

ОБРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ПОЛЯРНО-ОРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ FENGYUN

А.И. Алексанин, С.Е. Дьяков, А.В. Громов, Ю.В. Наумкин, Е.В. Фомин

*Институт Автоматики и Процессов Управления (ИАПУ) ДВО РАН,
690041, Владивосток, Радио 5
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru*

Установленный на полярно-орбитальных спутниках FengYun-1C, FengYun-1D радиометр MVISR поставляет изображения 1.1 км разрешения в десяти спектральных каналах, пять из которых соответствуют каналам NOAA/AVHRR, а из дополнительных каналов четыре являются видимыми, один – ближним инфракрасным. К особенностям данных спутников, затрудняющих их использование, относятся: пространственное рассогласование спектральных каналов, отсутствие процедур калибровки и фильтрации шумов ИК-каналов, отсутствие алгоритмов оценки концентрации хлорофилла. В процессе проведенных исследований были получены следующие результаты. Выявлены особенности формирования изображений, созданы алгоритмы коррекции принимаемых кадров и алгоритмы пространственного согласования каналов. Разработана процедура кросс-калибровки ИК-каналов на основе данных радиометра AVHRR/NOAA. Продемонстрирована возможность использования каналов цветности спутников FY-1 для мониторинга полей фитопланктона в море. Работа поддержана грантами РФФИ № 03-01-00812; 04-07-90350 и грантами ДВО РАН.

Появление новых китайских полярно-орбитальных спутников FengYun-1C/1D с радиометром MVISR обещало существенно улучшить мониторинг быстро меняющихся процессов и явлений на море и на суши, так как в отличие от базового источника информации (NOAA/AVHRR, производство США) китайский радиометр не уступает ему по характеристикам и имеет 5 дополнительных каналов (диапазонов зондирования в видимой области спектра). Установленный на спутниках FY-1C, FY-1D радиометр поставляет изображения 1.1 км разрешения в десяти спектральных каналах, пять из которых соответствуют каналам NOAA/AVHRR, а из дополнительных каналов четыре являются видимыми, а один – ближним инфракрасным (Xu Jianping, Wei Caiying. The Chinese Meteorological Satellite Programs // National Meteorological Satellite Center, China Meteorological Administration. - http://www.eumetsat.de/en/area2/proceedings/eump29/pdf/session_2/verbal/xu.pdf). Характеристики каналов MVISR позволяют использовать их для определения температуры морской поверхности, концентрации хлорофилла, детектирования льда и т.д. Однако не наблюдается широкого использования этих данных в практике дистанционно зондирования, что связано с рядом особенностей спутников.

Формат кадра CHRPT

Существенное отличие данных радиометра MVISR (режим передачи CHRPT) касается так называемого 1-секундного алгоритма поиска строки, содержащей правильное время кадра и лежащего в основе остальных алгоритмов коррекции файла, включая обнаружение кадров с неправильным временем, обнаружение пропусков кадров (gaps) и т.д. Дело состоит в том, что участвующая в формировании кадра CHRPT бортовая аппаратура китайских спутников серии FY-1, в отличие от прецизионной аппаратуры американских спутников NOAA, обладает целым рядом технологических недоработок и это приводит к тому, что разработанные ранее алгоритмы коррекции времени кадра и поиска пропущенных кадров не могут быть применены к файлам серии FY-1 в таком же виде, в каком они были разработаны для файлов NOAA.

Список технологических недостатков спутников серии FY-1, влияющих на алгоритмы коррекции, начинается с полей времени в кадре CHRPT. Несмотря на то, что поля времени (день от начала года и время суток в миллисекундах от начала дня) формально присутствуют в кадре CHRPT, так же как и в кадре HRPT, их содержимое значительно отличается. На обоих спутниках серии FY-1 поле дня от начала года всегда содержит значение 0, т.е. значение данного поля отсутствует. Поле времени суток содержит ненулевые значения, однако внимательный анализ содержимого этого поля показывает, что в отличие от кадра NOAA HRPT, содержащего правильные временные расстояния между кадрами в 166 и 167 миллисекунд по крайней мере на протяжении одного сеанса, данное поле для FY-1 CHRPT подвержено даже в течение одного сеанса значительному тренду. Проще говоря, бортовые часы FY-1 непрерывно и довольно значительно либо идут вперед (на спутнике FY-1D), либо отстают (на спутнике FY-1C). Величина временного тренда составляет несколько десятых секунды в сутки (отметим, что аналогичный тренд для NOAA составляет примерно такую же величину за три месяца, т.е. примерно на два порядка меньше). Столь значительный тренд бортовых часов приводит к тому, что периодически, примерно раз в сутки, аппаратура вынуждена корректировать свои бортовые часы, что выражается в резких скачках величины в поле

времени. В сочетании с отсутствием значения в поля дня от начала года такое поведение поля времени делает задачу поиска кадров с правильным временем и обнаружения пропущенных кадров (gaps) крайне затруднительной, а иногда и просто логически невозможной.

