

## Автоматический метод географической привязки изображений AVHRR/3 полярно-орбитальных спутников серии MetOp

С.Н. Катаманов

*Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН*

*Владивосток, 690041, Россия*

*E-mail: sergey@satellite.dvo.ru*

Представлены результаты исследований, проведенных при разработке автоматического метода географической привязки изображений, полученных радиометром AVHRR/3 с европейских спутников серии MetOp в течение полного сеанса приема. Метод основан на орбитальной модели движения SGP4 (с прогнозными телеграммами TLE) в сочетании с математической моделью, которая достаточно точно учитывает все аспекты формирования изображения. В рамках последней модели учитывается основной режим управления ориентацией спутниковой платформы MetOp (*“yaw steering”*) и геометрия сканирования радиометром подстилающей поверхности Земли. С помощью метода реперных точек были уточнены номинальные величины угла поля зрения для каждого из радиометров AVHRR/3, установленных на спутниках MetOp-A и MetOp-B. Пиксельная точность привязки каждого изображения достигается вычислением оптимальных значений углов ориентации спутниковой платформы в пространстве (крен, тангаж и рысканье) по автоматически рассчитываемым реперным точкам. Для тех изображений, у которых конфигурация реперных точек не позволяет восстановить полный набор параметров коррекции привязки, выполняется прогноз привязки. На основе установленной зависимости вычисленных углов ориентации спутниковой платформы от расположения трасс витков орбиты на поверхности Земли предложен подход для прогнозирования привязки. Приведены результаты апробации разработанного метода привязки на длительной серии данных AVHRR/3 спутников MetOp-A и MetOp-B, полученных в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды (РСЦМОС) ДВО РАН. По [web-ссылке \(http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat\\_image\)](http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image) сайта РСЦМОС ДВО РАН размещена галерея RGB-изображений, по которым можно непосредственно оценить результаты привязки предложенным методом.

**Ключевые слова:** MetOp, AVHRR, спутниковые изображения, *“yaw steering”*, географическая привязка, реперные точки, углы ориентации спутниковой платформы (крен, тангаж и рысканье), прогноз привязки, близлежащие витки орбиты

### Введение

Европейские полярно-орбитальные спутники серии MetOp оснащены современными системами зондирования, которые предоставляют широкие возможности для проведения исследований в области дистанционного зондирования Земли (Klaes et al., 2007). Серия MetOp является частью разрабатываемой системы IJPS (Initial Joint Polar-Orbiting Operational Satellite), в рамках которой между EUMETSAT и NOAA заключено соглашение о взаимном предоставлении измерительной аппаратуры для установки на КА. Основная часть измерительных приборов спутников MetOp идентична комплекту приборов, установленному на спутниках серии NOAA. Одним из таких приборов является радиометр AVHRR/3, который был предоставлен NOAA. По данным измерений AVHRR/3 можно получать следующую информационную продукцию (регионального и глобального покрытия): цифровые карты температуры подстилающей поверхности, оценки параметров облачности и осадков, данные мониторинга атмосферных явлений, карты и параметры растительного, снежного и ледового покровов. У всех радиометров AVHRR/3, устанавливаемых на ИСЗ серии MetOp, 3-й канал является переключаемым с видимого диапазона (1,58–1,64 мкм) на инфракрасный диапазон (3,55–3,93 мкм) в зависимости от условий освещения Земной поверхности Солнцем. В настоящий момент на орбите находятся два спутника серии MetOp: MetOp-A (был за-

пущен 19 октября 2006 г.) и MetOp-B (был запущен 17 сентября 2012 г.). Оба спутника находятся на утренней орбите, тем самым они дополняют группировку действующих ИСЗ серии NOAA, находящихся на вечерней орбите. Основным режимом управления ориентацией (в пространстве) платформы ИСЗ серии MetOp при движении на орбите является режим “*yaw steering*”. Такой режим управления ориентацией платформы обеспечивает необходимые условия для работы на орбите прибора ASCAT (Advanced SCATerometer), устанавливаемого на все спутники серии MetOp. В режиме “*yaw steering*” спутниковая платформа постоянно направлена по меридиану Земли, а не по траектории орбиты (например, как у ИСЗ серии NOAA). В результате чего при движении спутника по орбите платформа как бы постоянно подворачивает, в основном по углу рысканья (Sánchez et al., 2012). По двум другим углам (тангажу и крену) платформа ИСЗ стабилизируется так, чтобы оптическая ось приборов, установленных на спутниковой платформе, была направлена по местной геодезической вертикали в надир (подспутниковую точку).

Ключевым моментом при создании информационных продуктов по данным ДЗЗ является получение точной географической привязки изображений. Данная работа посвящена результатам разработки автоматического метода точной привязки изображений AVHRR/MetOp. В рамках исследования рассмотрены и решены следующие проблемы, связанные с обработкой данных AVHRR/MetOp. Первая проблема заключается в том, что номинальные величины угла поля зрения (FOV, Field Of View) для каждого из радиометров AVHRR/3, установленных на спутниках MetOp-A и MetOp-B, не соответствуют заявленным. Для ИСЗ MetOp-A это было подтверждено результатами работы (Ackermann et al., 2007). Данное рассогласование приводит к тому, что ошибка привязки увеличивается от надира к краям изображения и достигает 2-х пикселей. Вторая проблема связана с тем, что для многих изображений (с продолжительностью сеанса менее 5 минут) откорректировать привязку по реперным точкам с необходимой точностью невозможно. Большая часть таких изображений (не менее 40%) в РСЦМОС ДВО РАН принимается с ИСЗ MetOp-A. Такая особенность вызвана тем, что данные с этого спутника передаются (в режиме “*broadcast*”) только над определенными географическими районами. Точную географическую привязку для такого рода данных предлагается обеспечить с помощью прогнозирования параметров коррекции привязки (Катаманов, 2014).

