# Точная географическая привязка изображений AVHRR/NOAA без реперных точек

## С.Н. Катаманов

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

Предложен и исследован подход для прогнозирования параметров коррекции привязки данных AVHRR (спутников серии NOAA) с ранее привязанных изображений по реперным точкам. Метод географической привязки основан на орбитальной модели движения SGP4 (с телеграммами NORAD TLE) и в качестве параметров коррекции привязки используются углы ориентации спутниковой платформы с радиометром в пространстве (крен, тангаж и рысканье). Приведены результаты географической привязки по реперным точкам данных AVHRR, полученных со спутника NOAA-12 в 2006-2007 гг. Рассмотрены альтернативные подходы прогнозирования параметров привязки изображений AVHRR/NOAA с ранее привязки лучше всего использовать телеграммы NORAD TLE, которые были сгенерированы после сеанса приёма. Рассмотрено поведение вычисленных углов положения спутниковой платформы во времени. Представлены результаты оценки точности привязки предложенного подхода прогнозирования, которые были получены для длительной серии данных AVHRR спутников NOAA (-12,-15,-17,-18) в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

Ключевые слова: NOAA, AVHRR, спутниковые изображения, географическая привязка, реперные точки, ориентация спутниковой платформы, прогноз привязки, близлежащие витки орбиты.

## Введение

Один из основных подходов, используемых в мире для достижения пиксельной точности географической привязки изображений AVHRR/NOAA, базируется на использовании орбитальных моделей движения спутника и процедуре коррекции привязки (Bordes et al., 1992; Baldwin, Emery, 1995; Crawford et al., 2003). Эта процедура вычисляет поправки к некоторым параметрам привязки на основе информации о реперных точках (Ground Control Points, GCPs), которая является результатом определения истинных координат местоположений некоторых статических объектов на изображении (имеющих известные географические координаты). Как правило, в качестве параметров коррекции используются углы ориентации спутниковой платформы с радиометром в пространстве (крен, тангаж и рысканье). При коррекции привязки изображений AVHRR/NOAA широко зарекомендовал себя подход, в основе которого лежит гипотеза о постоянстве углового положения платформы спутника с радиометром в течение полного сеанса приёма (12-15 минут) (Baldwin, Emery, 1995; Brunel, Marsouin, 2000; Emery et al., 2003; Алексанин, Катаманов, 2006). На результат вычисления значений углов по GCPs влияют все те же ошибки, что и на точность географической привязки спутниковых изображений. Основными источниками этих ошибок являются неточность определения положения ИСЗ на орбите, тренд бортовых часов спутника, несовпадение плоскости сканирования радиометра и плоскости платформы спутника, текущее угловое отклонение спутниковой платформы от номинального положения. Основную трудность для коррекции привязки по реперным точкам 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. используются соответствующие схемы прогнозирования параметров коррекции привязки.

## Результаты географической привязки по реперным точкам

На *рис. 1* показаны результаты апробации разработанного метода автоматической привязки изображений AVHRR спутника NOAA-12 (Алексанин, Катаманов, 2006), полученных в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды (РСЦМОС) ДВО РАН с мая 2006 г. по август 2007 г. На *рис. 1* приведено количество привязанных изображений (только по GCPs) за каждый месяц в процентном соотношении от общего числа. Гистограммы "95%" и "100%" – это количество привязанных (с пиксельной точностью) изображений с вероятностью не менее 95% и 100% соответственно согласно разработанному критерию оценки точности привязки (Алексанин, Катаманов, 2006). Результаты привязки по реперным точкам данных AVHRR, полученных с других спутников серии NOAA, значительно не отличается от приведённых изображение AVHRR считается привязанным, если вероятность пиксельной точности привязки по реперным точкам составляет не менее 95%. С учётом того, что в РСЦМОС ДВО РАН с каждого ИСЗ серии NOAA в среднем за один месяц принимается около 120–150 сеансов, то около 10–15 изображений (с одного спутника) остаются непривязанными по реперным точкам.