Тем не менее, данная проблема все же была решена путем модернизации разработанного ранее 1-секундного алгоритма. Единственный случай, который не может быть обработан таким модифицированным алгоритмом, наступает тогда, когда скачок времени из-за коррекции бортовых часов по величине составляет ровно несколько кадров. В этом случае просто логически невозможно определить, обусловлен ли этот скачок потерей кадров, или коррекцией часов. Однако, данная ситуация, во-первых, возможна лишь на спутнике FY-1C, на котором бортовые часы отстают и периодически подводятся вперед, во-вторых, точное совпадение величины коррекции с правильным временным расстоянием между кадрами весьма маловероятно, а в-третьих, в силу потери стабильности ориентации платформы с радиометром в начале 2004 года использовать данные этого спутника фактически невозможно. Эксперименты с конвертацией реально принятых на станции файлов FY-1D в течение более чем годового приема подтвердили правильность и работоспособность модифицированного алгоритма коррекции.

Рассогласование ориентаций сенсоров каналов спутников FY-1

На спутниках серии FY-1 существует серьезная проблема, заключающаяся в рассогласовании оптических осей сенсоров отдельных каналов. Данное рассогласование приводит к тому, что за время сканирования одной строки изображения датчики различных каналов сканируют различные участки земной поверхности в различных плоскостях. Суммарные изображения одного сеанса выглядят, таким образом, по-разному для разных каналов и они не могут быть совмещены простым наложением изображения одного канала на изображение другого канала. Рассогласования достигают величины в 5 пикселей для некоторых каналов.

Для решения этой проблемы был разработан метод согласования ориентаций сенсоров отдельных каналов FY-1. Основная идея метода к процедуре наилучшего совмещения каналов. Критерием наилучшего совмещения изображений двух каналов может быть любая целевая функция, которая в зависимости от величины заданных сдвигов и деформаций дает минимум при наилучшем совмещении. Таким образом, задача согласования ориентаций сенсоров может быть сведена к обычной задаче нелинейного программирования, т.е. задаче поиска минимума в пространстве нескольких переменных. Решение такой задачи может быть произведено численно с помощью любых известных и доступных методов нелинейного программирования. В качестве переменных поискового пространства должны выступать коэффициенты сдвигов и деформаций, а в качестве целевой функции может быть выбрана либо функция корреляции, либо модуль разности двух изображений, одно из которых сдвинуто и деформировано относительно другого, либо рассогласования идентичных реперных точек на разных каналах. Предполагалось, что расхождение изображений двух каналов обусловлено исключительно углами между ориентациями двух сенсоров, закрепленных на платформе спутника.

Изложенный метод согласования каналов для спутников FY-1 был реализован и исследован для нескольких произвольных файлов. В целом исследования показали, что метод является работоспособным и дает правдоподобные и повторяемые результаты. Использование вычисленных коэффициентов сдвига для согласования каналов при первичной обработке спутниковых файлов серии FY-1 позволило резко улучшить качество цветных изображений, получаемых на основе видимых каналов различных частотных диапазонов FY-1 (рис.1). Согласование каналов цветности океана FY-1 было также применено для задачи обнаружения фитопланктона и позволило получить результаты, сопоставимые по качеству с аналогичными результатами, полученными на основе данных спутника SeaStar.

Кросскалибровка ИК-каналов спутника FY-1D

Методика калибровки инфракрасных каналов спутника FY-1D не опубликована, в отличие от каналов видимого диапазона, которые калибруются простыми линейными зависимостями с известными коэффициентами. Между тем, необходимость расширения технической базы спутникового мониторинга делает желательной хотя бы предварительную калибровку ИК-каналов FY-1D.

Рассмотрение формата данных спутника FY-1D позволило установить, что в каждом фрейме исходного изображения FY-1D содержатся данные телеметрии, и они включают в себя измерения радиометром космического пространства (10 слов на канал), внутренней цели (6 слов на канал), дополнительные слова, соответствующие внутренним датчикам (10 слов), а также слова синхронизации и резервные. В силу схожести форматов было сделано предположение, что процедура калибровки данных ИК-каналов FY-1D должна соответствовать процедуре калибровки ИК-каналов радиометра AVHRR3 спутников POES NOAA.

