

Точная географическая привязка изображений геостационарного спутника MTSAT-1R в формате HRIT

С.Н. Катаманов

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5

E-mail: sergey@satellite.dvo.ru

Ошибка географической привязки изображений, получаемых с японского геостационарного спутника MTSAT-1R в формате HRIT, с использованием стандартной процедуры может достигать до 10км, что недопустимо для многих задач спутникового мониторинга. В этой работе представлен метод коррекции географической привязки MTSAT-1R/HRIT изображений полного сеанса с пиксельной точностью. Метод основан на вычислении параметров коррекции привязки по невязкам автоматически рассчитанных реперных точек на изображении. Представлены результаты апробации разработанного метода на серии изображений в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

Ключевые слова: MTSAT-1R, формат HRIT, GEOS-проекция, привязка спутниковых изображений, реперные точки, коррекция привязки с пиксельной точностью.

Введение

После серии неудачных запусков в июле 2005 года Японским метеорологическим агентством (Japan Meteorological Agency, JMA) был введен в эксплуатацию новый геостационарный спутник MTSAT-1R (Multi-functional Transport SATellite) взамен вышедшего из строя GMS-5 (Geostationary Meteorological Satellite) в 2003 году. Высота ИСЗ на орбите составляет приблизительно 35800км и его местоположение на орбите – 140° восточной долготы (в.д.). В отличие от спутника GMS-5, который был оснащён радиометром VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer) со стабилизацией типа «dual-spin», MTSAT-1R оборудован новым радиометром JAMI, смонтированным на спутниковой платформе с трёх-осевой стабилизацией (*Puschell J.J. et al., 2003*). Радиометр JAMI регистрирует излучения подстилающей поверхности Земли в пяти спектральных диапазонах: видимый канал (0.55-0.9 мкм), ближний инфракрасный (ИК) канал (3.5-4.0 мкм), канал водяного пара (6.5-7.0 мкм), первый ИК (10.3-11.3 мкм) и второй ИК (11.5-12.5 мкм) каналы. Форматы HRIT (High Rate Information Transmission) и LRIT (Low Rate Information Transmission), разработанные Европейским космическим агентством (*Wolf R., Just D., 1999*), являются основными для передачи изображений конечным пользователям при ретрансляции сигнала с ИСЗ серии MTSAT (*JMA, 2003*). Что соответствует принятым в мировой практике требованиям, которые были утверждены Всемирной метеорологической организацией: нормализованные изображения с метеоспутников конвертируются в форматы распространения HRIT/LRIT и ретранслируются через ИСЗ на сеть пользовательских приёмных пунктов. Формат HRIT предназначен для пользователей, предполагающих организацию самостоятельной тематической обработки, таких как Европейские метеорологические центры, региональные метеорологические центры и крупные исследовательские центры. В формате LRIT передаются изображения меньшей информационной ёмкости и отдельные спектральные каналы, и он предназначен для небольших метеорологических центров, учебных заведений, и т.п. MTSAT-1R/JAMI изображения в формате HRIT содержат полный диск (24 сеанса за сутки) или половину диска (северная часть - 24 сеанса и южная часть – 8 сеансов за сутки) Земли. Пространственное разрешение данных HRIT для ИК каналов составляет 4км, а для видимого – 1км в подспутниковой точке (надире). Высокие характеристики MTSAT-1R/HRIT изображений (1024 градаций яркости на пиксел для всех спектральных каналов) и частый режим передачи с ИСЗ (56 сеансов за сутки) позволяют использовать эти данные для различного рода задач мониторинга окружающей среды.

