

## Разработка автоматического метода географической привязки изображений MVISR полярно-орбитального спутника FengYun-1D

С.Н. Катаманов

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

Представлены результаты исследований, проведенных при разработке автоматического метода географической привязки «полных» (сформированных в течение всего сеанса приема) изображений, полученных радиометром MVISR с китайского спутника FY-1D. Метод основан на орбитальной модели движения SGP4 (с прогнозными телеграммами NORAD TLE) в сочетании с математической моделью формирования изображения, которая достаточно точно учитывает все геометрические аспекты работы сканера. Пиксельная точность привязки каждого изображения достигается вычислением оптимальных значений углов ориентации спутниковой платформы с радиометром в пространстве (крен, тангаж и рысканье) по автоматически рассчитанным реперным точкам. Вычислены оценки углов пространственного рассогласования между оптическими осями датчиков отдельных каналов радиометра MVISR и базовыми каналами. Выявлены закономерности поведения вычисленных углов ориентации спутниковой платформы с радиометром MVISR в пространстве. Приведены результаты апробации разработанного метода привязки на годичной серии данных MVISR в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды (РСЦМОС) ДВО РАН.

**Ключевые слова:** FY-1D, MVISR, спутниковые изображения, географическая и межканальная привязка, реперные точки, ориентация спутниковой платформы, прогнозирование параметров привязки.

### Введение

Радиометр MVISR (Multispectral Visible and Infra-Red Scanning Radiometer), установленный на первой серии китайских полярно-орбитальных спутниках FY-1 (FengYun-1), обеспечивал изображения в десяти спектральных каналах с пространственным разрешением 1,1 км в надире. Характеристики каналов MVISR позволяли использовать получаемые данные в первую очередь для определения SST (Sea Surface Temperature), детектирования льда и оценки некоторых биооптических характеристик океана (например, концентрации хлорофилла-а). При решении некоторых океанографических задач необходимо одновременное использование численных оценок биооптических характеристик океана и данных SST. Одной из важных задач такого рода является мониторинг вредоносного цветения водорослей в прибрежных акваториях. При проведении такого мониторинга необходимо обеспечить регулярное получение соответствующих спутниковых измерений. Одними из широко используемых источников таких спутниковых измерений являются данные SeaWiFS и MODIS. Но при организации получения этих данных непосредственно с ИСЗ есть свои трудности, связанные с платным доступом (SeaWiFS) и необходимостью приобретения дорогостоящей приемной станции (MODIS). Спутники серии FY-1 функционировали в режиме прямой передачи данных на частоте 1,7 ГГц, что позволяло для получения изображений MVISR использовать относительно недорогие станции приема данных с ИСЗ серии POES NOAA (Алексанин и др., 2006). Однако открытый доступ к данным MVISR и бесперебойная работа двух спутников серии FY-1 (FY-1C и FY-1D) в штатном оперативном режиме в течение более десяти лет не привели к широкому использованию этих данных в практике дистанционного зондирования, что

было связано, в первую очередь, с трудностью организации первичной обработки данных: отсутствием корректных процедур калибровки (пересчет отсчетов радиометра к геофизическим величинам) и невозможностью получения точной географической привязки изображений стандартными методами. Последнее ограничение затрудняло применение регрессионных методик на основе *in situ* и спутниковых измерений для создания соответствующих технологий получения данных SST и биооптических характеристик океана.