### **Используемые методы и данные**

При разработке метода географической привязки данных AVHRR/MetOp был использован подход, суть которого заключается в моделировании всех основных аспектов формирования изображения радиометром на орбите. Для предсказания положения ИСЗ на орбите была применена широко известная модель орбитального движения SGP4 в сочетании с прогнозными телеграммами TLE (Vallado et al., 2006). При привязке использовались телеграммы TLE из административных сообщений (ММММ), которые содержатся в потоке данных, передаваемых со спутника в режиме “*broadcast*” (EUMETSAT FDT, 2013). Инфор-

мация в административных сообщениях представлена в текстовом виде с использованием XML-тегов (Damiano et al., 2012). Разница по времени между началом сеанса приема данных и моментом генерации телеграммы TLE из ММММ обычно не превышает одних суток (рис. 1) за исключением тех случаев, когда должна быть выполнена следующая коррекция орбиты спутника. В такие периоды времени телеграмма не обновляется в течение 2–3 суток, при этом всегда передаются две телеграммы (вторая телеграмма должна быть использована только после проведения коррекции орбиты). На рис. 1 величины графика, которые составляет более 48 часов, соответствуют моментам проведения очередной коррекции спутниковой орбиты. То есть в среднем раз в три месяца выполняется коррекция орбиты ИСЗ серии MetOp. Информация о времени проведения запланированной коррекции спутниковой орбиты всегда содержится в административных сообщениях (EUMETSAT FDT, 2013).

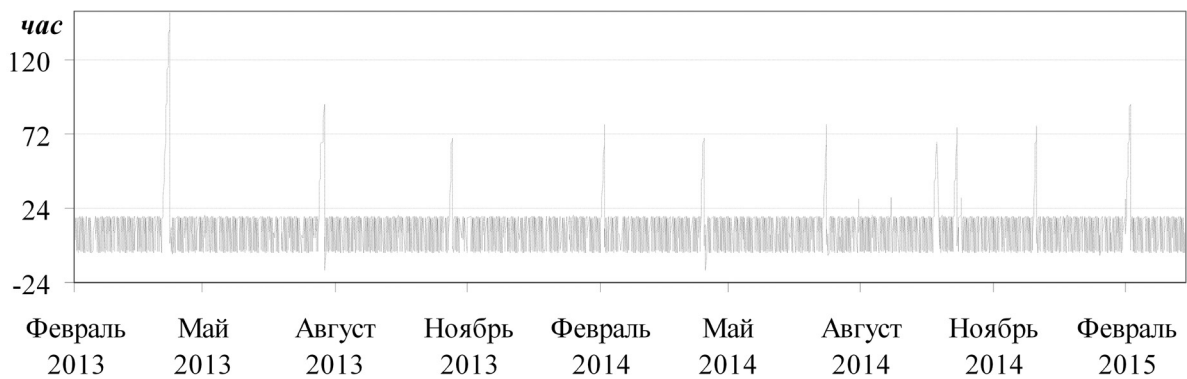


Рис. 1. Разница по времени между началом сеанса приема данных и моментом генерации телеграммы TLE для ИСЗ MetOp-B

Сканирующая система радиометра AVHRR/3 относится к типу “cross-track”, и заявленная величина FOV сканера AVHRR/3 составляет  $110,75^\circ$  (Marsouin et al., 2011). Для решения прямой и обратной задач географической привязки изображений были использованы алгоритмы, приведенные в работе (Эпштейн, Гербек, 2001). Вычисление геодезических координат выполнялось в системе референц-эллипсоида WGS84 (World Geodetic System 1984). Построение осей  $(\vec{u}, \vec{w}, \vec{v})$  орбитальной системы координат (ОСК), связанной с ИСЗ при движении на орбите (с учетом обеспечения ориентации в режиме “yaw steering”), выполняется согласно следующим соотношениям:

$$\begin{cases} \vec{V}_r = \vec{V} - \vec{\omega}_E \times \vec{R} \\ \vec{w} = -\vec{u} \times \vec{V}_r / \|\vec{u} \times \vec{V}_r\|, \\ \vec{v} = \vec{w} \times \vec{u} \end{cases} \quad (1)$$

где  $\vec{V}_r$  – относительной скоростью ИСЗ в геоцентрической системе координат (ГСК);  $\vec{V}$  – абсолютная скорость ИСЗ в ГСК;  $\vec{\omega}_E$  – угловая скорость вращения Земли;  $\vec{R}$  – радиус-вектор центра масс спутника в ГСК;  $\vec{u}$  – единичный вектор нормали от ИСЗ к поверхности референц-эллипсоида Земли. Вектора  $\vec{R}$  и  $\vec{V}$  вычисляются по орбитальной модели движения.