Рис. 1. Количество привязанных изображений AVHRR по GCPs

На *рис. 2* приведён пример изображения (ночной сеанс), для которого вероятность пиксельной точности привязки по рассчитанным GCPs согласно вышеуказанному критерию составила 23%. При этом реперные точки (на *рис. 2* обозначены символом следующего вида « ) были рассчитаны практически по всем возможным лэндмаркерам на изображении в количестве 18 шт. На *рис. 2* красным тоном помечен эталонный береговой контур, а области изображения чёрного цвета соответствуют облачности. Низкая величина вероятностной оценки привязки в данном случае обусловлена крайне "плохим" пространственным размещением конфигурации GCPs вдоль скана изображения (меньше 10% от общей длины скана), а не низкой точностью расчёта точек (среднеквадратичная ошибка привязки в данном случае была меньше одного пиксела).



Рис. 2. Изображение AVHRR спутника NOAA-15 (№ витка орбиты 43219, 5.09.2006, 19:38:00 UTC)

## Задача прогнозирования параметров коррекции привязки

При привязке изображений, у которых конфигурация GCPs не позволяет рассчитать три угла с необходимой точностью (предыдущий пример), в альтернативных методах обычно используется процедура расчёта только двух углов (крена и тангажа), угол рысканья в данном случае полагается равным нулю (Brunel, Marsouin, 2000; Crawford et al., 2003). Но использование такого подхода не позволяет в какой-то степени улучшить точность привязки по всему изображению, а, скорей всего, только ухудшит её (при величинах угла рысканья отличных от нуля). На *рис. 2* приведён пример как раз такого изображения, для которого абсолютные величины углов тангажа и рысканья (вычисленные по реперным точкам) составляют меньше 1 миллирадиана, а в общем случае по углам тангажу и рысканью могут достигать до 7-10 миллирадиан. В результате различного расположения такой конфигурации GCPs вдоль скана изображения (от одного края изображения к другому) вычисленные значения углов тангажа и рысканья будут значительно варьироваться, что связано с взаимозависимым определением данных углов по реперным точкам.

При отсутствии правильно рассчитанных GCPs на изображении разработчиками альтернативных методов привязки данных AVHRR был предложен единственный способ для прогнозирования параметров коррекции привязки. Суть его состоит в том, что выполняется простой перенос вычисленных значений углов положения спутниковой платформы для изображений, сформированных с разницей в 1 или 2 витка орбиты. Впервые такая схема прогноза была предложена разработчиками автоматического метода привязки ANA (Bordes et al., 1992), который может дополнительно поставляться к европейскому пакету программ обработки спутниковых данных ААРР (Marsouin et al., 2011). В основной работе (Brunel, Marsouin, 2000), демонстрирующей результаты исполнения метода ANA на длительной серии изображений, не было представлено в каком-либо виде оценки точности привязки для предложенной схемы прогноза. Также разработчики другого альтернативного метода в качестве успешного результата применения данной схемы прогноза показали только локальное рассогласование эталонного и видимого береговых контуров (около двух пикселов) всего на двух изображениях (Emery et al., 2003, 2011).

В нашем случае метод привязки данных AVHRR основан на широко известной орбитальной модели SGP4 (Simplified General Perturbation #4) (Vallado et al., 2006) с прогнозными телеграммами NORAD TLE (North American Aerospace Defense Command Two-Line Element) (Kelso, 1996). В работе (Crawford et al., 2003), содержащей результаты привязки данных AVHRR от ИСЗ NOAA-16,-17 с использованием модели SGP4, было также проведено исследование на возможность использования вычисленных углов ориентации платформы по GCPs для прогнозирования привязки. В качестве результатов данного исследования были представлены графики значений автокорреляционной функции по каждому углу (крен, тангаж и рысканье) в зависимости от разницы витков орбиты (от 1 до 50 витков). Основные выводы данного исследования были следующие: для обоих ИСЗ максимальные значения автокорреляционной функции для каждого угла достигают при разнице витков орбиты кратной 14. Во всех случаях для рысканья максимум автокорреляционной функции не превысил величины 0,5. В случае NOAA-16 максимум автокорреляционной функции для крена оставался примерно на уровне 0,5. Во всех остальных случаях максимумы автокорреляционной функции не превысили уровень 0,8 (при этом тренд значений функции снижался с увеличением разницы по виткам орбиты). Оценка точности привязки при использовании прогнозных параметров коррекции в данной работе не проводилась. Независимо от результатов, приведённых в работе (Crawford et al., 2003), ранее автором был предложен способ прогнозирования параметров привязки, который основан на простом переносе углов положения спутниковой платформы через 14 и 28 витков орбиты (1 сутки и 2 суток, соответственно). Первичные результаты апробации такого способа прогноза показали, что с пиксельной точностью привязывается около 80–90% изображений (Katamanov, 2010).