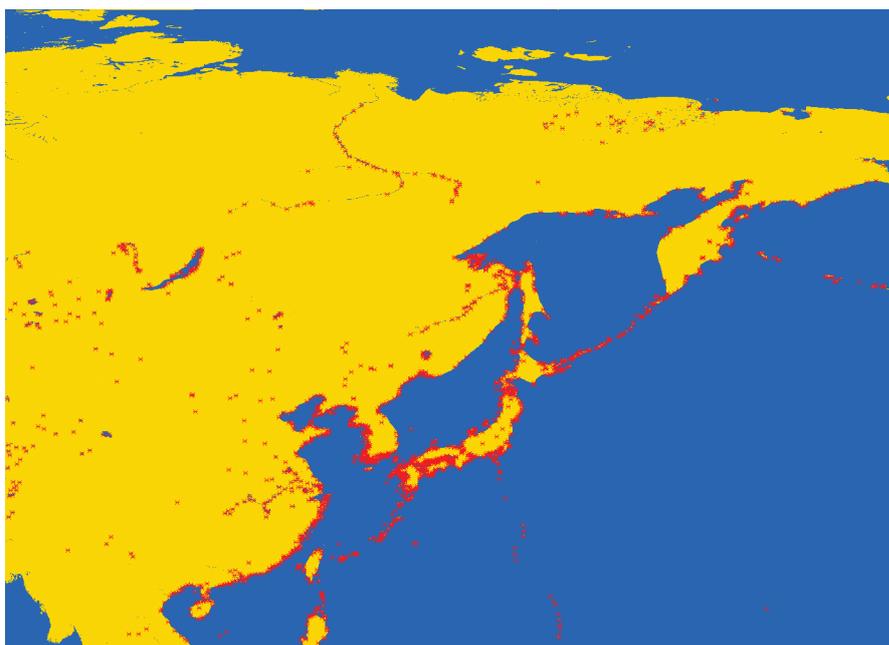
Данная работа посвящена исследованию возможности получения точной географической привязки изображений MVISR, полученных со спутника FY-1D. В рамках исследования предложены подходы для решения двух серьезных проблем, связанных с обработкой данных MVISR. Первая проблема заключается в рассогласовании оптических осей датчиков отдельных каналов. Данное рассогласование приводит к тому, что суммарные изображения одного сеанса выглядят по-разному для различных каналов (т.е. они не могут быть совмещены простым наложением изображения одного канала на изображение другого канала). Для некоторых пар каналов рассогласования достигают величины в 5 пикселей. В результате этого при коррекции привязки изображений по реперным точкам (Ground Control Points, GCPs) необходимо для каждого канала рассчитывать свой набор GCPs. Но расчет реперных точек на изображениях отдельных каналов радиометра MVISR имеет сравнительно низкие результаты исполнения, что обусловлено низкой контрастностью границ географических объектов в соответствующих спектральных диапазонах. Вторая проблема связана с нестабильным поведением спутниковой платформы с радиометром MVISR в пространстве, что приводит к изменению углов ориентации платформы в течение полного сеанса приема (длительностью 10–15 минут). В результате этого не всегда возможно привязать изображение с пиксельной точностью при использовании постоянных значений углов положения спутниковой платформы. А это, в свою очередь, затрудняет привязку с требуемой точностью участков изображения, для которых невозможно задание реперных точек (сплошная облачность, открытые морские акватории и т.п.).

### Используемые методы и данные

При разработке метода географической привязки данных MVISR был использован один из основных подходов, суть которого состоит в моделировании всех основных аспектов формирования изображения радиометром: движения ИСЗ по орбите, процесса сканирования радиометром подстилающей поверхности Земли и ориентации спутниковой платформы с радиометром в пространстве в течение сеанса приема. Для предсказания положения ИСЗ на орбите была применена широко известная модель орбитального движения SGP4 (Simplified General Perturbation #4) (Vallado et al., 2006) в сочетании с прогнозными телеграммами NORAD TLE (North American Aerospace Defense Command Two-Line Element), которые могут быть получены с общедоступного интернет-ресурса (Kelso, 1996). Используемая модель Земли в методе привязки полностью соответствует геоиду WGS84 (World Geodetic System 1984). Сканирующая система радиометра MVISR относится к типу *cross-track* и практически полностью по всем основным параметрам соответствует радиометру AVHRR (устанавливаемому на спутниках серий POES NOAA и MetOp). Полный угол

раствора сканера MVISR составляет  $108^\circ$ . В разработанном методе для решения прямой и обратной задач географической привязки изображений использовались алгоритмы, приведенные в работе (Эпштейн, Гербек, 2001).

