в каждой точке не превышала 1,5 пиксела. На *рис. 5* вверху приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от числа рассчитанных для них точек. При определении числа реперных точек точки, имеющие одинаковое местоположение и рассчитанные на различных спектральных каналах, интерпретировались как одна точка. Среднее число правильно рассчитанных точек на изображениях AVHRR составило: 158 шт. (NOAA-15), 240 шт. (NOAA-18) и 252 шт. (NOAA-19). На *рис. 5*

в центре приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от величин RMS остаточных невязок в реперных точках. Из данных распределений следует, что в результате проведенной коррекции привязки не менее 95% изображений по каждому из спутников имеют величину RMS, не превышающую 1,4 (NOAA-15), 1,3 (NOAA-18) и 1,2 (NOAA-19) пиксела. На *рис. 5* внизу приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от величин параметра база по строке. Из анализа данных гистограмм видно, что количество изображений, у которых величины параметра база по строке меньше 0,5, не более 15% (для NOAA-15), 10% (для NOAA-18) и 7% (для NOAA-19).

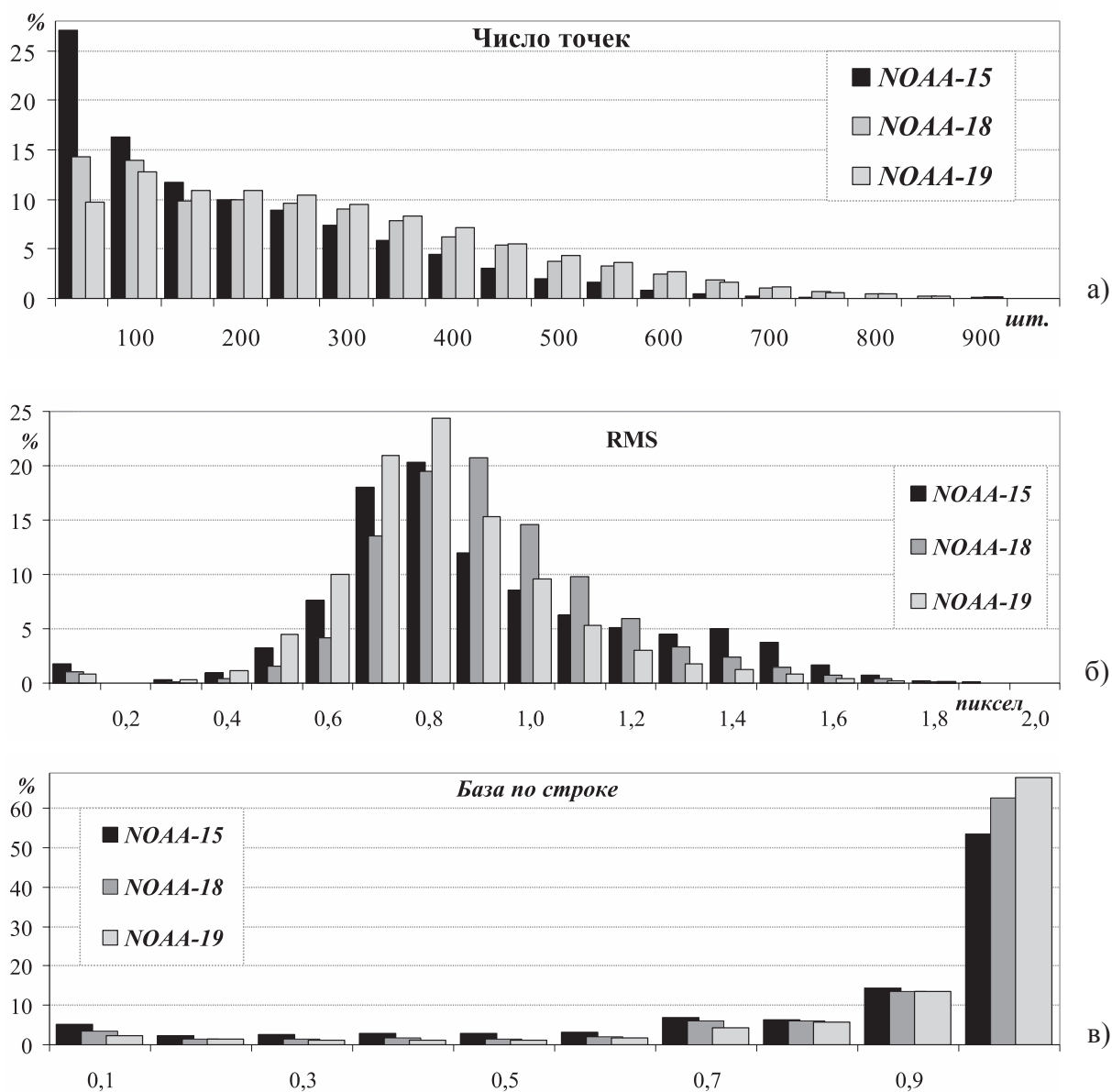


Рис. 5. Распределения количества изображений по каждому ИСЗ в зависимости от параметров конфигураций рассчитанных реперных точек

Расхождения показателей распределений по каждому ИСЗ, приведённых на *рис. 4* и *5*, напрямую связаны с продолжительностью сеансов приёма. Т.е. чем меньше продолжитель-

ность сеансов, тем хуже показатели привязки по реперным точкам. Так, средняя продолжительность сеансов по каждому ИСЗ составила: 7 минут (NOAA-15), 9,7 минут (NOAA-18) и 10,5 минут (NOAA-19). В свою очередь, это обусловлено специфическими условиями наблюдения (сплошная облачность, открытые морские акватории и т.п.), в результате которых уменьшается объём информации, пригодной для расчёта реперных точек на изображении.