Проблемы получения точной географической привязки MTSAT-1R изображений

Также до 12 марта 2008 года JMA поддерживала ещё один режим передачи данных с MTSAT-1R - в формате HiRID (High Resolution Imager Data) для совместимости/унификации с режимом VISSR с предшествующего спутника GMS-5 (JMA, 1999). Характеристики MTSAT-1R/HiRID изображений полностью соответствуют формату HRIT за исключением пространственного разрешения данных, которое для всех спектральных диапазонов немного занижено и соответствует GMS-5/VISSR изображениям. Вплоть до вышеуказанной даты в Региональном Спутниковом Центре Мониторинга Окружающей Среды (РСЦМОС) ДВО РАН данные с MTSAT-1R принимались в формате HiRID. Для географической привязки MTSAT-1R/HiRID изображений в РСЦМОС ДВО РАН был использован алгоритм привязки, разработанный в JMA, для данных с геостационарных спутников серии GMS формата VISSR (Kigawa S., 1991). Этот алгоритм включает в себя определение положения ИСЗ на орбите и моделирует геометрию процесса сканирования радиометром подстилающей поверхности Земли. Для выполнения вычислений данным алгоритмом привязки каждое изображение в форматах VISSR и HiRID снабжается необходимой информацией, которая включается при ретрансляции сигнала с ИСЗ в каждый фрейм потока данных (JMA, 1999). При использовании данного алгоритма для географической привязки MTSAT-1R/HiRID изображений ошибка достигала до 20км, что было недопустимо для многих задач спутникового мониторинга, например, таких как: оценка временной изменчивости SST (Sea Surface Temperature), построение карт морских течений, расчёт AMVs (Atmospheric Motion Vectors), локализация пожаров и т.п. В связи с этим в РСЦМОС ДВО РАН был разработан автоматический метод коррекции географической привязки MTSAT-1R/HiRID изображений полного сеанса с пиксельной точностью, что достигается вычислением эффективных значений углов ориентации спутниковой платформы (крен, тангаж, рысканье) по рассчитанным реперным точкам (Ground Control Points, GCPs) на изображении (Катаманов, 2009).

После отказа JMA от передачи данных с MTSAT-1R в режиме HiRID в РСЦМОС ДВО РАН приём изображений с 2009 года (и по настоящее время) выполняется в формате HRIT. MTSAT-1R/HRIT изображения не являются данными в сыром виде, так как изображение каждого спектрального канала, сформированное радиометром, перед ретрансляцией сигнала с ИСЗ проходит специальную процедуру предобработки (Digital Signal Processing, DSP), проведение которой обеспечивается системой IDACS (Barton J. et al., 2004). Процедура DSP выполняет два этапа предобработки: радиометрическая и геометрическая коррекция данных (Barton J. et al., 2004). В первом случае, выполняется сглаживание аномалий радиоярких значений измерений в каждом спектральном диапазоне (могут использоваться различные типы фильтров) для улучшения результатов калибровки данных (пересчёт отсчётов радиометра к геофизическим величинам). Также на изображении за границами диска Земли вырезаются данные, соответствующие космосу. В другом случае, выполняется геометрическое преобразование изображения следующим способом: центрирование в кадре диска Земли (для устранения эффекта, вызванного углами roll и pitch) и его поворот (для устранения эффекта, вызванного углом yaw). В итоге после исполнения процедуры DSP данные в формате HRIT представлены в виде нормализованной геостационарной проекции (Normalized Geostationary Projection, GEOS) (JMA, 2003). Проекция типа GEOS описывает вид идеализированной Земли (эллипсоид вращения) из виртуального спутника, который находится на идеальной геостационарной орбите с постоянной высотой, и расположенной всегда в плоскости экватора на номинальной долготе (в случае MTSAT-1R равной 140° в.д.). Таким образом, процедура DSP при построении проекции типа GEOS устраняет искажения на изображении, вызванные отклонениями реальных условий съёмки от идеальных. Но для

выполнения такой операции необходимо минимизировать ошибки географической привязки, связанные с неточным определением позиции ИСЗ на орбите и положения спутниковой платформы во время формирования радиометром изображения. Так как иначе возможно наблюдение артефактов на проекции изображения. Для этого в системе IDACS (предварительно перед исполнением процедуры DSP) по рассчитанным реперным точкам вычисляются скорректированные значения углов ориентации спутниковой платформы с радиометром в пространстве (Milnes, 2006). В результате чего, DSP на основании текущих данных о позиции ИСЗ на орбите (в течение процесса сканирования радиометром) и вычисленных (по GCPs) углов ориентации спутниковой платформы выполняет построение GEOS-проекции изображений всех спектральных каналов с использованием специальной процедуры (Coyne et al., 2006).