Для построения  $\vec{i}$  был использован алгоритм, приведенный в работе (Patt, Gregg, 1994). В методе привязки изображений AVHRR/MetOp европейского пакета программ обработки спутниковых данных AAPP (Marsouin et al., 2011) построение ОСК также выполняется согласно соотношениям формулы (1).

### *Коррекция географической привязки с пиксельной точностью*

В работе (Sánchez et al., 2012) было показано, что максимальные ошибки реализации орбитальной ориентации ИСЗ серии MetOp по каждому углу могут достигать до:  $0,05^\circ$  (для рысканья),  $0,03^\circ$  (для тангажа) и  $0,01^\circ$  (для крена). При этом длительность по времени, в течение которого отклонения величин каждого из углов не превосходят вышеуказанные, может достигать до 1 часа (Sánchez et al., 2012). Таким образом, при использовании гипотезы о постоянстве углов в течение полного сеанса приема (до 15 минут) максимальные изменения значений углов могут привести к ошибкам привязки не более 1 пиксела AVHRR. Для достижения пиксельной точности привязки данных AVHRR/MetOp в разработанном методе используется процедура коррекции, которая вычисляет оптимальные значения углов ориентации платформы с радиометром в пространстве (в соответствии с приведенной гипотезой). Для вычисления углов был использован подход, приведенный в работе (Rosborough et al., 1994), в результате которого решение этой задачи сведено к системе линейных уравнений. Расчет истинных положений GCPs выполняется с помощью метода, который был ранее разработан и апробирован при автоматической привязке данных других спутников (Катаманов, 2010). Определение реперных точек на изображениях AVHRR/MetOp выполняется по всем каналам без проведения предварительной фильтрации облачности. Для расчета истинных координат GCPs используется база лэндмаркеров, созданная на основе географической контурной базы GSHHG (Wessel, Smith, 1996). Наглядный пример используемой базы лэндмаркеров и маски суша/вода приведен в работе (Катаманов, 2013).

Уточнение номинальных величин угла поля зрения для каждого из радиометров AVHRR/3, установленных на спутниках MetOp-A и MetOp-B, было выполнено с помощью метода реперных точек. Для этого на каждом изображении были рассчитаны пары GCPs по лэндмаркерам, у которых центры располагались в одном и том же скане, но по разные стороны от надира изображения и удаленных на одинаковом расстоянии. В результате чего ошибка привязки, обусловленная только углом крена, для каждой такой пары реперных точек будет одинаковой (т.к. реальные углы сканирования соответствующих лэндмаркеров равны). Далее для каждой такой пары GCPs приравниваем (и суммируем по всем парам) правые части уравнения для определения величины угла крена по невязкам в GCPs (Rosborough et al., 1994). Поправка к FOV каждого из радиометров вычислялась как средняя величина по всем таким парам реперных точек. В итоге уточненные величины угла поля зрения для каждого из радиометров AVHRR/3 составили:  $110,4^\circ$  (MetOp-A) и  $110,5^\circ$  (MetOp-B).

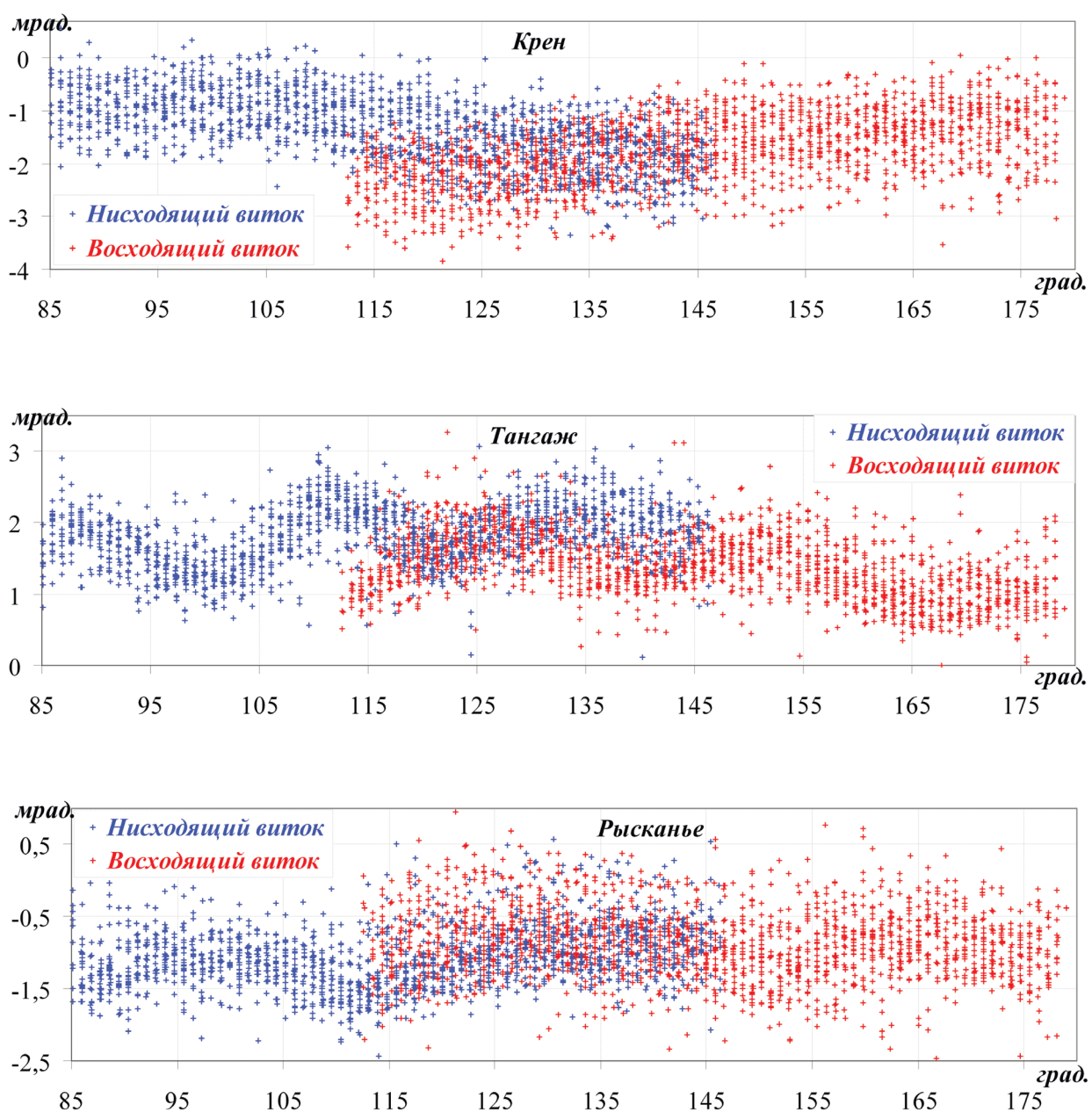
Вычисленная величина FOV для радиометра AVHRR/MetOp-A, совпадает с той, которая была определена в работе (Ackermann et al., 2007).