На рис. 6 приведены гистограммы распределений количества изображений (только с прогнозной привязкой) по каждому ИСЗ в зависимости от абсолютных величин разницы долгот ближайших узлов витков орбиты, с которых выполнялся прогноз углов. Из представленных гистограмм следует, что для NOAA-15 во многих случаях перенос прогнозных углов был выполнен не с близлежащих витков орбиты (при поиске порог для разницы по времени между изображениями был установлен в 45 суток). Последние результаты анализа поведения вычисленных углов спутниковой платформы как для ИСЗ серии MetOp (Катаманов, 2015), так и для ИСЗ серии NOAA позволили сделать следующий вывод: прогноз привязки с пиксельной точностью можно выполнять с любых витков орбиты с одинаковым направлением. При таком способе прогнозирования необходимо вычислять значения углов на основе определённых функциональных зависимостей (для каждого отдельного периода времени) от абсолютной разницы долгот ближайших узлов витков орбиты. В следующей работе будут представлены результаты исследования, которые показывают, что если при прогнозной привязке данных AVHRR учитывать индивидуальные особенности поведения спутника с радиометром на орбите, то прогноз углов можно выполнять с любых витков орбиты с одинаковым направлением.

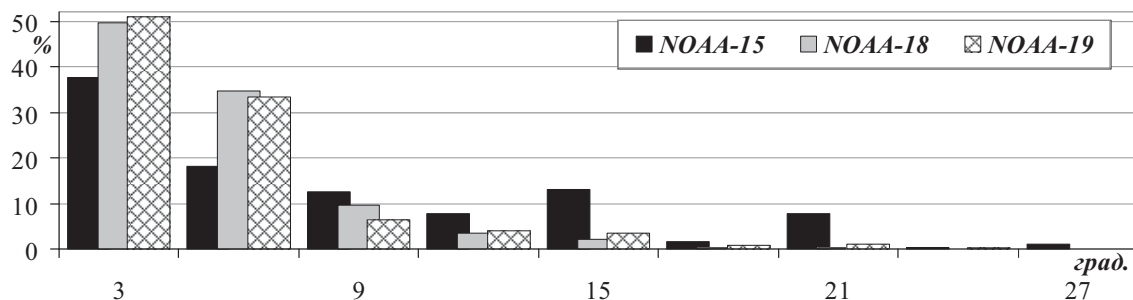


Рис. 6. Распределения количества изображений (с прогнозной привязкой) по каждому ИСЗ в зависимости от абсолютной разницы долгот ближайших узлов витков орбиты

Сравнение с альтернативными методами

Во многих работах, посвящённых решению задачи точной привязки изображений AVHRR, как правило авторы не приводят полную статистику результативности применения разработанных методов. Поэтому для сравнения результатов автоматической привязки, полученных представленным методом, с результатами альтернативных методов были выбраны только два метода. Первый из них – метод ANA (Brunel, Marsouin, 2000), который

был разработан во Французском метеорологическом центре. Данный метод также может дополнительно включаться в европейский пакет программ обработки спутниковых данных AAPP (Marsouin et al., 2011). В работе (Brunel, Marsouin, 2000) приведены в полном объёме данные о результативности применения метода ANA с 1996 по 1997 год для спутников NOAA-12 и NOAA-14. В работе (Dybbroe, 2005) приведены результаты применения метода ANA в Норвежском метеорологическом центре. В работе (Kamekawa, 2012) приведены результаты применения метода ANA в Японском метеорологическом агентстве.