В итоге процедура географической привязки изображений в формате HRIT является более упрощённой и менее трудоёмкой при проведении вычислительных операций, что значительно уменьшает затраты/время в условиях оперативной обработки спутниковых данных (что очень актуально для многих пользователей). Данная процедура определяется стандартным алгоритмом решения прямой и обратной задачи привязки изображений в формате GEOS-проекции, полное описание которого приведено в европейской спецификации (Wolf R., Just D., 1999). В качестве входных данных для применения стандартной процедуры привязки используются значения следующих параметров: долгота ИСЗ на орбите, координаты в изображении надира и угловое разрешение пиксела вдоль строки и столбца проекции. Долгота определяется местоположением спутника на геостационарной орбите и всегда постоянна. Угловое разрешение пиксела для каждого спектрального канала является постоянным. Координаты надира для каждого спектрального канала определяются одним из трёх постоянных наборов значений, что обусловлено содержанием на изображении: полного диска, северной или южной частей диска Земли. Значения вышеуказанных параметров для MTSAT-1R/HRIT изображений приведены в соответствующей документации (JMA, 2003) и также представлены в каждом заголовке файла данных. При этом каждый заголовок файла данных может содержать набор скорректированных значений координат надира, где каждая пара значений координат соответствует обозначенному сегменту изображения (количество таких сегментов может быть разным для каждого сеанса). Предоставление данных корректирующих параметров привязки, по-видимому, является результатом минимизации остаточных ошибок привязки вследствие конвертирования изображения в GEOS-проекцию.

При использовании стандартного алгоритма для географической привязки MTSAT-1R/HRIT изображений выяснилось, что ошибка привязки может достигать до 10км (с учётом предоставляемого набора скорректированных значений координат надира в заголовке файла данных). Поэтому для получения пиксельной точности привязки MTSAT-1R/HRIT изображений необходимо проведение специальной процедуры коррекции на основе информации о рассчитанных реперных точках. Проведённый анализ зависимостей параметров рассчитанных конфигураций GCPs показал, что для достижения пиксельной точности привязки «полного» MTSAT-1R/HRIT изображения (сформированного в течение всего сеанса сканирования – полный диск или половина диска Земли) можно задать такой оптимальный набор параметров коррекции привязки. В итоге, это обеспечит проведение процедуры коррекции всего один раз и позволит привязывать с требуемой точностью участки изображения, для которых невозможно рассчитать реперные точки (сплошная облачность, открытые морские акватории и т.п.). Ниже представлен разработанный автоматический метод географической привязки MTSAT-1R/HRIT изображений, позволяющий получать пиксельную точность «полного» сеанса, что достигается вычислением поправок в виде линейных регрессий по невязкам рассчитанных GCPs. Приводятся результаты апробации метода для серии изображений в РСЦМОС ДВО РАН.

Автоматический метод коррекции географической привязки MTSAT-1R/HRIT изображений по реперным точкам

Представленный метод выполняет коррекцию географической привязки на основе поправок, вычисляемых минимизацией рассогласований между видимыми и истинными (рассчитываются автоматически) положениями GCPs на изображении. Для расчёта истинных координат реперных точек используется база участков эталонной маски суша/вода (лэнд-маркеры), созданной на основе цифровой географической контурной базы GSHHS (*Wessel, Smith, 1996*). Геодезические координаты географических объектов базы GSHHS заданы в системе WGS84, что полностью соответствует используемой модели эллипсоида Земли при построении GEOS-проекций (*Wolf, Just, 1999; Coyne et al., 2006*). Отбор реперных участков исходного изображения, пригодных для задания GCPs, выполняется после проведения процедуры фильтрации облачности. Более подробное описание процедуры задания и отбора лэндмаркеров на изображении приведено в предыдущих работах (*Катаманов С.Н., 2009; Katamanov S.N., 2010*). Процедура вычисления параметров оптимального положения реперной точки основывается на методе, который ранее был разработан и апробирован для автоматической привязки NOAA/AVHRR, FengYun-1/MVISR, MTSAT-1R/HiRID и FengYun-2/MVISSR изображений (*Александрин, Катаманов, 2006; Катаманов, 2009; Katamanov, 2010*). Одним из главных достоинств этого метода является то, что его можно применять без какой-либо предварительной настройки для различного рода изображений (различные спектральные диапазоны, время суток, климатические условия и т.п.). В результате чего он показывает хорошие результаты применения даже при отказе от проведения процедуры фильтрации облачности (*Александрин, Катаманов, 2006; Катаманов, 2011*). Полное описание метода расчёта реперных точек на изображении можно найти в вышеуказанных работах.