### Прогнозирование параметров коррекции привязки

При выборе подхода для прогноза параметров коррекции привязки было проанализировано поведение вычисленных углов положения платформы ИСЗ MetOp в зависимости от времени формирования изображений, направления и расположения трасс витков орбиты на поверхности Земли. Углы были вычислены по рассчитанным GCPs на изображениях AVHRR/3 (ИСЗ MetOp-A и MetOp-B), сформированных с декабря 2012 г. по март 2015 г. Анализировались только наборы значений углов, которые были отобраны согласно условиям, которым удовлетворяла искомая конфигурация реперных точек: количество точек не меньше 50 шт., величина “база по строке” не меньше 0,7 и значения RMS (Root Mean Square) остаточных невязок в GCPs не более 1 пиксела. Параметр “база по строке” – это отношение максимальной разницы координат реперных точек вдоль строки на изображении к длине строке, т.е. он определяет пространственную характеристику размещения конфигурации GCPs вдоль скана изображения. Проведенный анализ позволил выявить следующие особенности поведения и зависимости вычисленных углов характерные для обоих спутников серии MetOp. Во-первых, для всех углов наблюдалось разделение их значений на две группы по типу витков орбиты (восходящие и нисходящие), на которых были сформированы изображения. Во-вторых, для всех углов была выявлена зависимость от долготы ближайших узлов витков орбиты, что эквивалентно расположению трасс витков орбиты на поверхности Земли. Аналогичный результат был ранее получен и для ИСЗ серии NOAA (Катаманов, 2014). На *рис. 2* приведены графики вычисленных значений углов ориентации платформы ИСЗ MetOp-B в зависимости от долготы ближайших узлов витков орбиты. Таким образом, исходя из полученных результатов, было предложено при прогнозировании параметров коррекции привязки выполнять перенос вычисленных значений углов по GCPs на изображениях AVHRR/3, которые были сформированы на близлежащих витках орбиты (с одинаковым направлением).

Далее для вышеуказанной серии данных AVHRR/MetOp была выполнена апробация предложенного подхода прогнозирования привязки. Т.е. для непривязанных изображений, согласно критерию оценки точности привязки по GCPs, при коррекции привязки использовались прогнозные значения углов. В нашем случае изображение AVHRR/MetOp считалось привязанным по GCPs, если рассчитанная конфигурация точек удовлетворяла следующим условиям: количество точек не меньше 35 шт., величина “база по строке” не меньше 0,5 и значения RMS остаточных невязок в GCPs не более 1,5 пиксела соответственно. В качестве характеристики, определяющей пространственное рассогласование трасс витков орбиты на поверхности Земли, использовалась величина абсолютной разницы долгот ближайших узлов орбиты. На *рис. 3* приведены гистограммы распределений количества изображений каждого ИСЗ (для которых

выполнялся прогноз привязки) в зависимости от абсолютных величин разницы долгот ближайших узлов витков орбиты. Из представленных гистограмм на *рис. 3* следует, что для ИСЗ MetOp-A во многих случаях перенос прогнозных наборов углов был выполнен не с близлежащих витков орбиты (при поиске порог для разницы по времени между изображениями был установлен в 45 суток). Поэтому для данного спутника предлагается в дальнейшем (т.к. необходимо провести дополнительные исследования) при прогнозировании привязки вычислять значения углов на основе определенных функциональных зависимостей от абсолютной разницы долгот ближайших узлов витков орбиты. Исходя из приведенных графиков (*рис. 2*), ошибка аппроксимации зависимостей для каждого угла в общем не должна превышать 1 миллирадиана



*Рис. 2. Вычисленные углы ориентации платформы ИСЗ MetOp-B по GCPs в зависимости от долготы ближайших узлов витков орбиты*

(что сопоставимо с угловыми размерами 1 пикселя AVHRR). Например, для угла крена достаточно будет использовать линейную зависимость. А для углов тангажа и рысканья необходимо будет для описания соответствующих зависимостей использовать тригонометрические функции.