## Зависимость вычисленных углов от времени генерации телеграмм TLE

Во многих работах, посвящённых решению задачи точной привязки изображений AVHRR с использованием орбитальных моделей движения, обычно приводят оценку относительной ошибки предсказания положения ИСЗ на орбите в зависимости от временного рассогласования используемых прогнозных телеграмм для применяемой орбитальной модели (Brunel, Marsouin, 2000; Marsouin et al., 2011). В работе (Levit, Marshall, 2011), посвящённой использованию данных NORAD TLE для орбитальной модели более высокого порядка (по отношению к SGP4), были приведены абсолютные ошибки определения положения спутника на орбите (относительно высокоточных реальных измерений) на момент времени получения трекинг-данных, с помощью которых генерируются телеграммы TLE. Так, для полярно-орбитальных ИСЗ (с высотой орбиты в пределах 750-900 км) абсолютная ошибка составила  $0,8\pm0,3$  км (что при максимальных значениях соответствует 1 пикселу AVHRR в надире). В нашем случае было проведено исследование, целью которого являлось определение зависимости вычисленных углов положения платформы от временного рассогласования используемых телеграмм TLE для модели SGP4.

При выполнении данного исследования была использована серия изображений AVHRR (с ИСЗ NOAA-12,-15,-17,-18), сформированных с июня по август 2006 года. Для каждого изображения были рассчитаны GCPs, а по ним вычислены углы ориентации спутниковой платформы. При расчёте реперных точек были использованы телеграммы NORAD TLE, у которых время генерации ближе всего ко времени начала сеанса приёма (разница по времени во всех случаях составила не более 12 часов, в среднем 5 часов). В дальнейшем углы, вычисленные с использованием таких телеграмм, будут называться *"модельными*". Изображения были отобраны согласно условиям, которым удовлетворяла рассчитанная конфигурация GCPs: количество точек не меньше 100 шт., величина пара-

метра "база по строке" не менее 0,9, величина параметра "база по столбцу" не менее 0,5 и значения RMS (Root Mean Square) и максимума модуля остаточных невязок в GCPs не более 1 и 1,5 пиксела соответственно. Параметры "база по строке" ("база по столбцу") – это отношение максимальной разницы координат реперных точек вдоль строки (столбца) на изображении к количеству пикселов в строке (столбце), т.е. они определяют пространственные характеристики размещения конфигурации GCPs на изображении.



Рис. 3. Рассогласования вычисленных углов положения платформы ИСЗ серии NOAA в зависимости от разницы по времени генерации используемых телеграмм TLE

После этого для отобранных изображений пересчитывались углы с учётом использования других телеграмм NORAD TLE (как "прошлых" так и "будущих") и в каждом случае вычислялись величины рассогласований между рассчитанными и "модельными" значениями углов. Телеграмма в данном случае определяется как "прошлая" или "будущая" относительно времени начала сеанса приёма конкретного изображения. На рис. 3 приведены графики величин рассогласований по каждому углу (в миллирадианах) в зависимости от временной разницы (в сутках) используемых телеграмм при вычислении. Из данных графиков следует, что, во-первых, абсолютная величина рассогласования по тангажу значительно быстрее возрастает при нарастании временной разницы между началом сеанса приёма и временем генерации телеграммы. Во-вторых, абсолютные величины рассогласований по тангажу и рысканью быстрее всего нарастают при использовании "прошлых" телеграмм. Таким образом, из приведённых результатов можно сделать вывод о том, что для обеспечения точной привязки (на основе орбитальной модели SGP4) при прогнозировании вычисленных значений углов ориентации платформы лучше всего использовать "будущие" телеграммы NORAD TLE. То есть, телеграммы, которые имеют положительное рассогласование между временем получения трекинг-данных для генерации телеграммы и временем начала сеанса приёма. При этом максимум временной разницы может достигать 3-х суток. В результате такой подход позволит свести ошибки привязки, связанные с предсказанием положения ИСЗ на орбите, к минимуму.