Коррекция привязки MTSAT-1R/HRIT данных выполняется с помощью поправок к координатам каждого пиксела в изображении (X - столбец, Y - строка). Вычисление значений этих поправок выполняется для каждой строки изображения:

$$\begin{cases} \Delta X = \chi_1 Y + \chi_0 \\ \Delta Y = \gamma_1 Y + \gamma_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где χ_i и γ_i ($i = \overline{0,1}$) – значения коэффициентов (нулевого и первого порядков) линейных регрессий. Вычисление оценок коэффициентов χ_i и γ_i ($i = \overline{0,1}$) выполняется по рассчитанным значениям невязок в GCPs (рассогласование между видимыми и истинными координатами на изображении) методом наименьших квадратов. Отбор «хороших» реперных точек для расчёта параметров соотношения (1) выполняется по заданному пороговому значению для критерия статистической значимости. И остаточная отбраковка «плохих» точек выполняется с помощью критерию " 2σ ", при этом параметры коррекции привязки пересчитываются (*Катаманов С.Н., 2009; Katamanov S.N., 2010*). Вычисление параметров коррекции привязки соотношения (1) выполняется отдельно для изображений видимого и ИК каналов (что связано, в первую очередь, с различным пространственным разрешением). Для ИК-каналов рассчитывается один набор параметров коррекции, так как в результате проведённой проверки выяснилась полная геометрическая согласованность всех ИК-изображений. В результате чего реперные точки одновременно рассчитываются по всем ИК-каналам (кроме канала водяного пара).

Проведённый визуальный анализ выборочной серии (более 100 шт.) MTSAT-1R/HRIT изображений видимого и ИК каналов после исполнения процедуры коррекции географической привязки по GCPs показал что, ошибка смещения видимого берегового контура на изображении относительно эталонного не более одного пиксела (рис. 1). На рис. 1 показаны реперные точки с векторами рассчитанных невязок (помечены жёлтым и красным

тоном) и вынесены 10 фрагментов изображения в увеличенном масштабе (4:1), где эталонный береговой контур помечен красным тоном (привязка с учётом корректирующих параметров из заголовка файла данных) и зелёным тоном (привязка с коррекцией по GCPs). Также среднеквадратичные величины (RMS), вычисленные по остаточным невязкам в GCPs в результате проведения коррекции привязки согласно (1), не превышают одного пиксела. Таким образом, результаты визуального и статистического анализов остаточных ошибок привязки после исполнения процедуры коррекции подтверждают, что данный метод позволяет достигать пиксельной точности привязки «полных» MTSAT-1R/HRIT изображений.