Для достижения пиксельной точности привязки изображений MVISR используется процедура коррекции, которая вычисляет оптимальные значения углов ориентации спутниковой платформы с радиометром в пространстве (крен, тангаж и рысканье). Вычисление углов положения платформы основано на минимизации рассогласований между видимыми (модельными) и истинными (рассчитанными) положениями реперных точек на изображении с помощью метода наименьших квадратов (МНК). При использовании подхода, предложенного в работе (Rosborough et al., 1994), решение последней задачи приведено к системе линейных уравнений. Для расчёта истинных положений GCPs на изображениях MVISR использовался метод (Katamanov, 2010; Катаманов, 2011, 2012), который был разработан и апробирован при автоматической привязке данных AVHRR (с ИСЗ серии POES NOAA), MCVISSR (с ИСЗ серии FengYun-2), HiRID и HRIT (с ИСЗ серии MTSAT). Одним из главных достоинств данного 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.). Апробация метода показала высокие результаты исполнения при невозможности проведения калибровки данных и при отказе проведения предварительной процедуры фильтрации облачности (Katamanov, 2010; Катаманов, 2011). Последний аспект очень важен, так как для данных MVISR не существует корректных процедур калибровки, вследствие чего невозможно проводить фильтрацию облачности. Для расчета истинных координат GCPs была использована база участков эталонной маски суша / вода (лэндмаркеры), которая была создана на основе географической контурной базы GSHHS (Wessel, Smith, 1996). На *рис. 1* представлена эталонная маска суша / вода с обозначенными лэндмаркерами (красным тоном) в количестве 2160 шт.



*Рис. 1. Эталонная маска суша / вода и база лэндмаркеров*

## Пространственное рассогласование изображений различных каналов

Проблема пространственного рассогласования изображений отдельных каналов радиометра MVISR была решена следующим образом. Были выбраны два базовых канала (один инфракрасного (4), другой видимого (2) спектральных диапазонов), относительно которых для остальных каналов были вычислены три угла поворота: крен, тангаж и рысканье. Для вычисления углов поворота использовался метод реперных точек. Сначала были рассчитаны реперные точки по изображениям каждого канала относительно эталонной цифровой карты. Далее невязки в наборах GCPs для каждого изображения были пересчитаны относительно базовых каналов следующим образом:

$$\begin{cases} \widetilde{dx}_i^k = dx_i^k - dx_i^b \\ \widetilde{dy}_i^k = dy_i^k - dy_i^b \end{cases} \quad (1)$$

где  $\widetilde{dx}_i^k, \widetilde{dy}_i^k$  – относительные невязки  $i$ -GCP (рассчитанной для  $k$ -канала) вдоль строки и столбца изображения соответственно;  $dx_i^k, dy_i^k$  – абсолютные невязки  $i$ -GCP (рассчитанной для  $k$ -канала) вдоль строки и столбца изображения соответственно;  $dx_i^b, dy_i^b$  – абсолютные невязки  $i$ -GCP (рассчитанной для базового канала) вдоль строки и столбца изображения соответственно.

С помощью МНК (см. выше) по относительным невязкам в реперных точках (1) были вычислены оценки трех углов поворота для каждого изображения. Для данных расчетов была использована серия изображений MVISR, сформированных с января по декабрь 2006 г. (1812 сеансов). Вычисленные наборы углов были отобраны согласно условиям, которым удовлетворяла искомая конфигурация реперных точек на каждом изображении: количество точек не меньше 15 шт., величина «база по строке» не меньше 0,5 и значения RMS (Root Mean Square) и максимума модуля остаточных невязок в GCPs не более одного пиксела. Параметры «база по строке» («база по столбцу») – это отношение максимальной разницы координат реперных точек вдоль строки (столбца) на изображении к количеству пикселей в строке (столбце), т.е. они определяют пространственные характеристики размещения конфигурации GCPs на изображении. На *рис. 2* приведены графики вычисленных значений (в миллирадианах) углов рассогласования между оптическими осями 2-го (видимого, VIS) канала и 4-го (инфракрасного, IR) канала в зависимости от даты формирования изображений.

