

Возможности построения краткосрочных глобальных радиотепловых изображений системы океан-атмосфера на базе программной платформы Stream Handler

Д.М. Ермаков^{1,2}, А.П. Чернушич¹, Е.А. Шарков², Я.Н. Шрамков²

¹Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязинский филиал,
141190, Фрязино Московской области, пл. Введенского, 1

E-mail: dima@ire.rssi.ru; andrey@ire216.msk.su;

²Институт космических исследований РАН,

117997, Москва, Профсоюзная, 84/32

E-mail: e.sharkov@mail.ru; cinlun23@gmail.com

Для изучения процессов тропического циклогенеза необходимо систематическое глобальное покрытие мирового океана радиометрическими спутниковыми измерениями с временным разрешением не хуже 6 часов. К сожалению, в настоящее время не существует единого комплекса спутниковых приборов, способных обеспечить подобные радиометрические измерения. Для преодоления этого ограничения предложена методика интерполяции имеющихся спутниковых данных. В первом, линейном приближении применен известный формальный подход к пространственно-временной интерполяции последовательности изображений, характеризующих «кинематику» наблюдаемого процесса без учета природы определяющих его явлений. С использованием данных спутниковых многоканальных радиометров SSM/I исследована адекватность этого приближения задаче восстановления и трассировки характерных яркостных контрастов, соответствующих разным фазам зарождения и развития тропического циклона. Контроль качества интерполяции осуществлен с помощью созданной и поддерживаемой в ИКИ РАН базы данных по тропическим циклонам «Глобал-ТЦ». Математическая обработка и совместный анализ данных выполнены на базе программной платформы “Stream Handler” израильской компании “File X Ltd”. Обсуждены пути дальнейшего совершенствования предложенного интерполяционного подхода.

Ключевые слова: глобальный тропический циклогенез, интерполяция дистанционных данных.

Введение

Одним из подходов к исследованию глобального тропического циклогенеза дистанционными методами является широкий ретроспективный анализ статистики наблюдений тропических циклонов (ТЦ) и тропических возмущений (ТВ) совместно с синхронно полученными данными дистанционных (спутниковых) измерений системы океан-атмосфера. Такой анализ может быть применен как для проверки и уточнения существующих моделей и представлений, так и для обнаружения новых закономерностей и выработки эмпирических правил, характеризующих различные стадии тропического циклогенеза. Очевидно, что эффективность и достоверность такого анализа напрямую связана с объемом и полнотой доступной информации как по реально зафиксированным ТЦ и ТВ, так и по синхронным спутниковым измерениям.

Полнота спутниковых данных зависит от их временного разрешения (т.е. частоты пролета спутника над одними и теми же участками Земли) и размеров пространственных лакун, т.е. областей между соседними витками орбиты, не покрываемых спутниковыми измерениями. Как правило, картина покрытия спутниковыми (солнечносинхронными) измерениями поверхности Земли, содержащая значительные лакуны, формируется за интервал порядка 1 суток. Суточные данные чаще всего берутся за основу при изучении глобальных процессов дистанционными методами. Однако при исследовании глобального тропическо-

го циклогенеза, представляющего собой ряд независимых быстро (иногда, в течение нескольких часов) развивающихся процессов в зоне низких широт системы океан-атмосфера, ни временное разрешение, ни степень пространственного покрытия, характерные для таких дистанционных данных, не являются удовлетворительными.

Функционирование нескольких идентичных спутниковых приборов, выведенных на разнесенные по времени орбиты, обеспечивает определенную «избыточность» информации на суточных интервалах. Обычный путь использования этой избыточности – накопление данных различных спутников на общем суточном изображении, которое будем называть «композитным». За счет накопления пространственные лакуны на композитных изображениях устраняются или существенно уменьшаются, однако остается проблема низкого разрешения по времени, усугубленная возникновением «разрывов временной развертки»: измерения, выполненные приборами разных спутников, относятся к разным временам съемки. В результате композитные изображения содержат сдвиговые искажения, резкие разрывы, «phantomное» удвоение некоторых процессов.