Максимальное число рассчитываемых реперных точек методом ANA на изображениях AVHRR (сформированных в течение полного сеанса) как правило не превышает 20 шт. (Brunel, Marsouin, 2000). В работе (Kamekawa, 2012) были приведены результаты расчёта реперных точек для двух одиночных AVHRR изображений, полученных с NOAA-17 (№ орбиты 33895, 01.01.2009 г., 00:14:40 UTC) и с NOAA-18 (№ орбиты 18639, 01.01.2009 г., 03:45:19 UTC). Данные изображения также были приняты и обработаны в РСЦМОС ДВО РАН. Далее, было проведено сравнение результатов расчёта реперных точек методом ANA и представленным методом. Число рассчитанных альтернативным методом реперных точек (которые использовались для коррекции привязки) составило 8 шт. (для NOAA-17) и 11 шт. (для NOAA-18), нашим методом – 191 и 361 шт. соответственно (без учёта дублирующих точек по всем каналам). Общее число точек (рассчитанных разработанным методом) по изображениям 5 каналов AVHRR одновременно составило 435 и 811 шт.: 1 канал – 68 и 136 шт., 2 канал – 128 и 234 шт., 3 канал – 112 и 145 шт., 4 канал – 70 и 163 шт. и 5 канал – 57 и 133 шт. соответственно.

В работе (Dybbroe, 2005) было заявлено о полной невозможности использования метода ANA в зимний период времени для регионов с высокими широтами. Также в базе лэндмаркеров для дальневосточного региона, приведённой в работе (Kamekawa, 2012), отсутствуют лэндмаркеры на северном побережье Охотского моря. В основной работе (Brunel, Marsouin, 2000) была продемонстрирована неудовлетворительная работоспособность метода в зимний период времени: до 70% (для NOAA-14) и 80% (для NOAA-12) не привязанных по реперным точкам изображений. В летне-осенний период времени количество привязанных изображений (без прогноза) методом ANA не превышает 60% (Brunel, Marsouin, 2000). В нашем случае падения количества привязанных изображений по реперным точкам в зимний период времени не происходит (см. *рис. 4*). При этом в методе ANA используемые критерии привязки по реперным точкам являются более слабыми по сравнению с критериями представленного метода (Brunel, Marsouin, 2000).

Вторым альтернативным методом был выбран метод, разработанный в университете Данди (Великобритания). В работе (Crawford et al., 2003) в полном объёме приведены данные о результативности применения этого метода с октября 2002 г. по август 2003 г. для спутников NOAA-16 и NOAA-17. Общее количество привязанных альтернативным методом изображений AVHRR/NOAA-16, 17 по реперным точкам в летне-осенний период времени находилось в пределах 84–90%, а в зимний период времени опускалось до 73% (месяц февраль). Число рассчитываемых этим методом реперных точек на изображении

ях AVHRR находилось в пределах 10–150 шт. Средние значения медианы для величин RMS остаточных невязок в реперных точках для альтернативного метода составили 0,58 (NOAA-17) и 0,95 (NOAA-16) пиксела (Crawford et al., 2003). В нашем случае средние значения медианы величин RMS (если не учитывать прогнозную привязку) не превышают уровень 0,6 пиксела для всех спутников серии NOAA, начиная с NOAA-16. Возможной причиной завышения вышеуказанного показателя для NOAA-16 в случае альтернативного метода может являться то, что для привязки была использована ошибочная величина угла раствора сканера радиометра AVHRR/NOAA-16. Максимальные величины RMS остаточных невязок в реперных точках для альтернативного метода могут достигать до 2,5 пикселей. В нашем случае этот показатель не превышает 1,9 пиксела (с учётом прогнозной привязки).