## Подход для прогнозирования параметров коррекции привязки

При выборе подхода для прогноза привязки в первую очередь было проанализировано поведение вычисленных углов положения платформы ИСЗ серии NOAA в зависимости от времени формирования изображений, направления и расположения трасс витков орбиты на поверхности Земли. Для этого была использована серия изображений AVHRR (от спутников NOAA-12,-15,-17,-18), сформированных с мая 2006 г. по август 2008 г. Во всех случаях при привязке использовались телеграммы NORAD TLE, у которых время генерации было ближе всего ко времени начала сеанса приёма. Анализировались только значения наборов углов, при вычислении которых вероятность пиксельной точности привязки была не менее 100%. Проведённый анализ позволил выявить следующие особенности поведения и зависимости вычисленных углов. Во-первых, для тангажа и крена наблюдалось разделение их значений на две группы по типу витков орбиты (восходящие и нисходящие), на которых были сформированы изображения. Для угла тангажа на протяжении большей части времени данное разделение наблюдалось полностью без пересечения. Для угла крена наблюдалось как полное, так и незначительное пересечения. Для угла рысканья разделение на группы в данном случае практически не выражено (кроме NOAA-12). Во-вторых, для всех спутников были зафиксированы резкие изменения величин угла тангажа, происходящие одновременно для восходящих и нисходящих витков орбиты. Причины возникновения данного явления, частота наблюдения которого была не чаще 1 раза в год для всех спутников (кроме NOAA-12), возможно, были связаны с изменениями режима стабилизации платформы ИСЗ либо с манёврами спутников на орбите (после которых платформа стабилизировалась в другое номинальное положение). В случае NOAA-12 гораздо меньшая периодичность резких изменений величин тангажа (около 5 раз в год), по-видимому, связана с техническими особенностями данного ИСЗ. В-третьих, для угла крена (всех спутников NOAA) была выявлена прямая зависимость от долготы ближайших узлов орбиты. Аналогичный результат был также получен и для спутника FengYun-1D (Катаманов, 2013). В результате использование данной зависимости (в линейном приближении) позволяет прогнозировать значения угла крена с ошибкой не более 1 миллирадиана. Таким образом, исходя из вышеприведённых результатов, было предложено в качестве подхода для прогнозирования параметров привязки использовать перенос вычисленных значений углов по GCPs на изображениях AVHRR, которые были сформированы на близлежащих витках орбиты (с одинаковым направлением).

Для оценки точности привязки предложенного подхода прогнозирования была использована серия изображений AVHRR (с ИСЗ NOAA-12,-15,-17,-18), полученных с мая 2006 г. по август 2007 г. и у которых вероятность привязки с пиксельной точностью по GCPs была не менее 100%. Были сформированы наборы пар изображений с одинаковой разницей витков орбиты. Каждая пара имела одинаковое направление витков орбиты (восходящие или нисходящие). В результате этого наборы между собой также различались по временному интервалу формирования изображений в одной паре (все спутники серии NOAA за 1 сутки выполняют 14 полных витков орбиты). Для каждого набора в качестве характеристики, определяющей пространственное рассогласование трасс витков орбиты на поверхности Земли, использовалась величина абсолютной разницы долгот ближайших узлов орбиты. Далее для всех наборов строились гистограммы распределения абсолютных величин разницы по каждому углу положения платформы. А по ним уже оценивалось процентное соотношение количества пар в каждом наборе, которые удовлетворяют условии пиксельной точности привязки. В нашем случае точность привязки изображений AVHRR при использовании прогнозных параметров коррекции счи-

талась пиксельной, если абсолютная разница величин углов была не более 1 миллирадиана для крена и тангажа и не более 1,5 миллирадиана для рысканья. Данное определение также полностью согласуется с разработанным критерием оценки точности привязки по GCPs (Алексанин, Катаманов, 2006). В *табл. 1* и 2 представлены распределения (в процентном соотношении) абсолютных значений разности по каждому углу положения платформы спутников NOAA-15 и NOAA-17, соответственно. Также в *таблицах* приведено для каждого набора общее количество пар изображений, разница полных витков орбиты и разница долгот ближайших узлов витков орбиты. Значения в ячейках *таблиц*, отмеченных серым тоном, удовлетворяют условию пиксельной точности привязки согласно вышеуказанному критерию. Анализ приведённых *таблиц* показывает, что более качественные распределения абсолютных значений разницы по каждому углу ориентации платформы (согласно критерию оценки точности прогнозной привязки) наблюдаются при небольших абсолютных величинах разницы долгот узлов орбиты (т.е. на близлежащих витках орбиты).