Проведенный анализ временных рядов, состоящих из рассчитанных величин углов рассогласования для каждого сеанса (*рис. 2*), показал, что для всех каналов каких-либо существенных тенденций к изменению в течение года не наблюдалось. Также из результатов анализа следует, что все инфракрасные каналы (3, 4, 5) между собой согласованы по углу тангажа. Последнее утверждение верно и для всех каналов видимого спектрального диапазона (1, 2, 7, 8, 9, 10), кроме 6-го канала. Первый и второй каналы согласованы между собой по всем трём углам. Величины угла крена между 2-м (VIS) и 4-м (IR) каналами имеют значительный разброс, который составляет более 2 миллирадиан (*рис. 2*). Аналогичная ситуация характерна и для других VIS-каналов (1, 6, 8, 9, 10). При этом разброс значений угла крен между 4-м (IR) и 7-м (VIS) каналами лежит в пределах 1 миллирадиана.

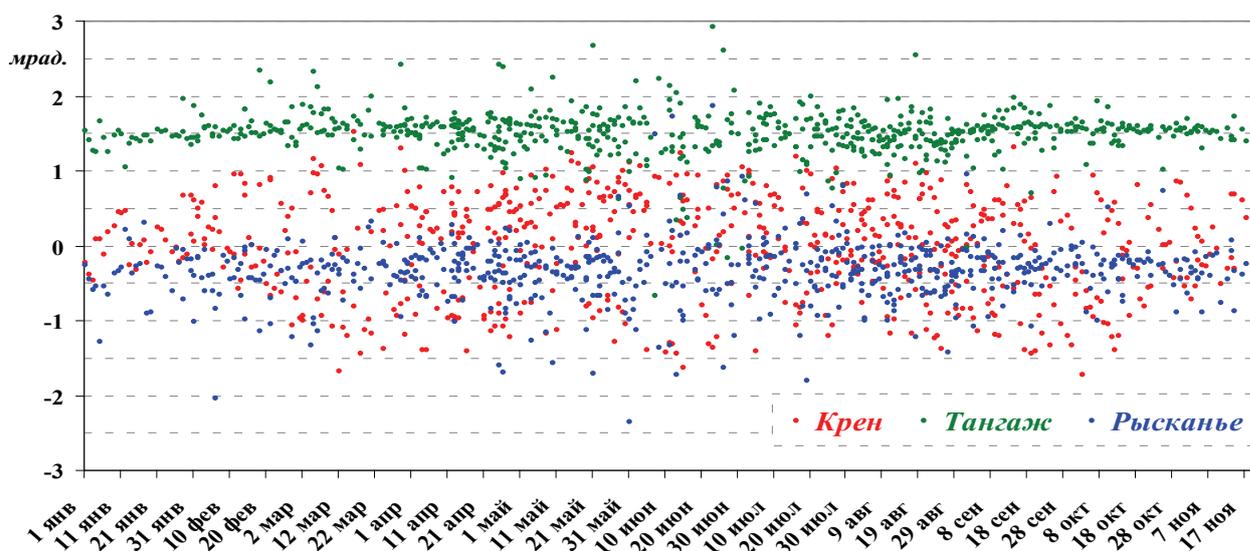


Рис. 2. Углы рассогласования между 2-м (VIS) и 4-м (IR) каналами

В табл. 1 приведены вычисленные оценки средних значений (в миллирадианах) углов рассогласования для отдельных каналов радиометра MVISR относительно базовых каналов. На рис. 3 приведен пример привязанного изображения 10-го канала радиометра MVISR, для которого оптимальные значения углов положения спутниковой платформы были вычислены по реперным точкам, рассчитанным для 2-го канала (для пересчета углов для 10-го канала использовались данные из табл. 1). На рис. 3 также вынесены 10 фрагментов изображения в увеличенном масштабе (4 : 1), где эталонный береговой контур помечен красным тоном (без коррекции) и зеленым тоном (привязка с учетом вычисленных углов). Величина RMS модуля остаточных невязок в GCPs, рассчитанных по 10-му каналу, после проведения коррекции привязки (с учетом вычисленных углов по 2-му каналу) составила 0,65 пиксела.