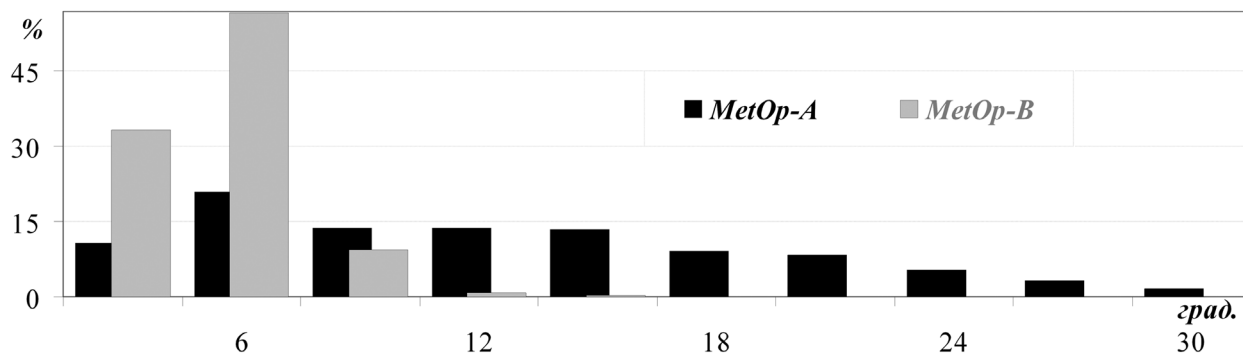


Рис. 3. Распределения количества изображений (с прогнозной привязкой) по каждому ИСЗ в зависимости от абсолютной разницы долгот ближайших узлов витков орбиты

### Результаты географической привязки изображений

На рис. 4 приведены графики распределений (помесячно) количества изображений AVHRR/3 по каждому ИСЗ серии MetOp (в процентах от общего числа) в зависимости от способа проведенной коррекции привязки (по реперным точкам или прогнозированием). Сумма графиков обоих способов привязки по каждому спутнику во всех случаях равна 100% (т.е. для всех изображений, не привязанных по GCPs, были использованы прогнозные углы).