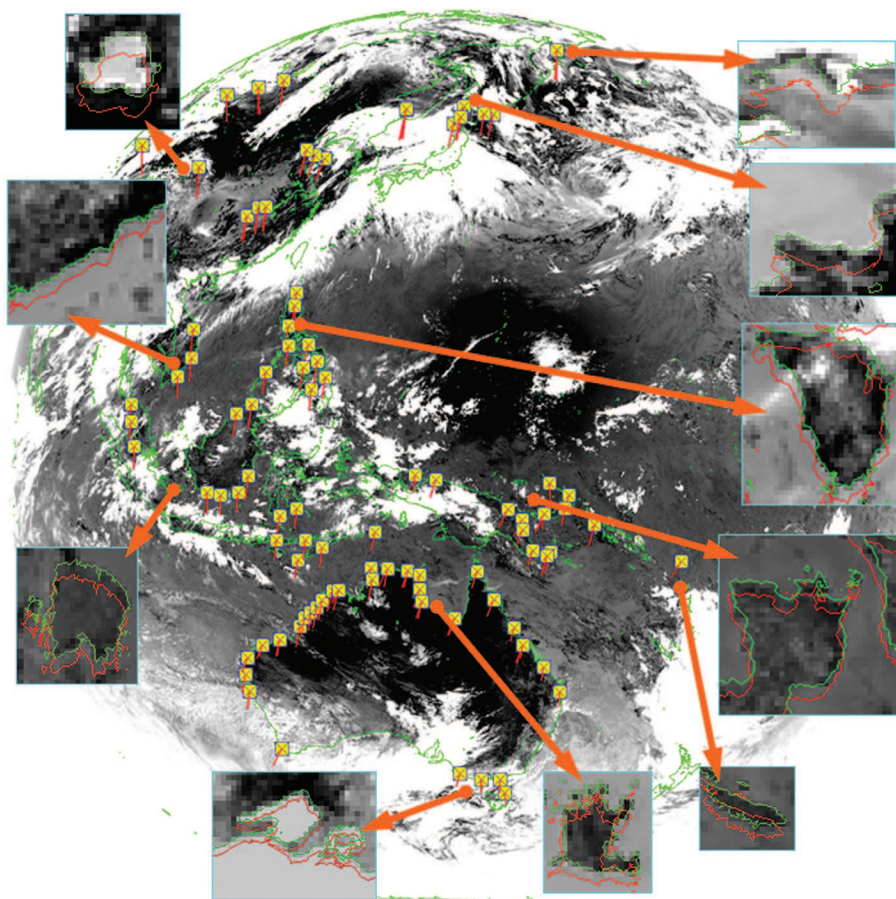


Рис. 1. MTSAT-1R/HRIT изображение ближнего инфракрасного канала (1:30 UTC 23.05.2010г.) после проведения процедуры коррекции привязки по реперным точкам

Результаты апробации разработанного метода

Разработанный метод прошёл апробацию на серии MTSAT-1R/HRIT изображений, сформированных с 1 мая по 15 июня 2010 года (2500 сеансов). Для видимого канала расчёт реперных точек выполнялся при условии, если в надире Солнце находилось выше горизонта (1200 сеансов). На рис. 2 приведены гистограммы распределения максимальных значений и величин RMS рассогласований (в пикселах) между двумя способами привязки, которые были рассчитаны в GCPs для изображений видимого канала. Первый способ привязки - применение значений корректирующих параметров из заголовка файла данных, предоставляемых JMA; второй способ – с проведением коррекции привязки согласно соотношению (1) на основе рассчитанных GCPs. Результаты коррекции привязки MTSAT-1R/HRIT изображений

с пиксельной точностью составляют 87% для видимого канала и 94% для ИК-каналов от общего числа (с учётом сеансов, содержащих половину диска Земли).

Решение о правильности привязки (с пиксельной точностью) «полного» изображения видимого или ИК спектра принималось при совместном удовлетворении следующих условий: количество реперных точек не менее 15, величина RMS для остаточных невязок в GCPs не более одного пиксела, «база по столбцу» не менее 0.3 и «база по строке» не менее 0.5. Параметр «база по столбцу» («база по строке») - это безразмерная величина, определяющая отношение максимальной разницы координат по столбцу (строке) конфигурации реперных точек к количеству пикселей в столбце (строке) изображения. То есть эти параметры определяют пространственные характеристики размещения конфигурации GCPs на изображении и максимальные значения для них достигаются только при использовании всех лэндмаркеров (равны 0.8 и 0.9 соответственно).