Предложенный в настоящей работе интерполяционный подход ориентирован на улучшение временного разрешения спутниковых данных за счет более эффективного использования их суточной «избыточности» и интерпретации дистанционных данных как видеопотока со сложной временной разверткой. Он также открывает возможности для коррекции искажений, связанных с «разрывом временной развертки». В зависимости от характеристики исходных дистанционных данных и степени их избыточности этот подход может быть применен и для сокращения пространственных лакун.

Характеристика использованных данных

В настоящей работе были использованы дистанционные данные СВЧ сканеров SSM/I спутников F13, F14, F15 серии DMSP. Исходные многоканальные данные были пересчитаны в суточные глобальные карты водяного пара. На основе предложенного подхода суточные карты водяного пара были интерполированы в карты с шагом по времени 3 – 6 часов. Для анализа достоверности полученных результатов была привлечена независимая информация развитой и поддерживаемой в ИКИ РАН базы данных «Глобал-ТЦ». ТЦ и ТВ имеют характерные сигнатуры на картах водяного пара в виде контрастных областей круговой формы. Положения этих областей на интерполированных картах водяного пара сопоставлялись положениями зарегистрированных ТЦ и ТВ по данным «Глобал-ТЦ». Поскольку за время 3 – 6 часов ТЦ и ТВ заметно меняли свое положение, такое сопоставление характеризовало корректность восстановления фаз быстрых процессов в глобальном поле водяного пара.

Дистанционные данные

По данным SSM/I со спутников F13, F14 и F15 за 2005 г. в формате GRID (яркостные температуры, приведенные к регулярной географической сетке) построены глобальные карты атмосферного водяного пара по формуле (Ruprecht, 1996):

$$W = 131.95 - 39.50 \cdot \ln(280 - T_{22V}) + 12.49 \cdot \ln(280 - T_{37V}) \quad (1)$$

где T_{22V} , T_{37V} – яркостные температуры, измеренные на 22 ГГц и 37 ГГц (вертикальной поляризации) соответственно. Для каждой карты водяного пара генерировалась метка времени, содержащая дату и условное время 00:00:00 (полночь) наблюдений. Примеры таких карт за 25 и 26 августа 2005 г. приведены на рис. 1 а,б. В верхнем правом углу изображений помещены метки времени.