Данная процедура предполагает проведение калибровки по парам реперных точек, одна из которых соответствует отсчетам наблюдения космического пространства, излучение которого принимается равным нулю, а другая – отсчетам наблюдения внутренней цели, температура которой измеряется дополнительными датчиками. Зависимость отсчетов от величины излучения для ИК-каналов принимается близкой к линейной. Процедура калибровки ИК-каналов AVHRR3 спутников POES NOAA реализуется тремя различными способами, описанными в NOAA NESS 107 Tech. memorandum, NOAA POD User’s Guide и NOAA KLM User’s Guide соответственно. Наиболее точной из них считается процедура, описанная в NOAA KLM User’s Guide, которая и была взята за основу (формулы 1-7).

Формула Планка (1) описывает величину излучения абсолютно черного тела с температурой T на длине волны $\tilde{\nu}$.

$$R_{\text{plank}}(T) = \frac{c_1 \tilde{\nu}^3}{e^{\frac{c_2 \tilde{\nu}^3}{T}} + 1} \quad (1)$$

Формула (2) учитывает тот факт, что сканер воспринимает некоторый диапазон длин волн, относительный вклад которых в общую величину излучения различен.

$$R_{\text{klm}}(T) = R_{\text{plank}}(T \times \tilde{A} + \tilde{B}) \quad (2)$$

Формула (3) описывает зависимость температуры внутренней цели от показаний термометров $C_{\text{prt},n}$, причем где n – номер термометра а nprt – общее число термометров.

$$T_{\text{target}} = \sum_{n \in \text{nprt}} w_n (\tilde{a}_{n,0} + \tilde{a}_{n,1} C_{\text{prt},n} + \tilde{a}_{n,2} C_{\text{prt},n}^2) \quad (3)$$

Формула (4) определяет коэффициенты преобразования отсчеты – радиации M и I .

$$\begin{cases} \tilde{C}_{\text{space}} \rightarrow C_{\text{target}} \\ \tilde{R}_{\text{space}} \rightarrow R_{\text{target}} = R_{\text{klm}}(T_{\text{target}}) \end{cases} \rightarrow (M, I) \quad (4)$$

Здесь R_{space} – дополнительный близкий к нулю параметр, частично учитывающий нелинейность зависимости отсчеты – радиации.

В формуле (5) представлена линейная форма зависимости отсчеты – радиации

$$R(C) = MC + I \quad (5)$$

В формуле (6) вводятся дополнительные параметры нелинейной коррекции.

$$R_{\text{nline}}(C) = \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 R(C) + \tilde{b}_2 R^2(C) \quad (6)$$

Формулы (7) описывает конечную зависимость радиаяркостной (радиационная яркость) температуры от отсчетов сканера.

$$T(C) = R_{\text{klm}}^{-1}(R_{\text{nline}}(C)) \quad (7)$$

Таким образом, задача калибровки сводится к задаче определения коэффициентов $\tilde{\nu}$ – центральное волновое число канала, \tilde{A} и \tilde{B} – коэффициенты учета формы функции отклика, $a_{n,0}$, $a_{n,1}$, $a_{n,2}$ – позволяют определять температуру внутренней цели, R_{space} , \tilde{b}_0 , \tilde{b}_1 , \tilde{b}_2 – коэффициенты нелинейной коррекции.

Наиболее важными параметрами являются коэффициенты полинома определяющего температуру внутренней цели и волновое число канала.

Определить данные параметры можно только сопоставлением данных FY-1D с данными соответствующих каналов других спутников, например POES NOAA. Определение коэффициентов делится на два этапа. На первом этапе мы определяем вид зависимости температуры от показаний термометров. На втором этапе мы должны определить параметры нелинейной коррекции.

На первом этапе определения коэффициентов было сделано следующее:

а) получены исходные файлы FY-1D, получены отсчеты датчиков и отсчеты сканера, соответствующие внутренней цели;

б) выбраны файлы в которых отсчетам, соответствующим температуре внутренней цели, соответствуют значительные, однородные и свободные от облачности участки морской поверхности сканируемые под небольшими углами;

в) получены и обработаны файлы NOAA, время приема которых отличается не более чем на шесть часов с отобранными файлами FY-1D;

г) из каждой пары файлов выбрано несколько пар <отсчеты FY-1D> – <радиационная температура NOAA>, а по ним, после линейной интерполяции, определена радиационная яркостная температура NOAA для отсчетов внутренней цели;

д) построены графики зависимости значений радиационной яркостной температуры внутренней цели, определенной по данным NOAA, от значений температуры внутренней цели;

е) определены коэффициенты линейной зависимости температуры внутренней цели от отсчетов термометров.