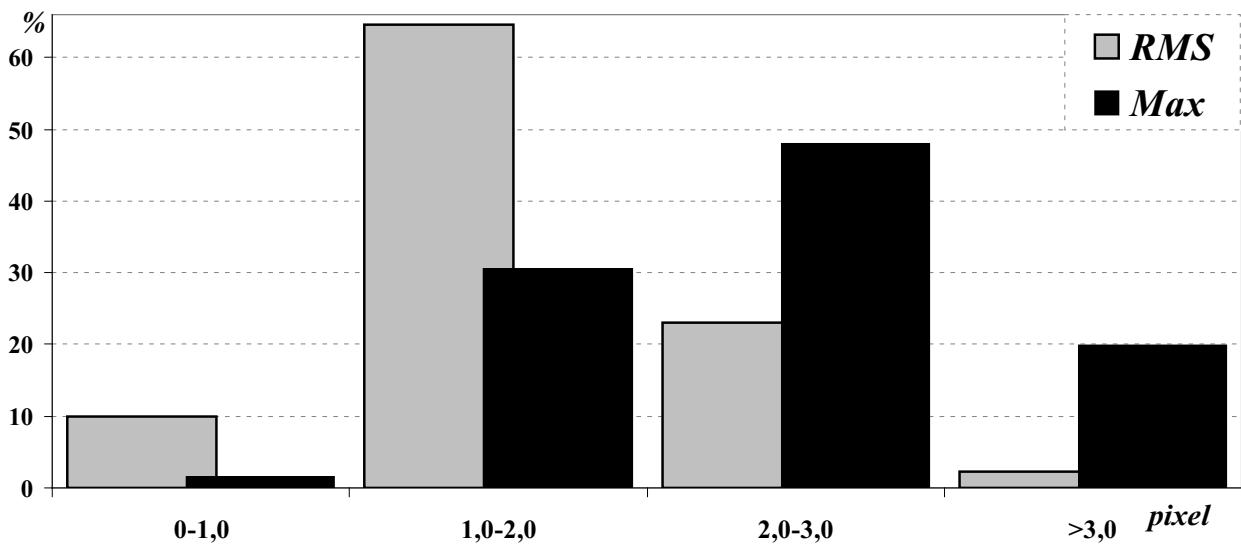


Рис. 2. Гистограммы распределения максимальных значений и величин RMS рассогласований между двумя способами привязки

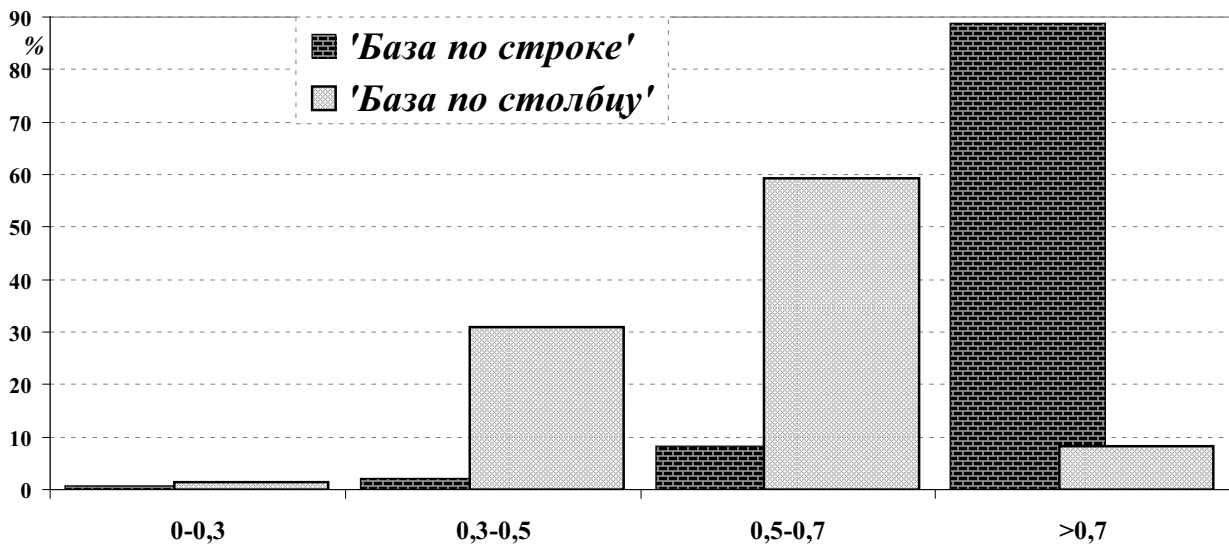


Рис. 3. Гистограммы распределения значений параметров «база по столбцу» и «база по строке» конфигураций GCPs, рассчитанных для серии ИК-изображений

На рис. 3 приведены гистограммы распределения значений параметров «база по столбцу» и «база по строке» конфигураций реперных точек, рассчитанных для серии ИК-изображений (в процентах от общего числа). На рис. 4 приведена гистограмма распределения количества рассчитанных GCPs на ИК-изображениях (в процентах от общего числа), которые использовались для вычисления параметров коррекции привязки. Гистограммы распределения значений вышеуказанных параметров для изображений видимого спектра незначительно отличаются от предыдущих, что обусловлено одной особенностью: некоторая часть сеансов имеет затенение диска Земли на изображении. Высокие показатели распределений последних гистограмм (смотрите рис. 3 и 4) свидетельствуют о том, что предложенный подход к коррекции привязки MTSAT-1R/HRIT данных позволяет получать необходимую точность привязки по всему изображению.