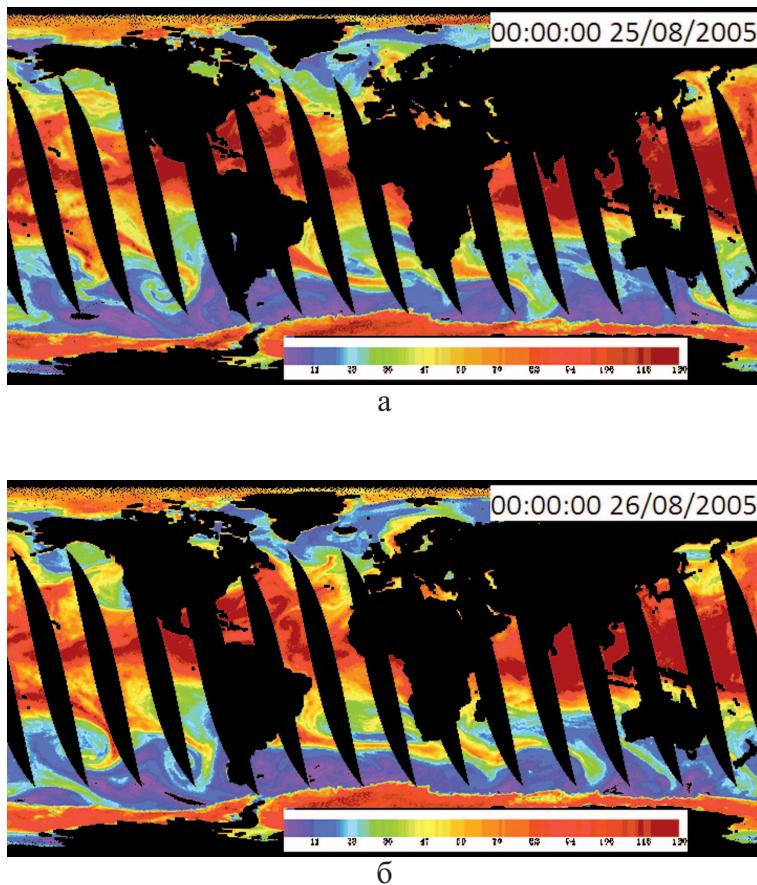


Рис. 1. Глобальные изображения интегрального водяного пара по данным радиотеплового комплекса SSM/I, спутник F13 миссии DMSP (при суточном накоплении): а) 25.08.2005; б) 26.08.2005

Данные «Глобал-ТЦ»

База данных «Глобал-ТЦ» была разработана в ИКИ РАН для исследований глобального тропического циклогенеза и проблем климатологии (Покровская, Шарков, 2006). База данных постоянно пополняется оперативной информацией обо всех наблюдаемых ТЦ и ТВ и в настоящий момент содержит данные за 1983 – 2011 гг.

«Глобал-ТЦ» состоит из таблиц двух типов: таблиц хронологии и эволюции. Таблицы хронологии используются для поименования и быстрого поиска параметров циклонов. Таблицы эволюции содержат описания развития отдельных ТЦ и ТВ: их треки, фазы, некоторые физические параметры (давление, максимальная скорость ветра и т.д.).

Локализация всех активных ТЦ и ТВ для заданных даты и времени суток осуществлялась двухшаговой процедурой поиска по таблицам «Глобал-ТЦ»: на первом шаге по данным таблиц хронологии составлялся список всех активных (в заданное время) ТЦ и ТВ; на втором шаге из таблиц эволюции извлекались географические координаты включенных в список ТЦ и ТВ (а также, при необходимости, другие их характеристики).

Интерполяция дистанционных данных

Метод пространственно-временной интерполяции дистанционных данных основан на принципе потоковой обработки, интерпретирующей суточные карты водяного пара как кадры видеопотока специального типа со сложной временной разверткой. Будем далее обозначать видеокадры буквой F (frame). Если необходимо уточнить специфику построения кадра, будем использовать верхний индекс, например, F^{13A} – кадр, построенный по измерениям на восходящих витках спутника F13. Время кадра будем указывать в нижнем индексе в днях (и долях дня) относительно начала 2005 г, например, F_1 – кадр, соответствующий времени 00:00:00 (полуночи) 2 января 2005 г.

Обработка и анализ данных были выполнены средствами программной платформы Stream Handler (Израиль, <http://www.thefilex.com/SH/>). В идеологии Stream Handler алгоритм потоковой обработки представляется в виде направленного графа с узлами – обрабатывающими модулями и соединениями – каналами передачи данных. Будем обозначать обрабатывающий модуль (или фильтр) буквой P (processor), а результат его применения к кадру данных $F - P(F)$. Фильтры будем различать по нижним индексам, например, $P_b(P_a(F))$ – результат последовательного применения к данным F фильтров P_a и P_b . Результатом применения к данным некоторого фильтра могут оказаться данные другого типа (не видеокадр, а, например, векторное поле). Такие случаи будем оговаривать особо и обозначать результирующие данные другими латинскими буквами.