Угол	Интервал, мрад.							Разница	Разница
	0,0–0,5	0,5–1,0	1,0–1,5	1,5–2,0	2,0–3,0	3,0–4,0	nap	витков	долгот
Крен	76,69	20,76	2,12	0	0,42	0			
Тангаж	66,95	28,39	2,12	0,85	1,27	0,42	236	1	25,285°
Рысканье	48,31	24,15	17,37	5,08	2,97	1,27			
Крен	76,88	20,63	1,88	0	0,63	0			
Тангаж	65,63	24,38	7,50	0,63	1,88	0	160	13	30,657°
Рысканье	41,88	27,5	16,25	8,13	4,38	1,88			
Крен	90,14	9,28	0,58	0	0	0			
Тангаж	83,75	14,89	0,97	0	0,19	0,19	517	14	6,127°
Рысканье	46,23	30,75	14,31	4,84	2,51	0,97			
Крен	76,45	22,32	0,92	0	0,31	0			
Тангаж	68,50	25,69	3,67	0,92	0,92	0,31	327	15	19,078°
Рысканье	40,98	28,75	18,35	6,73	4,28	0			
Крен	80,48	18,81	0,48	0	0,24	0			
Тангаж	73,57	23,57	2,38	0	0,48	0	420	28	12,134°
Рысканье	42,86	27,14	17,86	7,38	3,81	0,95			
Крен	79,26	19,75	0,99	0	0	0			
Тангаж	73,58	22,47	2,96	0	0,74	0,25	405	29	13,328°
Рысканье	46,67	24,44	15,8	7,41	4,2	0,99			

Таблица 1. Распределение абсолютных значений разности по углам ИСЗ NOAA-15

Крен	75,84	22,94	0,92	0	0,31	0			
Тангаж	74,92	21,41	2,45	0,31	0,31	0,61	327	42	17,847°
Рысканье	37,31	30,89	15,60	9,48	6,12	0,61			
Крен	83,02	14,49	2,48	0	0	0			
Тангаж	75,98	20,5	3,52	0	0	0	483	43	7,467°
Рысканье	40,58	28,57	16,36	8,49	4,97	0,83			
Крен	73,65	22,30	3,38	0	0,68	0			
Тангаж	54,73	27,70	15,54	0,68	0,68	0,68	148	44	31,533°
Рысканье	39,19	29,73	13,51	8,78	7,43	0,68			
Крен	73,86	22,41	3,32	0	0,41	0			
Тангаж	66,39	24,9	5,81	1,66	1,24	0	241	56	23,354°
Рысканье	37,34	29,05	14,11	9,13	7,88	0,98			
Крен	82,81	15,61	1,58	0	0	0			
Тангаж	80,35	16,84	2,28	0,18	0,35	0	570	57	1,438°
Рысканье	41,75	26,67	16,14	7,37	6,49	0,88			
Крен	74,16	22,49	2,87	0	0,48	0			
Тангаж	58,85	30,14	10,05	0	0,96	0	209	58	25,829°
Рысканье	41,15	25,84	19,14	7,66	5,26	1			
Крен	80,57	17,52	1,9	0	0	0			
Тангаж	78,48	17,71	3,43	0,19	0,2	0	525	71	4,903°
Рысканье	38,48	28,57	17,9	9,14	4,96	0,95			
Крен	78,13	19,82	2,05	0	0	0			
Тангаж	66,74	28,47	4,33	0	0,23	0,23	439	85	10,772°
Рысканье	40,09	29,38	16,86	7,06	4,76	1,82			

Таблица 2. Распределение абсолютных значений разности по углам ИСЗ NOAA-17

Угол		1	Интерв	Кол-во	Разница	Разница			
	0,0–0,5	0,5–1,0	1,0–1,5	1,5–2,0	2,0–3,0	3,0–4,0	nap	витков	долгот
Крен	53,75	38,44	6,84	0,98	0	0			
Тангаж	65,15	28,01	5,21	0,33	0,65	0,53	307	1	25,299°
Рысканье	38,44	27,69	19,22	9,77	3,58	0,95	1		
Крен	53,43	37,75	8,82	0	0	0			
Тангаж	53,92	34,8	9,8	0,49	0,49	0,49	204	13	31,116°
Рысканье	32,84	33,82	19,12	6,86	5,88	1,48			
Крен	86,52	11,59	1,62	0,27	0	0			
Тангаж	88,27	10,78	0,4	0,27	0,13	0	742	14	5,817°
Рысканье	48,11	36,12	11,46	3,64	0,54	0			