По данным короткой выборки получены следующие результаты для параметров формулы 3. Коэффициенты термометров примерно одинаковые и равны следующим значениям: $w_n \approx 0,25$; $a_{n,0} \approx 0,683$; $a_{n,1} \approx -9,52$; $a_{n,2} \approx 0$.

Таким образом, получены предварительные оценки параметров калибровки ИК-каналов FY-1D.

Исследование возможности использования данных FY-1C, FY-1D для мониторинга полей фитопланктона в море

Наличие у спутников FY-1C, FY-1D каналов цветности моря (7 – 0.43-0.48 мкм, 8 – 0.48-0.53 мкм, 9 – 0.53-0.58 мкм) позволяет их использовать для мониторинга фитопланктона (оценки концентрации хлорофилла-а). Спектральная ширина данных каналов примерно вдвое превышает спектральную ширину соответствующих каналов сканера цвета океана SeaWiFS, а уровень шумов и шаг альбедо для данных каналов, не были определены.

Для сравнения использовались данные радиометра SeaWiFS, обработанные алгоритмом OC2:

$$c_{chl,a} = 10^{A_1 + A_2 \times \log\left(\frac{R(490)}{R(555)}\right)} \quad (8)$$

где $R(490)$ и $R(555)$ – коэффициенты диффузного отражения моря на длинах волн 490 и 550 нм соответственно.

Следовательно, для доказательства возможности использования данных FY-1C, FY-1D необходимо построить карты отношений альбедо каналов цветности FY-1C, FY-1D и провести качественное сравнение полученных структур с реперными картами распределения хлорофилла-а. В качестве реперных карт наиболее естественно использовать карты, построенные системой программ SeaDAS по данным сканера SeaWiFS, с временным рассогласованием, не превышающим несколько часов.

Для построения карт отношений альбедо использовались данные FY-1D, принятые в июне-июле 2004 г. Данные FY-1D были откалиброваны и построены отношения альбедо 8-го и 9-го. Из обработанных данных были визуально выбраны дневные снимки с открытой однородной атмосферой над южной частью Японского моря, Желтым морем и северо-западной частью Тихого океана (район острова Хоккайдо). Отдельно контролировалось отсутствие солнечных бликов в рассматриваемых районах.

Карты распределения хлорофилла были построены по данным сканера SeaWiFS. Полученные карты распределения хлорофилла по данным SeaWiFS были сгруппированы с соответствующими по времени приема данными FY-1D.

На рис. 2. приведена пара изображений, демонстрирующая возможность использования данных спутников FY-1 для мониторинга полей фитопланктона моря.