Таблица 1. Углы пространственного рассогласования между каналами радиометра MVISR

№ канала (спектральный диапазон, мкм)	Углы относительно 2-го канала			Углы относительно 4-го канала		
	Крен, мрад.	Тангаж, мрад.	Рысканье, мрад.	Крен, мрад.	Тангаж, мрад.	Рысканье, мрад.
1 (0,58–0,68)	0,021513	–0,002104	–0,013702	0,053178	1,465144	–0,353402
2 (0,84–0,89)	–	–	–	–0,011787	1,507163	–0,33701
3 (3,55–3,95)	–1,956223	–1,537782	1,831582	–1,762504	0,002039	1,456509
4 (10,3–11,3)	0,003746	–1,49794	0,323296	–	–	–
5 (11,5–12,5)	1,291989	–1,525786	–1,058699	1,032717	–0,023441	–1,305741
6 (1,58–1,64)	0,338048	0,426202	0,069159	0,182741	1,987307	–0,157857
7 (0,43–0,48)	3,776401	0,016138	–3,678614	4,264276	1,509052	–3,884611
8 (0,48–0,53)	–0,880743	–0,037076	1,781685	–1,028981	1,469099	1,479468
9 (0,53–0,58)	2,281491	–0,024391	–1,788133	2,509449	1,42857	–1,992494
10 (0,90–0,985)	2,465194	0,014805	–1,988364	2,611977	1,491272	–2,182375

## Результаты географической привязки изображений

Проведенный анализ результатов привязки изображений MVISR показал, что изменение положения спутниковой платформы в пространстве в течение сеанса приема в некоторых случаях может вообще не происходить (если такое явление наблюдается, то обычно