Крен	59,05	36,67	4,05	0,24	0	0	420	15	19,481°
Тангаж	69,52	25,48	3,81	0,48	0,24	0,48			
Рысканье	38,57	31,67	15,24	10,71	2,82	0,71			
Крен	70,67	26,33	3	0	0	0			11,635°
Тангаж	72,83	24,5	2,17	0,2	0,33	0	600	28	
Рысканье	42,33	35,17	15,83	4,87	1,6	0,17			
Крен	65,4	31,34	3,08	0,18	0	0		29	13,663°
Тангаж	69,02	26,09	3,99	0,54	0,38	0	552		
Рысканье	40,4	31,7	17,75	6,88	2,72	0,58			
Крен	61,64	31,25	6,9	0,22	0	0			
Тангаж	68,10	27,8	2,8	0,22	0,65	0	464	42	17,453°
Рысканье	40,09	29,74	19,18	7,33	2,37	0,65			
Крен	73,04	24,78	1,74	0,29	0,14	0			
Тангаж	75,94	20	3,33	0,29	0,24	0,14	690	43	7,845°
Рысканье	45,22	29,86	14,64	6,23	3,62	0,4			
Крен	58,51	32,82	7,43	1,24	0	0	323	56	23,271°
Тангаж	63,16	28,48	6,19	1,53	0,62	0			
Рысканье	40,25	26,63	19,50	7,74	4,84	1,02			
Крен	77,48	20,08	2,06	0,39	0	0	777	57	2,028°
Тангаж	80,57	16,09	2,67	0,39	0,13	0,13			
Рысканье	44,14	30,50	15,57	6,56	2,7	0,56			
Крен	75,49	22,27	2,24	0	0	0			
Тангаж	77,08	19,5	2,37	0,4	0,26	0,4	759	71	3,79°
Рысканье	43,48	30,04	18,71	4,48	2,64	0,63			
Крен	68,75	27,34	3,91	0	0	0			
Тангаж	69,69	24,38	4,84	0,47	0,36	0,31	640	85	9,607°
Рысканье	43,59	31,25	15	6,72	2,81	0,61			
Крен	74,7	22,1	2,93	0,27	0	0	751	114	4,055°
Тангаж	71,77	22,1	5,06	0,4	0,47	0,33			
Рысканье	43,68	31,03	14,38	6,79	3,6	0,5			
Крен	76,05	20,66	2,92	0,38	0	0	789	128	1,762°
Тангаж	70,72	23,07	5,07	0,63	0,23	0,33			
Рысканье	42,33	30,54	16,48	6,97	2,53	1,18			

## Заключение

Предложен и исследован подход для прогнозирования параметров привязки данных AVHRR, получаемых с полярно-орбитальных спутников серии NOAA. Подход

основан на переносе вычисленных значений углов ориентации спутниковой платформы по реперным точкам на изображениях, которые были сформированы на близлежащих витках орбиты (с одинаковым направлением). Результаты оценки точности прогнозной привязки показали, что абсолютная разница между прогнозными и рассчитанными (по GCPs на изображении) величинами углов лежит в пределах 1 миллирадиана для крена и тангажа и 1,5 миллирадиана для рысканья (данные оценки не превышают угловые размеры 1 пиксела AVHRR). Также показано, что для обеспечения точной прогнозной привязки (на основе орбитальной модели SGP4) лучше всего использовать телеграммы NORAD TLE, которые имеют положительное рассогласование между временем получения трекинг-данных для генерации телеграммы и временем начала сеанса приёма. При этом временная разница может достигать до 3-х суток. Первичные результаты апробации предложенного подхода прогнозирования при привязке данных AVHRR/NOAA в РСЦМОС ДВО РАН показали, что в течение года привязываются все изображения с требуемой точностью (с учётом привязки по реперным точкам). Максимум временного интервала между принятыми сеансами для прогнозной привязки составил 4 суток (при условии постоянного приёма со спутников). Предложенный подход для прогнозирования привязки позволит значительно улучшить качество получаемых тематических и композиционных продуктов, при построении которых используется данные с полярно-орбитальных спутников серии NOAA.

Работа поддержана грантами ДВО РАН и Программами фундаментальных исследований Президиума РАН.