Были рассмотрены две принципиальные возможности реализации интерполяционного подхода. Первая возможность состоит в независимом использовании данных каждого спутника. В этом случае интерполяция должна быть направлена на устранение пространственных лакун за счет использования нескольких последовательных карт водяного пара, полученных по данным одного спутника на витках одного типа: $F_D^{\text{int}} = P_{\text{int}}(\dots, F_{D-1}^{13A}, F_D^{13A}, F_{D+1}^{13A}, \dots)$. Аналог такой интерполяции в системах обработки видео и компьютерного зрения – устранение случайных дефектов, царапин, затемнений на пленке. Эта возможность привлекательна тем, что сохраняет «однородность» данных (единство прибора и параметров изменения) и их временную развертку. К сожалению, анализ показал, что подобный подход не применим к данным SSM/I, т.к. пространственные лакуны имеют большие относительные размеры и малую скорость смещения. Вследствие этого большие области в экваториальной зоне остаются не покрытыми «однородными» данными в течение 3 – 4 суток, за которые картина распределения водяного пара меняется существенным образом и не может быть адекватно восстановлена.

Альтернативная возможность состоит в предварительном формировании композитных суточных карт водяного пара по данным всех спутников: $F_D = P_{\text{merge}}(F_D^{13A}, F_D^{14A}, F_D^{15A}, F_D^{13D}, F_D^{14D}, F_D^{15D})$. При этом пространственные лакуны ликвидируются традиционным способом объединения данных, а цель дальнейшей интерполяции – улучшение временного разрешения, т.е. построение карт водяного пара для «промежуточных» моментов времени: $F_{D+\frac{1}{2}}, F_{D+\frac{1}{4}}$ и т.д. Аналог такой интерполяции в системах обработки видео – изменение кадровой частоты видеопотока (например, с 16 до 25 кадров в секунду). Такой подход оказался технически реализуем и был применен в настоящей работе. Его существенным недостатком, как отмечалось выше, является разрывность временной развертки данных. В работе рассмотрен прием, позволяющий частично компенсировать этот эффект – «локальная подстройка времени».

Идея временной интерполяции основана на предположении, что на последовательных кадрах видеопотока зафиксированы стадии развития некоторого непрерывного процесса. В этом случае для любой пары последовательных кадров F_D, F_{D+1} можно вычислить векторное поле трансформаций (ВПТ) $V_D = P_v(F_D, F_{D+1})$, переводящих кадр F_D в кадр F_{D+1} . Кинематический смысл V_D – совокупность произошедших за 1 сутки смещений всех элементов, присутствующих на F_D и F_{D+1} .

Фильтр P_v , имеющийся в наборе библиотек Stream Handler, реализует известную (Батолин и др, 2003), широко применяемую (например, в алгоритме сжатия видео MPEG-4) процедуру расчета ВПТ. Обратное преобразование переводит кадр F_D в следующий кадр F_{D+1} по заданному ВПТ: $F_{D+1} = P_{tr}(F_D, V_D)$. Зная ВПТ, легко рассчитать в линейном приближении стадии трансформации кадра в промежуточные моменты времени $D + \frac{m}{n}$, умножая V_D на соответствующий дробный множитель:

$$F_{D+\frac{m}{n}} = P_{tr}(F_D, \frac{m}{n} V_D), m, n = 1, 2, 3, \dots, m < n \quad (2)$$

Данный подход действительно позволяет провести формальную временную интерполяцию карт водяного пара, но не решает двух серьезных проблем. Первая проблема – разрывность временной развертки данных. Как отмечалось выше, композитные кадры распадаются на области, соответствующие измерениям разных спутников в разные моменты времени. Рассмотрим примененный в работе прием «локальной подстройки времени» для компенсации разрыва временной развертки на простом примере. Итак, пусть на кадре F_D имеется «смещенная по времени» область (далее – область M_D), которую можно описать геометрически кадром-маской M_D , равным по размеру F_D и содержащим значения логической единицы в точках, соответствующих «смещенной» области, и логического нуля – в остальных точках. Поскольку пространственные лакуны мало сдвигаются за сутки и заполняются данными по единому правилу, область M_D на следующем кадре F_{D+1} имеет примерно то же смещение по времени (по отношению ко всему кадру F_{D+1}). Значит, то же смещение по времени для области M_D сохраняется и на интерполированных кадрах (2), а, следовательно, на одном из таких «промежуточных» кадров зафиксировано состояние области M_D , наиболее близкое по времени к остальной части кадра F_D .