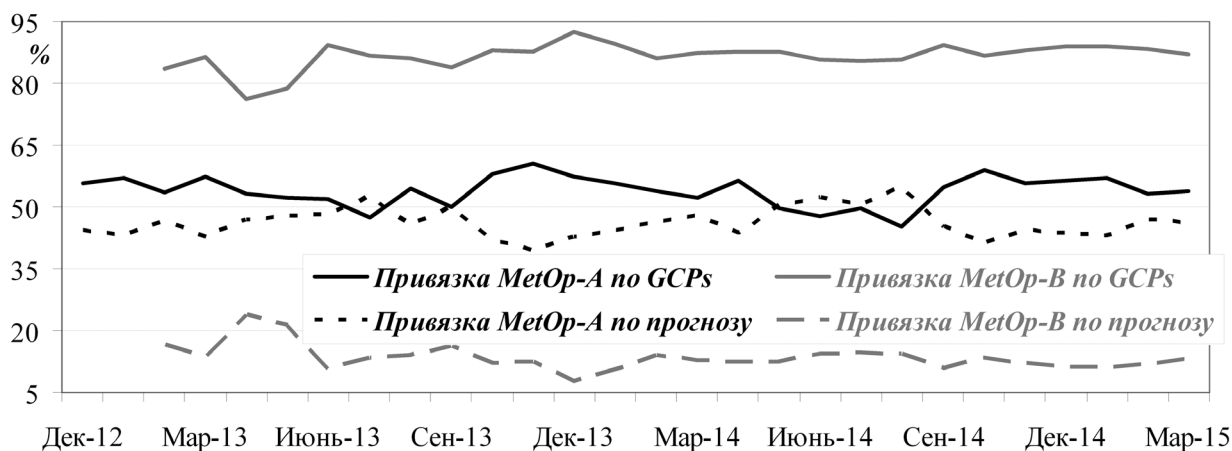
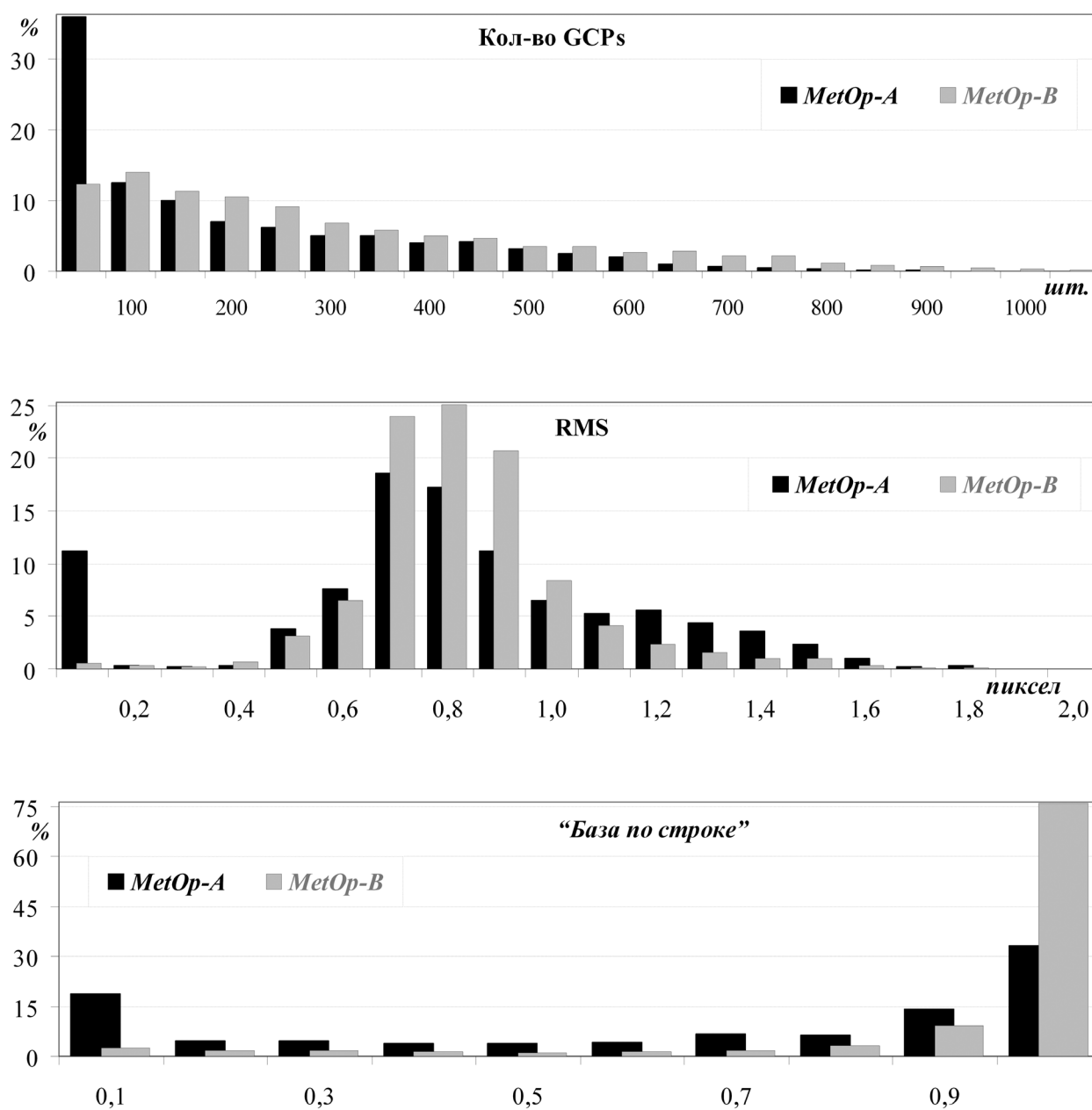


Рис. 4. Распределения количества изображений AVHRR/3 по каждому ИСЗ серии MetOp в зависимости от способов проведенной коррекции привязки

Каких-либо существенных колебаний на графиках *рис. 4* не наблюдается, т.е. эффективность расчета реперных точек на изображениях практически не меняется в течение всего времени года. Незначительные колебания графиков были вызваны нестабильным приемом данных с ИСЗ в соответствующие периоды времени.

Далее для этой же серии данных AVHRR/MetOp были построены гистограммы распределений количества изображений (в процентах от общего числа) по каждому ИСЗ серии MetOp в зависимости от статистических параметров конфигураций рассчитанных на них GCPs. В данном случае учитывались все изображения, т.е. привязка которых осуществлялась обоими способами. В случае прогнозной привязки рассчитанные на изображениях реперные точки

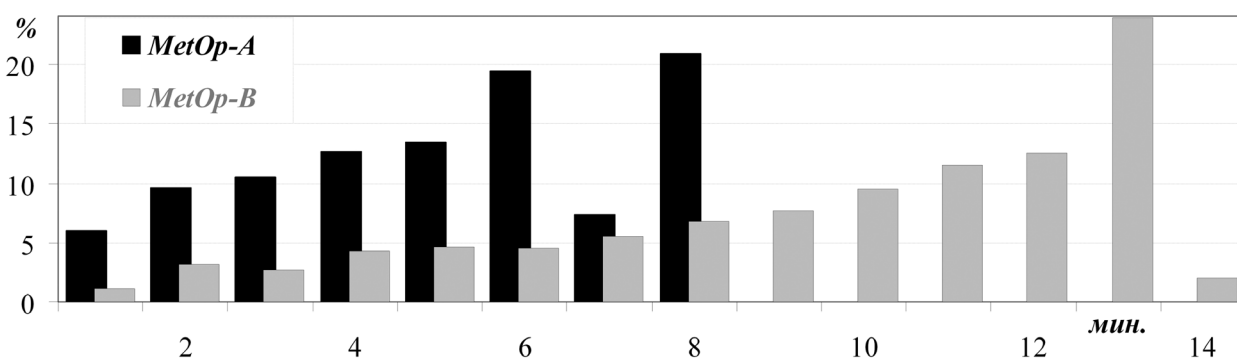


*Рис. 5. Распределения количества изображений AVHRR/3 по каждому ИСЗ серии MetOp в зависимости от статистических параметров конфигураций рассчитанных GCPs*