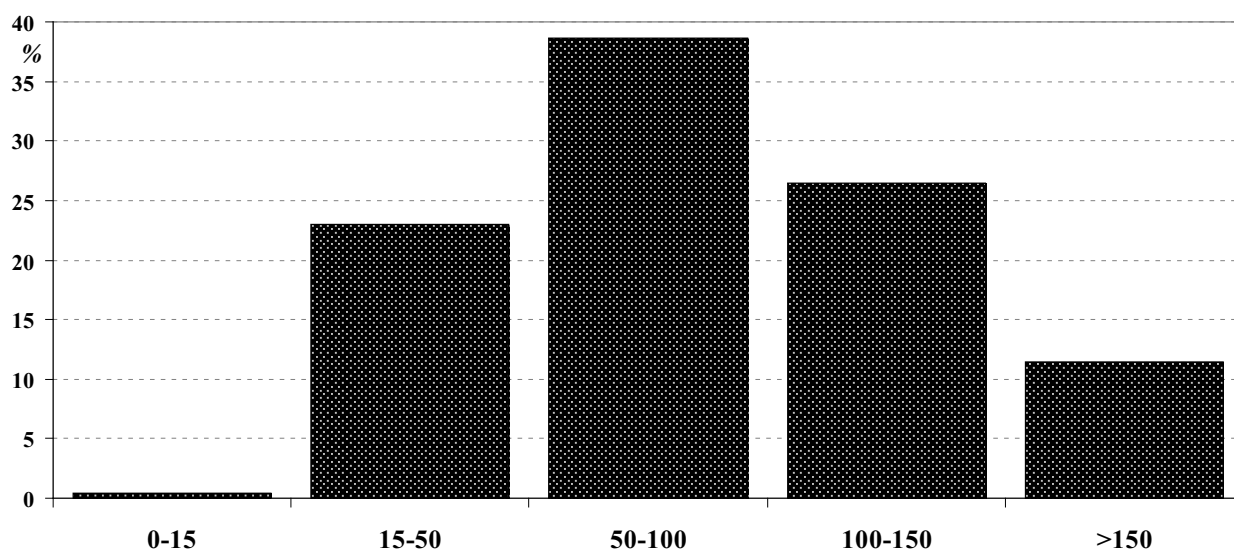


Рис. 4. Гистограмма распределения количества рассчитанных реперных точек на ИК-изображениях

Заключение

С 22 декабря 2010 года JMA для спутника MTSAT-2 (запущенного в феврале 2006 года на орбиту 145° в.д.) утвердила статус «operational», а для MTSAT-1R соответственно статус «standby». Начиная с этой даты, JMA с обоих ИСЗ (MTSAT-1R и MTSAT-2) для пользователей передаёт данные, полученные в основном с MTSAT-2 (<http://mscweb.kishou.go.jp/operation/status/mtsatsat.htm>). Также с этого времени JMA больше не включает в заголовок данных HRIT информацию о корректирующих параметрах привязки. Результаты применения стандартного алгоритма для географической привязки MTSAT-2/HRIT изображений показали, что ошибка привязки может достигать до 15км. В связи с чем, на данном этапе проводится апробация предложенного метода коррекции привязки для MTSAT-2/HRIT изображений.

Таким образом, применение разработанного метода привязки с коррекцией по GCPs в оперативной обработке данных от геостационарных ИСЗ серии MTSAT (в формате HRIT), позволит на более качественном уровне решать многие задачи спутникового мониторинга (такие как, оценка временной изменчивости SST, построение карт морских течений, расчёт AMVs, локализация пожаров и т.п.). Также разработанный метод может быть применён для обработки данных других геостационарных спутников, формирующих изображения в видимом и ИК спектральных диапазонах. В частности для российского ИСЗ «Электро-Л», данные с которого передаются в форматах LRIT/HRIT (http://planet.iitp.ru/spacecraft/electro_2_rus.htm).