В настоящей работе для каждой пары кадров F_D и F_{D+1} строили интерполированные кадры $F_{D+\frac{1}{8}}, F_{D+\frac{2}{8}}, \dots, F_{D+\frac{7}{8}}$ с шагом по времени 1/8 суток, т.е. 3 часа. С помощью фильтров логического умножения P_{and} , логического сложения P_{or} , инверсии P_{inv} и маски M_D объединяли на «скорректированном» кадре F_D^{+n} данные кадра F_D , лежащие вне области M_D , с данными кадра $F_{D+\frac{n}{8}}$, лежащими в области (см. рис. 2):

$$F_D^{+n} = P_{or} \left[P_{and}(F_{D+\frac{n}{8}}, M_D), P_{and}(F_D, P_{inv}(M_D)) \right] \quad (3)$$

Выбор оптимального n осуществлялся визуально по критерию наибольшей гладкости полученных кадров. Описанный прием был обобщен на случаи «поиска назад» ($n < 0$ для $D \geq 1$), наличия нескольких областей «смещения по времени» и для коррекции интерполированных кадров. Однако, в силу ряда причин он не решает в полной мере проблему разрывов временной развертки и использован в данной работе в целях более наглядной иллюстрации потенциальных возможностей интерполяционного подхода. Пути дальнейшего

го развития подхода, в том числе введение нелинейности, отсутствующей в классическом алгоритме, указаны в следующем разделе.

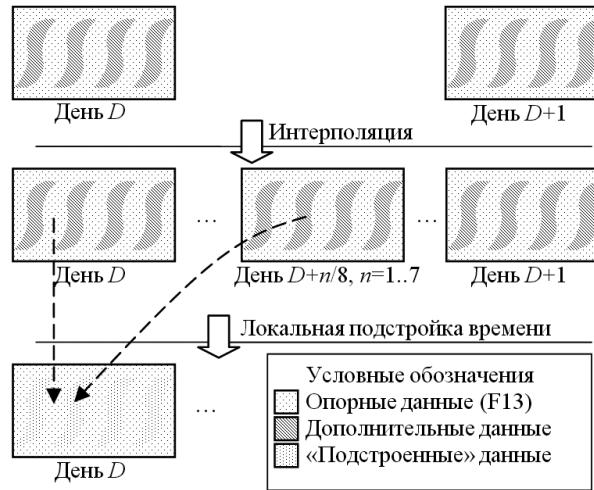


Рис. 2. Стадии алгоритма интерполяции и локальной подстройки времени для композитных карт водяного пара

Обсуждение результатов

Пример временной интерполяции карт водяного пара с шагом 6 часов с «локальной подстройкой времени» с точностью порядка 1.5 часов представлен на рис. 3. Исходная интерполяция была выполнена с шагом 3 часа, затем отобраны кадры, соответствующие моментам наблюдения ТЦ «Катрина». В правом верхнем углу каждого кадра дана метка времени. Положения активных ТЦ и ТВ по данным «Глобал-ТЦ» отмечены квадратами и подписаны (при наличии) именами циклонов. На некоторых кадрах заметны проявления не полностью устраниенных лакун (тонкие темные полосы), оставшихся потому, что в приведенном примере использованы только данные восходящих витков F13, F14 и F15.