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 GCP не превышала 1,5 пиксела. На *рис. 5* вверху приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от числа рассчитанных для них GCPs. При определении числа GCPs рассчитанные реперные точки по одному и тому же лэндмаркеру на различных каналах отождествлялись как одна точка. Категория изображений ИСЗ MetOp-A, у которых количество GCPs меньше 50, содержит значительное количество изображений, на которых не было рассчитано ни одной точки. На *рис. 5* в центре приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от величин RMS остаточных невязок в GCPs, т.е. которые были рассчитаны после проведения коррекции привязки (по вычисленным или спрогнозированным значениям углов). Из данных распределений следует, что в результате проведенной коррекции привязки не менее 95% изображений спутников MetOp-B и MetOp-A имеют величину RMS, не превышающую 1,2 и 1,4 пиксела, соответственно. На *рис. 5* внизу приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от величин “база по строке” конфигураций рассчитанных GCPs (определение смотрите выше). Из анализа данных гистограмм видно, что количество изображений, у которых величины параметра “база по строке” меньше 0,5, не более 10% (для MetOp-B) и 32% (для MetOp-A).

Значительные расхождения показателей распределений, приведенных на *рис. 4* и *5*, для спутников MetOp-A от MetOp-B можно объяснить следующим образом. На *рис. 6* приведена гистограмма распределения количества изображений AVHRR/3 по каждому ИСЗ серии MetOp в зависимости от продолжительности сеанса приема. Из данных распределений видно, что максимальная продолжительность сеансов с MetOp-A составила не более 8 минут. При этом количество изображений AVHRR/MetOp-A, у которых продолжительность сеансов была не более 5 минут, составляет около 52% от общего числа. А расчет реперных точек для таких данных является крайне затруднительным, что обусловлено постоянным наличием следующих условий формирования изображения: сплошная облачность, открытые морские акватории и т.п.



*Рис. 6. Распределения количества изображений AVHRR/3 по каждому ИСЗ серии MetOp в зависимости от продолжительности сеанса приема*

## Заключение

Уточненные с помощью метода реперных точек номинальные величины угла поля зрения (FOV) для каждого из радиометров AVHRR/3 составили: 110,4° (MetOp-A) и 110,5° (MetOp-B). На основе установленной зависимости вычисленных углов положения платформы ИСЗ серии MetOp от долготы ближайших узлов витков орбиты предложен подход прогнозирования параметров коррекции привязки. При прогнозе привязки выполняется перенос вычисленных значений углов по GCPs на изображениях, которые были сформированы на близлежащих витках орбиты (с одинаковым направлением). Представлены результаты географической привязки изображений AVHRR/MetOp (сформированных с декабря 2012 г. по март 2015 г.) с вычислением постоянных значений углов положения спутниковой платформы для полного сеанса приема по GCPs или прогнозированием. Приведены и проанализированы гистограммы распределений количества изображений AVHRR/3 отдельно для каждого ИСЗ MetOp-A и MetOp-B в зависимости от статистических параметров конфигураций рассчитанных реперных точек. По web-ссылке ([http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat\\_image](http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image)) сайта РСЦМОС ДВО РАН размещена галерея RGB-изображений, по которым можно непосредственно оценить результаты привязки данных AVHRR/MetOp разработанным методом. Предложенный метод привязки также может быть применен для данных радиометра AVHRR/3, который будет установлен на последнем спутнике этой серии MetOp-C (запуск запланирован на 2018 г.). Разработанный метод автоматической привязки позволит значительно улучшить качество получаемых тематических и композиционных продуктов, при построении которых используется данные AVHRR/3 с полярно-орбитальных ИСЗ серии MetOp.

Работа поддержана Программой фундаментальных исследований ДВО РАН «Дальний Восток», Программами фундаментальных исследований Президиума РАН и грантом РФФИ (№ 14-01-00414\15).

## Литература

1. Катаманов С.Н. Разработка автоматического метода географической привязки изображений MVISR полярно-орбитального спутника FengYun-1D // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 85–93.
2. 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.
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. Ackermann J., Klaes K.D., McKernan E., Montagner F., Heinemann T., Schlüssel P., Schraidt R., Fiedler L., Lang R., Bonsignori R. ATOVS/AVHRR onboard MetOp-A: validation and use of products // Proc. EUMETSAT Meteorological Satellite Conf. Amsterdam, Netherlands. 24–28 Sep. 2007. 7 p.
5. Damiano A., Righetti P.L., Soerensen A.M. EUMETSAT Multi-Mission Administrative Message goes Operational // Proc. 12th Int. Conf. on Space Operations. Stockholm, Sweden. 11–15 Jun. 2012. Vol. 3. P. 1910–1920.
6. EUMETSAT Flight Dynamics Team. Multi-Mission Administrative Message User Guide // Darmstadt, Germany. 7 Oct. 2013. Rev. v6B. 77 p.
7. 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.
8. Klaes K.D., Cohen M., Buhler Y., Schlüssel P., Munro R., Luntama J.-P., von Engeln A., O Cléirigh E., Bonekamp H., Ackermann J., Schmetz J. An introduction to the EUMETSAT Polar System // Bull. Amer. Meteor. Soc. 2007. Vol. 88. No. 7. P. 1085–1096.