Заключение

Детально описана разработанная технология автоматической географической привязки изображений AVHRR/NOAA, которая на протяжении последних лет используется при оперативной обработке в РСЦМОС ДВО РАН. Представлены результаты географической привязки изображений AVHRR, полученных с действующих ИСЗ серии NOAA в 2009–2015 гг. Приведены и проанализированы гистограммы распределений количества изображений AVHRR по каждому ИСЗ серии NOAA в зависимости от основных параметров, влияющих на качество географической привязки. Проведено сравнение результатов автоматической привязки по представленной методике с результатами применения альтернативных методов, использующихся при оперативной обработке в зарубежных спутниковых центрах. По web-ссылке (http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image) сайта РСЦМОС ДВО РАН представлена галерея автоматически привязанных RGB-изображений, построенных по данным AVHRR/NOAA. Разработанная технология автоматической привязки позволила значительно улучшить качество получаемых тематических и композиционных продуктов, при построении которых используются данные AVHRR с полярно-орбитальных ИСЗ серии NOAA и MetOp.

Работа поддержана Программами фундаментальных исследований Президиумов РАН и ДВО РАН («Дальний Восток»), грантом РФФИ (№ 14-01-00414).

Литература

1. *Катаманов С.Н.* Точная географическая привязка изображений AVHRR/NOAA без реперных точек // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 78–91.
2. *Катаманов С.Н.* Автоматический метод географической привязки изображений AVHRR/3 от полярно-орбитальных спутников серии MetOp // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 63–74.
3. *Эпштейн Ю.С., Гербек Э.Э.* Метод точной географической привязки изображений AVHRR NOAA // Электронный журнал «Исследовано в России». 2001. № 41. С. 456–464.
4. *Bordes P., Brunel P., Marsouin A.* Automatic Adjustment of AVHRR Navigation // J. Atmos. Ocean. Technol. 1992. Vol. 9. No. 1. P. 15–27.

5. Brunel P., Marsouin A. Operational AVHRR navigation results // *Int. J. Rem. Sens.* 2000. Vol. 21. No. 5. P. 951–972.
6. Crawford P.S., Scheidgen P., Harrmann O. Landmark correction for polar orbiters // *EUMETSAT Meteorological Satellite Conf. Weimar, Germany.* 2003. 8 p.
7. Dybbroe A. Improved navigation of Advanced Very High Resolution Radiometer data at high latitudes // *Tech. Proc. of the 14th International TOVS Study Conf. Beijing, China.* 25–31 May 2005. 8 p.
8. Emery W.J., Baldwin D.G., Matthews D. Maximum cross correlation automatic satellite image navigation and attitude corrections for open-ocean image navigation // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2003. Vol. 41. No. 1. P. 33–42.
9. Esquerdo J.C.D.M., Antunes J.F.G., Baldwin D.G., Emery W.J., Junior J.Z. An automatic system for AVHRR land surface product generation // *Int. J. Rem. Sens.* 2006. Vol. 27. No. 18. P. 3925–3942.
10. Eugenio F., Marques F. Automatic satellite image georeferencing using a contour-matching approach // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2003. Vol. 41. No. 12. P. 2869–2880.
11. Eugenio F., Marcello J. Feature-based algorithm for the automated registration of multisensorial/multitemporal oceanographic satellite imagery // *Open Access J.: Algorithms.* 2009. Vol. 2. No. 3. P. 1087–1104.
12. Huseby R.B., Halck O.M., Solberg R. A model-based approach for geometrical correction of optical satellite images // *Int. J. Rem. Sens.* 2005. Vol. 26. No. 15. P. 3205–3223.
13. Kamekawa N. Navigation adjustment for polar orbital satellites // *Meteorological Satellite Center Technical Note. Meteorological Satellite Center of JMA.* February 2012. No. 57. P. 27–38. (In Japanese).
14. Katamanov S.N. Automatic navigation of one pixel accuracy for meteorological satellite imagery // *Proc. 1st Russia and Pacific Conf. on Computer Technology and Applications. Vladivostok, Russia.* 2010. P. 269–274.
15. Khlopenkov K.V., Trishchenko A.P., Luo Y. Achieving subpixel georeferencing accuracy in the Canadian AVHRR processing system // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2010. Vol. 48. No. 4. P. 2150–2161.
16. Marsouin A., Brunel P., Atkinson N. AAPP documentation – Annex of scientific description: AAPP navigation // *EUMETSAT.* Version 1.3. October 2011. 29 p.
17. Moreno J., Melia J. A method for accurate geometric correction of NOAA AVHRR HRPT Data // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1993. Vol. 31. No. 1. P. 204–226.
18. Patt F.S., Gregg W.W. Exact closed-form geolocation algorithm for Earth survey sensors // *Int. J. Rem. Sens.* 1994. Vol. 15. No. 18. P. 3719–3734.
19. Pergola N., Tramutoli V. SANA: sub-pixel automatic navigation of AVHRR imagery // *Int. J. Rem. Sens.* 2000. Vol. 21. No. 12. P. 2519–2524.
20. Pergola N., Tramutoli V. Two years of operational use of Sub-pixel Automatic Navigation of AVHRR scheme: accuracy assessment and validation // *Rem. Sens. Env.* 2003. Vol. 85. No. 2. P. 190–203.
21. Rosborough G.W., Baldwin D., Emery W.J. Precise AVHRR image navigation // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 1994. Vol. 32. P. 644–657.
22. Scheidgen P., Harrmann O., Crawford P.S. Improvement of image navigation by means of Doppler correction and landmark correction for polar orbiters // *EUMETSAT Meteorological Satellite Conf. Dublin, Ireland.* 2002. P. 168–173.
23. Snyder J.P. Map projections – a working manual // *USGS Professional Paper 1395.* U.S. Government Printing Office, Washington. 1987. 383 p.
24. Vallado D.A., Crawford P.S., Hujsak R., Kelso T.S. Revisiting spacetrack report #3 // *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf. Keystone, CO.* 21–24 August 2006. 94 p.
25. Wessel P., Smith W.H.F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101. No. B4. P. 8741–8743.