В целом результаты интерполяции обнаруживают удовлетворительное соответствие между реальными положениями ТЦ и ТВ и локальными пиками концентраций водяного пара, хотя при анализе длинных рядов данных выявляются случаи их относительного «запаздывания» или «опережения». Основная причина этого – существенно нелинейное движение реального ТЦ. Очевидно, что для улучшения результатов алгоритма интерполяции в него должна быть включена нелинейность. Действительно, в линейном приближении, фактически, полагается, что векторное поле трансформаций V_D «заморожено» все время между последовательными кадрами F_D и F_{D+1} , см. (2), а затем переходит «скакком» в следующее состояние V_{D+1} . Физически более оправдано предположение, что преобразование ВПТ происходит плавно и в первом приближении описывается выражением:

$$V_{D+\frac{m}{n}} = V_D \cdot \frac{n-m}{n} + V_{D+1} \cdot \frac{m}{n}, \quad (4)$$

где m, n – натуральные числа, $m < n$. Выражение (4) фактически задает зависимость ВПТ от времени и тем самым вносит нелинейность в интерполяционный алгоритм (2,3).

Другой проблемой остаются артефакты «разрыва временной развертки», также заметные на рис. 3. В силу ряда причин прием «локальной подстройки времени» (3) не может

полностью решить эту проблему. Необходимо рассмотреть перспективу использования дистанционных данных в формате SWATH (данные на исходной сетке сканов прибора), обеспечивающем точное значение времени наблюдений для каждой точки измерений при более высоком пространственном разрешении. Основная трудность в этом случае – адаптация алгоритмов обработки к работе с данными на нерегулярной сетке.