Работа поддержана грантом ДВО РАН (1-III-B-03-032) и частично грантами РФФИ (11-01-12107-офи-м, 11-01-98510-р_восток_а, 11-01-00590-а, 11-01-00593-а). Работа выполнена на оборудовании, уникальных стендах и установках Центра коллективного пользования «Региональный спутниковый мониторинг окружающей среды ДВО РАН» при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации

Литература

1. *Алексанин А.И., Катаманов С.Н.* Автоматическая привязка спутниковых изображений AVHRR/NOAA при сложных условиях наблюдения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Вып.3. Т.1. С.41–48.
2. *Катаманов С.Н.* Автоматический метод коррекции географической привязки MTSAT-1R/VISSR изображений с пиксельной точностью // Исследование Земли из космоса. 2009. №3. С.55-66.
3. *Катаманов С.Н.* Автоматический метод коррекции географической привязки изображений с геостационарных метеоспутников серии FengYun-2 с пиксельной точностью // Исследование Земли из космоса. 2011. №2. С.66–80.
4. *Barton J., Bass J., Milnes M.* MTSAT Image Data Acquisition and Control System (IDACS) // Proc. of the 13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography. September 2004. 10p.
5. *Coyne N., Schaffner E., Hanson C., Gartner V., Flewin J., Williams M.* MSG Ground Segment LRIT/HRIT Mission, Specific Implementation // EUMETSAT. Darmstadt, Germany. 21 June 2006. Issue 6. Doc.No: EUM/MSG/SPE/057. 85p. URL: http://www.eumetsat.int/groups/ops/documents/document/pdf_ten_05057_spe_msg_lrit_hri.pdf
6. *JMA.* MTSAT HiRID Technical Information // Tokyo, Japan. 1 June 1999. Issue 3. URL: http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/mtsatsat1r/4.1MTSAT_HiRID_Technical_Information.pdf
7. *JMA.* JMA HRIT Mission Specific Implementation // Tokyo, Japan. 1 January 2003. Issue 1.2. URL: http://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/satellite/mtsatsat1r/4.2HRIT_1.pdf
8. *Katamanov S.N.* Automatic navigation of one pixel accuracy for meteorological satellite imagery // Proc. of 1-st Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications. Vladivostok. Russia. 6–9 September 2010. 5p. URL: http://ftp.dvo.ru/pub/RPC_2010/rpc2010_docs/papers/11-ru-Katamanov.pdf
9. *Kigawa S.* A Mapping Method for VISSR Date // Technical Note. Meteorological Satellite Center. JMA. Japan. 1991. No.23. P.15–34.
10. *Milnes M.* Orbit/Attitude Determination for MTSAT through automated landmark and Earth edge detection // Proc. of 25th International Symposium on Space Technology and Science and 19th International Symposium on Space Flight Dynamics. Kanazawa. Japan. 2006.
11. *Puschell J.J., Lowe H.A., Jeter J., Kus S., Osgood R., Hurt W.T., Gilman D., Rogers D., Hoelter R., Kamel A.A.* Japanese Advanced Meteorological Imager (JAMI): design, characterization and expected on-orbit performance // Proc. of International TOVS Study Conference. Sainte Adele. Canada. 2003. URL: http://cimss.ssec.wisc.edu/itwg/itsc/itsc13/proceedings/posters/a28_puschell.pdf
12. *Wessel P., Smith W.H.F.* A Global, Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline (GSHHS) database // Journal of Geophysical Research. 1996. Vol.101. No.B4. P.8741-8743. URL: http://www.soest.hawaii.edu/pwessel/papers/1996/JGR_96/jgr_96.html
13. *Wolf R., Just D.* LRIT/HRIT Global Specification // Coordination Group for Meteorological Satellites. EUMETSAT. Darmstadt, Germany. 12 August 1999. Issue 2.6. Doc.No.: CGMS 03. 53p. URL: http://www.eumetsat.int/groups/cps/documents/document/pdf_cgms_03.pdf

Accurate HRIT Image Navigation for Geostationary Satellite MTSAT-1R

S.N. Katamanov

*Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS
690041 Vladivostok, 5 Radio str.
E-mail: sergey@satellite.dvo.ru*

The image navigation error from the Japanese geostationary satellite MTSAT-1R in HRIT format, using the standard procedure can reach up to 10km, which is unacceptable for many applications of satellite monitoring. A navigation method of one pixel accuracy for MTSAT-1R/HRIT images received during full session is presented. The method is based on the computation of navigation correction parameters by the ground control points are automatically defined in an image. The approbation results of the new navigation method for a satellite image set in Center for regional satellite monitoring of environment of FEB RAS is presented.

Keywords: MTSAT-1R, HRIT format, GEOS-projection, navigation of satellite imagery, ground control points, correction navigation with pixel accuracy.