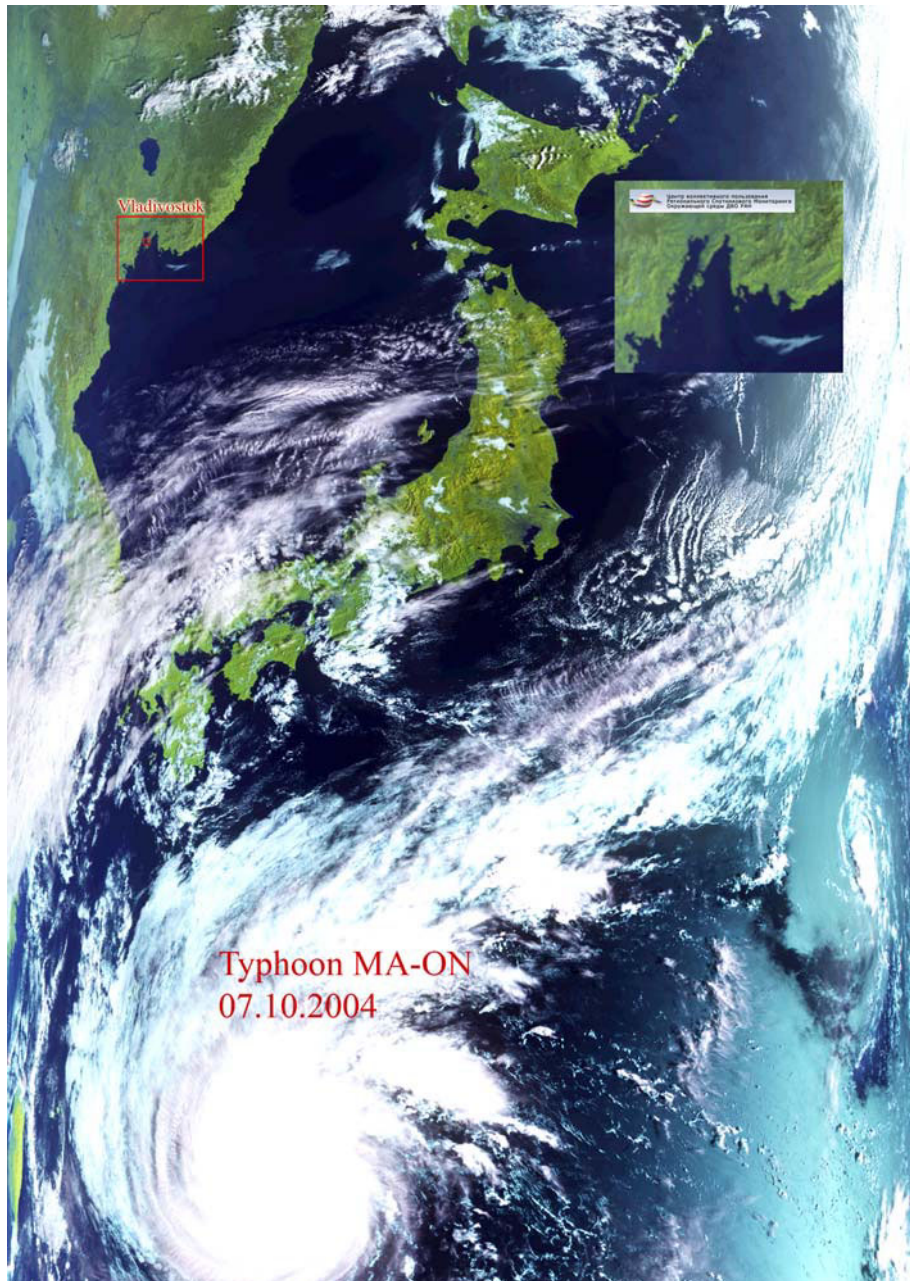


Рис. 1. Пример RGB-изображения (3 совмещенных канала) спутника FY-1D после коррекции каналов

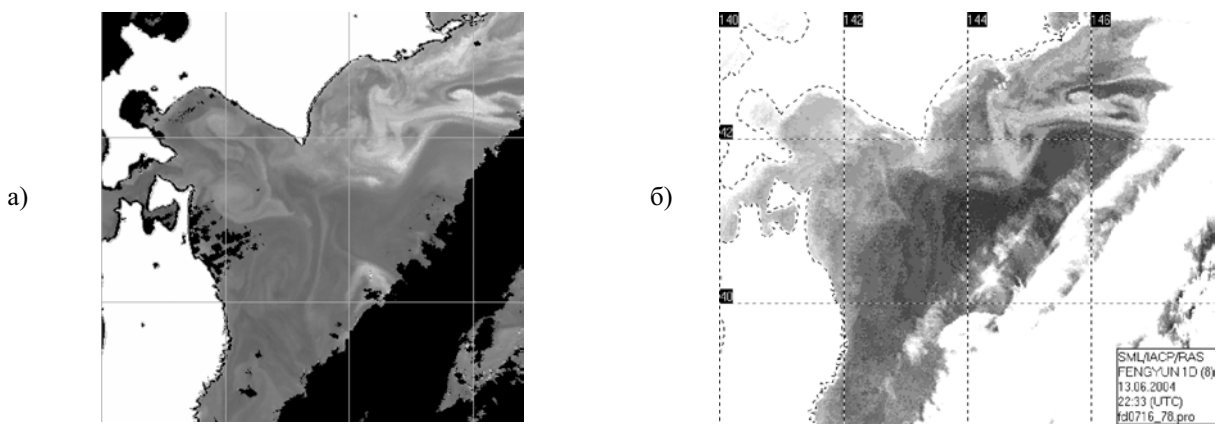


Рис. 2. Карты распределения хлорофилла, построенные по данным сканера SeaWiFS а) и FY-1D б) (отношение излучений 8 и 9 каналов). Сангарский пролив, о. Хоккайдо, 13 июля 2004 года