9. Marsouin A., Brunel P., Atkinson N. AAPP documentation – Annex of scientific description: AAPP navigation // EUMETSAT. Oct. 2011. Version 1.3. 29 p.
10. Patti 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.
11. Rosborough G.W., Baldwin D., Emery W.J. Precise AVHRR image navigation // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1994. Vol. 32. P. 644–657.
12. Sánchez P.G., Cambriles A.P., Eufrásio J., Righetti P.L. New EUMETSAT polar system attitude monitoring software // J. of Aerospace Engineering, Sciences and Applications. 2012. Vol. 4. No. 3. P. 80–92.
13. Vallado D.A., Crawford P.S., Hujsak R., Kelso T.S. Revisiting spacetrack report #3 // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf. Keystone, CO. 21–24 Aug. 2006. 94p.
14. 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.

## Automatic navigation method for AVHRR/3 imagery from polar-orbital MetOp satellites

S.N. Katamanov

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

Results of the development of an automatic navigation method for AVHRR/3 images obtained during a full receiving session of the European MetOp satellites are presented. The method is based on SGP4 orbital motion model (with propagation TLE telegrams) and a mathematical model of MetOp/AVHRR physical image formation. The last model takes into account the main attitude control mode of the MetOp satellite platform (yaw steering) and scanning geometry of the Earth surface. Using the method of ground control points (GCPs), FOV (Field Of View) nominal values were refined for AVHRR/3 radiometers mounted on MetOp-A and MetOp-B satellites. Pixel navigation accuracy is achieved by computing satellite attitude angles (roll, pitch and yaw) based on GCPs that are automatically defined in an image. If the GCPs configuration on the image does not allow restoring a full set of navigation correction parameters, then navigation attitude forecasting is performed. An approach to navigation forecasting is suggested based on the calculated MetOp attitude angles dependence on the track location of satellite orbits. The approbation results of the new navigation method are presented and discussed for long series of MetOp/AVHRR data received at the Center for Regional Satellite Monitoring of Environment of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (CRSME FEB RAS). The navigation results by the proposed method are presented in an RGB-image gallery at the CRSME FEB RAS website ([http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat\\_image](http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image)).

**Keywords:** MetOp, AVHRR, satellite images, yaw steering, navigation, ground control points, satellite attitude (roll, pitch and yaw), navigation attitude forecasting, close satellite orbits

### References

1. Katamanov S.N., Razrabotka avtomaticheskogo metoda geograficheskoi privyazki izobrazhenii MVISR polyarno-orbital'nogo sputnika FengYun-1D (Development of automatic method navigation for MVISR imagery of polar-orbital satellite FengYun-1D), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 85–93.
2. Katamanov S.N., Tochnaya geograficheskaya privyazka izobrazhenii AVHRR/NOAA bez reперnykh toчек (Accurate NOAA/AVHRR image navigation without ground control points), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 78–91.
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. Ackermann J., Klaes K.D., McKernan E., Montagner F., Heinemann T., Schlüssel P., Schraidt R., Fiedler L., Lang R., Bonsignori R., ATOVS/AVHRR onboard MetOp-A: validation and use of products, *Proc. EUMETSAT Meteorological Satellite Conf.*, Amsterdam, Netherlands. 24–28 September 2007, 7 p.
5. Damiano A., Righetti P.L., Soerensen A.M., EUMETSAT Multi-Mission Administrative Message goes Operational, *Proc. 12th Int. Conf. on Space Operations*, Stockholm, Sweden, 11–15 Jun. 2012, Vol. 3, pp. 1910–1920.
6. EUMETSAT Flight Dynamics Team, *Multi-Mission Administrative Message User Guide*, Darmstadt, Germany, 7 Oct. 2013, Rev. v6B, 77 p.

7. 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.
8. Klaes K.D., Cohen M., Buhler Y., Schlüssel P., Munro R., Luntama J.-P., von Engeln A., Ó Cléirigh E., Bonekamp H., Ackermann J., Schmetz J., An introduction to the EUMETSAT Polar System, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2007, Vol. 88, No. 7, pp. 1085–1096.
9. Marsouin A., Brunel P., Atkinson N., *AAPP documentation – Annex of scientific description: AAPP navigation*, EUMETSAT, October 2011, Version 1.3, 29 p.
10. 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.
11. Rosborough G.W., Baldwin D., Emery W.J., Precise AVHRR image navigation, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1994, Vol. 32, pp. 644–657.
12. Sánchez P.G., Cambriles A.P., Eufrásio J., Righetti P.L., New EUMETSAT polar system attitude monitoring software, *J. of Aerospace Engineering, Sciences and Applications*, 2012, Vol. 4, No. 3, pp. 80–92.
13. 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.
14. 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.