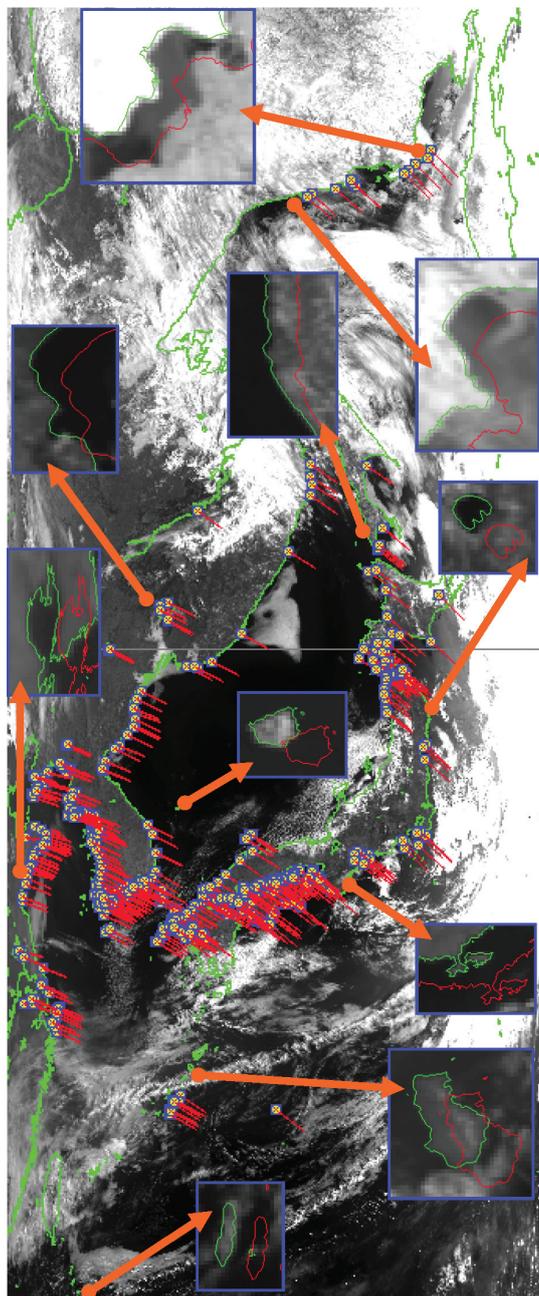
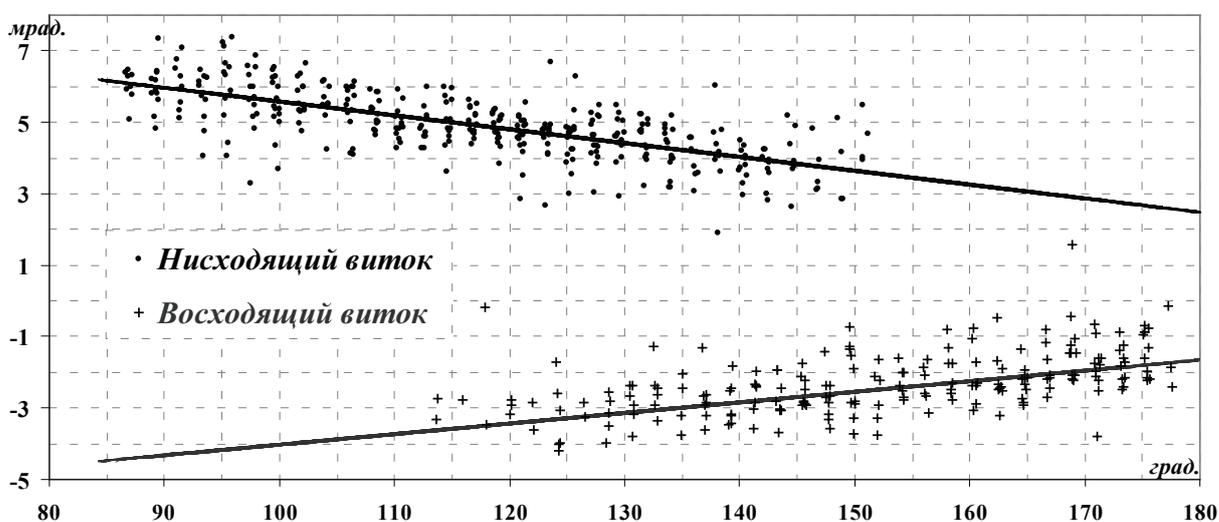


Рис. 3. Изображение MVISR  
(№ витка орбиты 20406,  
02.05.2006, 22:24:14 UTC)

1–2 раза). Поэтому вначале была оценена возможность точной привязки данных MVISR с использованием постоянных углов положения спутниковой платформы для всего сеанса. На рис. 3 приведен пример изображения (длительность сеанса составила 14 минут) после проведения коррекции привязки (с вычислением постоянных значений углов по GCPs). На рис. 3 также обозначены автоматически рассчитанные реперные точки (символом «») с векторами рассчитанных невязок (отмечены красным тоном) в увеличенном масштабе (2:1). Визуальный анализ рис. 3 показывает, что для всего сеанса рассогласование видимого и эталонного береговых контуров лежит в пределах одного пиксела. Далее для длительной серии данных MVISR были рассчитаны GCPs, а по ним были вычислены постоянные углы положения платформы (т.е. для всех изображений принималась гипотеза о постоянстве углов в течение всего сеанса приема). Вычисленные наборы углов были отобраны согласно условиям, которым удовлетворяла искомая конфигурация GCPs: количество точек не меньше 20 шт., величина «база по строке» не меньше 0,6, величина «база по столбцу» не меньше 0,3 и значения RMS и максимума модуля остаточных невязок в GCPs не более одного и двух пикселов, соответственно. После этого был проведен анализ характера поведения вычисленных значений углов, который позволил выявить следующие закономерности.