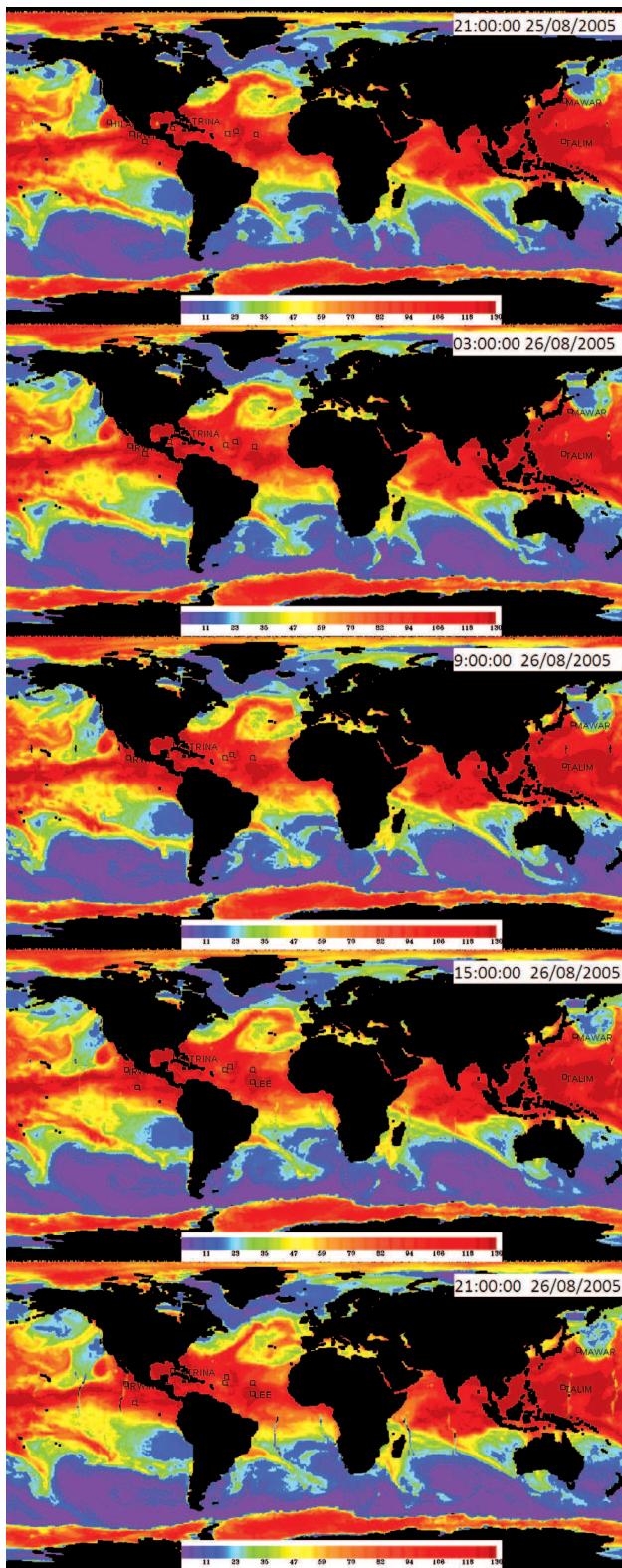


Рис. 3. Глобальные изображения интегрального водяного пара по данным радиотеплового комплекса SSM/I, спутник F13 миссии DMSP (при суточном накоплении): а) 25.08.2005; б) 26.08.2005

Заключение

В работе рассмотрен развивающийся авторами подход пространственно-временной интерполяции дистанционных данных, направленный на преодоление двух их ограничительных особенностей: низкого временного разрешения и широких пространственных лакун. Подход основан на интерпретации дистанционных данных как видеопотока со сложной временной разверткой. Анализ с привлечением независимых данных «Глобал-ТЦ» показал принципиальную удовлетворительность развивающегося подхода в линейном приближении, однако отмечено, что введение нелинейности должно улучшить результаты интерполяции.

Данные SSM/I были предоставлены Центром по исследованию глобальных гидрологических ресурсов США (GHRC, <http://ghrc.nsstc.nasa.gov/>). Авторы благодарят разработчика программной платформы Stream Handler компанию “File X Ltd” (Израиль) за плодотворное сотрудничество. Работа частично поддержана грантом РФФИ № 09-05-01019-а.

Литература

1. Ватолин Д., Ратушняк А., Смирнов М., Юкин В. Методы сжатия данных. Устройство архиваторов, сжатие изображений и видео. // М.: Диалог-МИФИ, 2003. 384 с.
2. Покровская И.В., Шарков Е.А. Тропические циклоны и тропические возмущения Мирового океана: хронология и эволюция. Версия 3.1 (1983–2005). // М.: Полиграф сервис, 2006. 728 с.
3. Ruprecht E. Atmospheric water vapour and cloud water: an overview // Adv. Space Res., 1996. V. 18. N. 7. P. 5–16.

Spatio-temporal interpolation of satellite radiometric data for the study of tropical cyclogenesis

D.M. Ermakov^{1,2}, A.P. Chernushich¹, E.A. Sharkov², Ya.N. Shramkov²

¹Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino department,
141190 Fryazino, Moscow region, 1 Vvedenskogo sq.,
E-mail: dima@ire.rssi.ru; andrey@ire216.msk.su;

²Space Research Institute of RAS
117997 Moscow, 84/32 Profsoyuznaya Str.
E-mail: e.sharkov@mail.ru; cinlun23@gmail.com

Study of global tropical cyclogenesis requires regular global-scale microwave measurements of the ocean with temporal resolution of 6 hours or better. Unfortunately, satellite instruments on existing constellations can not provide uniform remote data with such characteristics. To overcome this shortage a new method of interpolation of remote data is introduced. In first, linear approximation a known formal approach to spatiotemporal interpolation of sequence of images is applied, which describes “kinematics” of the process observed regardless to its physical nature. With the use of multi-channel remote data of SSM/I instrument the applicability of this linear approach to the task of tracing of brightness contrasts formed by developing tropical cyclones was investigated. Interpolation quality was controlled with the use of information extracted from the “Global-TC” database, developed and being supported at IKI RAS. Data processing and joint analysis was performed by means of the “Stream Handler” software platform of the “File X Ltd” company, Israel. The ways of further development of the approach are discussed.

Keywords: global tropical cyclogenesis, remote data interpolation.