## Литература

- 1. Алексанин А.И., Катаманов С.Н. Автоматическая привязка спутниковых изображений AVHRR/NOAA при сложных условиях наблюдения // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2006. Т. 1. № 3. С. 41–48.
- 2. *Катаманов С.Н.* Разработка автоматического метода географической привязки изображений MVISR полярно-орбитального спутника FengYun-1D // Совр. пробл. дист. зонд. Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 85–93.
- 3. *Baldwin D., Emery W.J.* Spacecraft attitude variations of NOAA-11 inferred from one-year of AVHRR imagery // Int. J. Rem. Sens. 1995. Vol. 16. No. 3. P. 531–548.
- 4. *Bordes P., Brunel P., Marsouin A.* Automatic adjustment of AVHRR navigation // J. Atmos. Oceanic Technol. 1992. Vol. 9. P. 15–27.
- 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.
- 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.
- 8. *Emery W.J., Crocker R.I., Baldwin D.G.* Automated AVHRR Image Navigation // Image Registration for Remote Sensing. UK: Cambridge University Press. May 2011. P. 383–399.

- 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. 6–9 September 2010. P. 269–274.
- 10. Kelso T.S. Orbital Data on the WWW // Satellite Times. May/June 1996. Vol. 2. № 5. P. 80–81.
- 11. *Levit C., Marshall W.* Improved orbit predictions using two-line elements // Advances in Space Research. April 2011. Vol. 47. No. 7. P. 1107–1115.
- 12. *Marsouin A., Brunel P., Atkinson N.* AAPP documentation Annex of scientific description: AAPP navigation // EUMETSAT. October 2011. Version 1.3. 29 p.
- 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.

## Accurate NOAA/AVHRR image navigation without ground control points

#### S.N. Katamanov

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

An approach of navigation attitude forecasting for NOAA/AVHRR images using previously navigated images on ground control points is proposed and examined. The navigation method is based on the orbital motion model SGP4 (with propagation NORAD TLE sets) with satellite attitude angles (roll, pitch and yaw) used as navigation correction parameters. The navigation results on ground control points obtained in 2006-2007 for NOAA-12/AVHRR images are presented. Alternative approaches of navigation attitude forecasting for NOAA/AVHRR images using previously navigated images on ground control points are considered. It is shown that the best navigation attitude forecasting is achieved using NORAD TLE telegrams generated after the receiving session. The behavior of calculated NOAA attitude angles in time is considered. The results of accuracy tests of the proposed approach of navigation forecasting are presented for long series of NOAA (-12, -15, -17, -18) AVHRR data received at the Center for Regional Satellite Monitoring of Environment of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences.

**Keywords:** NOAA, AVHRR, satellite images, navigation, ground control points, satellite attitude, navigation attitude forecasting, close satellite orbits.

## References

- 1. Alexanin A.I., Katamanov S.N., Avtomaticheskaya privyazka sputnikovykh izobrazhenii AVHRR/NOAA pri slozhnykh usloviyakh nablyudeniya (Automatic navigation of satellite NOAA/AVHRR imagery under complicated observation conditions), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 1, No. 3, pp. 41–48.
- 2. Katamanov S.N., Razrabotka avtomaticheskogo metoda geograficheskoi privyazki izobrazhenii MVISR polyarno-orbital'nogo sputnika FengYun-1D (Development of automatic method of 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.
- 3. Baldwin D., Emery W.J., Spacecraft attitude variations of NOAA-11 inferred from one-year of AVHRR imagery, *Int. J. Rem. Sens.*, 1995, Vol. 16, No. 3, pp. 531–548.
- 4. Bordes P., Brunel P., Marsouin A., Automatic adjustment of AVHRR navigation, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1992, Vol. 9, 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.
- 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.

- Emery W.J., Crocker R.I., Baldwin D.G., Automated AVHRR Image Navigation, Image Registration for Remote Sensing, UK: Cambridge University Press, May 2011, pp. 383–399.
- 9. 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, 6–9 September 2010, pp. 269–274.
- 10. Kelso T.S., Orbital Data on the WWW, Satellite Times, May/June 1996, Vol. 2, No. 5, pp. 80-81.
- 11. Levit C., Marshall W., Improved orbit predictions using two-line elements, *Advances in Space Research*, April 2011, Vol. 47, No. 7, pp. 1107–1115.
- 12. Marsouin A., Brunel P., Atkinson N., *AAPP documentation Annex of scientific description: AAPP navigation*, EUMETSAT, October 2011, Version 1.3, 29 p.
- 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.