NOAA/AVHRR images navigation results in operational processing conditions

S.N. Katamanov

*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: sergey@satellite.dvo.ru*

The navigation results obtained by the operational processing of NOAA/AVHRR images at the Center for Regional Satellite Monitoring of Environment of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (CRSME FEB RAS) are presented. The navigation method of satellite images created in CRSME FEB RAS allows fully automatic navigation of each image obtained during a full receiving session with pixel accuracy. The developed navigation method is based on the orbital motion model SGP4 (with propagation NORAD TLE telegrams) and a mathematical model of physical image deformation. Pixel navigation accuracy for each image is achieved by computing satellite attitude angles (roll, pitch and yaw) based on ground control points that are automatically defined in an image or forecasting. Transfer of satellite attitude angles calculated by images ground control points is executed at the navigation forecast. The above mentioned images have been received on close satellite orbits in the same direction. The navigation

results are presented and discussed for the long series of AVHRR imagery obtained with operational satellites NOAA (-15, -18, -19) from 2009 to 2015 in the CRSME FEB RAS. The comparison with alternative methods navigation results from foreign satellite centers is considered. Outcomes of NOAA/AVHRR automatic navigation can be seen in the RGB image gallery at the CRSME FEB RAS website (http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image).

Keywords: NOAA, AVHRR, satellite images, automatic navigation, ground control points, satellite attitude (roll, pitch and yaw), navigation attitude forecasting, close satellite orbits, map projection