Во-первых, для всех трех углов наблюдалось разделение их значений на две группы по типу витков орбиты (восходящие и нисходящие), на которых были сформированы изображения. Для угла крена на протяжении всего времени (в течение года) данное разделение наблюдалось полностью без пересечения. Для углов тангажа и рысканья наблюдались как полное, так и незначительное пересечения. Во-вторых, для значений угла крена была выявлена

зависимость от долготы узла витка орбиты. На *рис. 4* приведены значения угла крена (в миллирадианах), которые были вычислены по GCPs на изображениях 2-го канала (сформированных с марта по октябрь 2006 г.), в зависимости от долготы (в градусах) ближайшего узла (восходящего или нисходящего) витка орбиты. На *рис. 4* значения угла крена, вычисленные для нисходящих и восходящих витков орбиты, обозначены символами «точка» и «перекрестие», соответственно. В-третьих, значения угла рысканья, вычисленные для нисходящих витков орбиты, в течение продолжительного периода времени (с июля по октябрь 2006 г.) значительно не отклонялись (в пределах 1,5 миллирадиана) от уровня в 5,5 миллирадиан. В-четвертых, вычисленные значения угла тангажа имели значительный разброс (независимо от типа витков орбиты) на протяжении всего времени (в течение года), характер которого полностью соответствовал разбросу значений угла рысканья для восходящих витков орбиты.



*Рис. 4.* Вычисленные значения угла крена по GCPs для 2-го (VIS) канала

При коррекции привязки по GCPs основную трудность представляют изображения, у которых конфигурация рассчитанных точек не позволяет восстановить полный набор корректируемых параметров, или точки вовсе отсутствуют (сплошная облачность, открытые морские акватории и пр.). Один из возможных подходов получения необходимой точности привязки для такого рода данных основан на результатах работы с изображениями, сформированных ранее (т.е. выполняется прогнозирование параметров привязки). Таким образом, на основе выявленных закономерностей вычисленных значений углов можно разработать методики прогноза параметров привязки данных MVISR с ранее привязанных изображений. Для угла крена достаточно будет использовать зависимость от долготы узла витка орбиты (в линейном приближении), что позволит прогнозировать его значения с ошибкой в пределах 1 миллирадиана (*рис. 4*). Для угла рысканья (только для нисходящих витков орбиты в период с июля по октябрь 2006 г.) достаточно использовать оценку средней величины, что позволит прогнозировать его значения с ошибкой в пределах 1,5 миллирадиана. Для угла тангажа прогноз на данном этапе невозможен. Большой разброс вычисленных значений угла тангажа (до 10 миллирадиан), по-видимому, вызван значительным трендом бортовых часов спутника FY-1D. Также использование выявленных закономерностей углов

положения платформы, возможно, в будущем позволит решить проблему получения точной географической привязки изображений, у которых в течение сеанса приема изменилась ориентация платформы спутника FY-1D с радиометром MVISR в пространстве.

### Заключение

Вычислены оценки значений углов пространственного рассогласования (крен, тангаж и рысканье) между оптическими осями датчиков отдельных каналов радиометра MVISR спутника FY-1D относительно базовых каналов. Это позволяет проводить межканальную привязку данных MVISR с подпиксельной точностью и совместно использовать для коррекции привязки рассчитанные наборы реперных точек по изображениям разных каналов. Представлены результаты географической привязки изображений MVISR после проведения коррекции по реперным точкам с вычислением постоянных значений углов положения спутниковой платформы в течение полного сеанса приёма. Выявлены закономерности вычисленных значений углов, на основе которых можно разработать методики прогнозирования параметров коррекции привязки данных MVISR с ранее привязанных изображений. Также использование выявленных закономерностей, возможно, в будущем позволит решить проблему получения точной географической привязки изображений, у которых во время сеанса приёма изменилась ориентация платформы спутника FY-1D с радиометром MVISR в пространстве.

В июне 2011 г. спутник FY-1D был выведен с орбиты. Но в РСЦМОС ДВО РАН имеется накопленный значительного объема архив данных MVISR, полученных с 2005 по 2011 г., которые могут быть использованы для исследований, требующих наличие спутниковых данных в виде длинных временных рядов. В свою очередь, применение разработанных методик и подходов может значительно ускорить введение в оперативную обработку данных радиометра VIRR (Visible and Infra-Red Radiometer), устанавливаемого на китайских полярно-орбитальных ИСЗ серии FengYun-3 следующего поколения и имеющего аналогичные технические характеристики с радиометром MVISR. Предполагается, что вышеуказанные проблемы обработки данных MVISR с большой вероятностью будут иметь место и в случае с данными VIRR. На данный момент функционируют два экспериментальных ИСЗ новой серии (FY-3A и FY-3B), а на 2013 г. запланирован запуск спутника FY-3C (предназначенного для оперативного использования). Также разработанные методики и подходы могут быть применены при проблемах обработки данных других полярно-орбитальных ИСЗ, причинами возникновения которых могут служить пространственное рассогласование каналов радиометра и / или нестабильное поведение спутниковой платформы в течение сеанса приема. В частности, это касается данных радиометра MSU-MP, установленного на борту действующего российского метеорологического спутника МЕТЕОР-М №1.

Работа поддержана грантами РФФИ (11-01-00593-а, 11-01-00590-а, 11-07-00511-а, 11-01-98510-р\_восток\_а, 13-01-12044-офи\_м) и грантами ДВО РАН.

## Литература

1. *Алексанин А.И., Дьяков С.Е., Катаманов С.Н., Наумкин Ю.В.* Технология обработки данных полярно-орбитальных спутников FY-1C/1D для мониторинга физических полей океана // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 82–91.
2. *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.
3. *Катаманов С.Н.* Точная географическая привязка изображений геостационарного спутника MTSAT-1R в формате HRIT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 97–105.
4. *Эпштейн Ю.С., Гербек Э.Э.* Метод точной географической привязки изображений AVHRR NOAA // Электронный журнал «Исследовано в России». 2001. № 41. С. 456–464. URL: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2001/041.pdf>
5. *Katamanov S.N.* Automatic navigation of one pixel accuracy for meteorological satellite imagery // Proc. of 1st Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications. Vladivostok, Russia. 6–9 September 2010. P. 269–274.
6. *Kelso T.S.* Orbital data on the WWW // Satellite Times, Computers & Satellites. May/June 1996. Vol. 2. No. 5. P. 80–81.
7. *Rosborough G.W., Baldwin D., Emery W.J.* Precise AVHRR image navigation // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1994. Vol. 32. P. 644–657.
8. *Vallado D.A., Crawford P., Hujdak R., Kelso T.S.* Revisiting Spacetrack Report #3 // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Keystone. CO. 21–24 August 2006. 94p. URL: <http://celestrak.com/publications/AIAA/2006-6753/AIAA-2006-6753-Rev2.pdf>
9. *Wessel P., Smith W.H.F.* A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline 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](http://www.soest.hawaii.edu/pwessel/papers/1996/JGR_96/jgr_96.html)

### **Development of automatic method navigation for MVISR imagery of polar-orbital satellite FengYun-1D**

**S.N. Katamanov**

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

The development results of automatic navigation method for FY-1D/MVISR images received during full session is presented. The method is based on the orbital motion model SGP4 (with propagation NORAD TLE sets) and a mathematical model of FY-1D/MVISR physical image deformation. Pixel navigation accuracy is achieved on the computation of satellite attitude angles (roll, pitch and yaw) by the ground control points are automatically defined in an image. The misalignment angles between the optical channel sensor axes of the FY-1D/MVISR radiometer is calculated. The behavior relation of the satellite FY-1D/MVISR attitude angles is identified. The approbation results of the new navigation method for a year MVISR data set received in the Center for Regional Satellite Monitoring of Environment of FEB RAS are presented.

**Keywords:** FY-1D, MVISR, satellite images, navigation, channel-to-channel registration, ground control points, satellite attitude, navigation forecasting.