Accepted: 30.11.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-187-202

References

1. Katamanov S.N., Tochnaya geograficheskaya privyazka izobrazhenii AVHRR/NOAA bez reперnykh tochek (Accurate NOAA/AVHRR image navigation without ground control points), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 78–91.
2. Katamanov S.N., Avtomaticheskii metod geograficheskoi privyazki izobrazhenii AVHRR/3 ot polyarno-orbital'nykh sputnikov serii MetOp (Automatic method navigation of AVHRR/3 imagery from polar-orbital MetOp satellites), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 63–74.
3. Epshtein Yu.S., Gerbek E.E., Metod tochnoi geograficheskoi privyazki izobrazhenii AVHRR NOAA (Method accurate navigation of NOAA/AVHRR imagery), *Electronic journal "Issledovano v Rossii"*, 2001, No. 41, pp. 456–464.
4. Bordes P., Brunel P., Marsouin A., Automatic Adjustment of AVHRR Navigation, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1992, Vol. 9, No. 1, pp. 15–27.
5. Brunel P., Marsouin A., Operational AVHRR navigation results, *Int. J. Rem. Sens.*, 2000, Vol. 21, No. 5, pp. 951–972.
6. Crawford P.S., Scheidgen P., Harrmann O., Landmark correction for polar orbiters, *EUMETSAT Meteorological Satellite Conf., Weimar, Germany*, 2003, 8 p.
7. Dybbroe A., Improved navigation of Advanced Very High Resolution Radiometer data at high latitudes, *Tech. Proc. of the 14th International TOVS Study Conf.*, Beijing, China, 25–31 May 2005, 8 p.
8. Emery W.J., Baldwin D.G., Matthews D., Maximum cross correlation automatic satellite image navigation and attitude corrections for open-ocean image navigation, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 2003, Vol. 41, No. 1, pp. 33–42.
9. Esquerdo J.C.D.M., Antunes J.F.G., Baldwin D.G., Emery W.J., Junior J.Z., An automatic system for AVHRR land surface product generation, *Int. J. Rem. Sens.*, 2006, Vol. 27, No. 18, pp. 3925–3942.
10. Eugenio F., Marques F., Automatic satellite image georeferencing using a contour-matching approach, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 2003, Vol. 41, No. 12, pp. 2869–2880.
11. Eugenio F., Marcello J., Featured-based algorithm for the automated registration of multisensorial/multitemporal oceanographic satellite imagery, *Open Access J.: Algorithms*, 2009, Vol. 2, No. 3, pp. 1087–1104.
12. Huseby R.B., Halck O.M., Solberg R., A model-based approach for geometrical correction of optical satellite images, *Int. J. Rem. Sens.*, 2005, Vol. 26, No. 15, pp. 3205–3223.
13. Kamekawa N., Navigation adjustment for polar orbital satellites, *Meteorological Satellite Center Technical Note*, Meteorological Satellite Center of JMA, February 2012, No. 57, pp. 27–38, (In Japanese).
14. Katamanov S.N., Automatic navigation of one pixel accuracy for meteorological satellite imagery, *Proc. 1st Russia and Pacific Conf. on Computer Technology and Applications*, Vladivostok, Russia, 2010, pp. 269–274.
15. Khlopenkov K.V., Trishchenko A.P., Luo Y., Achieving subpixel georeferencing accuracy in the Canadian AVHRR processing system, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 2010, Vol. 48, No. 4, pp. 2150–2161.
16. Marsouin A., Brunel P., Atkinson N., *AAPP documentation – Annex of scientific description: AAPP navigation*, EUMETSAT, Version 1.3, October 2011, 29 p.
17. Moreno J., Melia J., A method for accurate geometric correction of NOAA AVHRR HRPT Data, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1993, Vol. 31, No. 1, pp. 204–226.
18. Patt F.S., Gregg W.W., Exact closed-form geolocation algorithm for Earth survey sensors, *Int. J. Rem. Sens.*, 1994, Vol. 15, No. 18, pp. 3719–3734.
19. Pergola N., Tramutoli V., SANA: sub-pixel automatic navigation of AVHRR imagery, *Int. J. Rem. Sens.*, 2000, Vol. 21, No. 12, pp. 2519–2524.
20. Pergola N., Tramutoli V., Two years of operational use of Sub-pixel Automatic Navigation of AVHRR scheme: accuracy assessment and validation, *Rem. Sens. Env.*, 2003, Vol. 85, No. 2, pp. 190–203.
21. Rosborough G.W., Baldwin D., Emery W.J., Precise AVHRR image navigation, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1994, Vol. 32, pp. 644–657.
22. Scheidgen P., Harrmann O., Crawford P.S., Improvement of image navigation by means of Doppler correction and landmark correction for polar orbiters, *EUMETSAT Meteorological Satellite Conf.*, Dublin, Ireland, 2002, pp. 168–173.
23. Snyder J.P., Map projections – a working manual, *USGS Professional Paper 1395*, U.S. Government Printing Office, Washington, 1987, 383 p.
24. Vallado D.A., Crawford P.S., Hujsak R., Kelso T.S., Revisiting spacetrack report #3, *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf.*, Keystone, CO, 21–24 August 2006, 94 p.
25. Wessel P., Smith W.H.F., A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database, *J. Geophys. Res.*, 1996, Vol. 101, No. B4, pp. 8741–8743.