

Компенсация влияния аппаратной функции радиометра AMSR-E на точность расчета ТПО

А.И. Алексанин, В.Ким

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
690041 Владивосток, Радио 5
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru*

Низкое пространственное разрешение каналов радиометра AMSR-E, использующихся для построения ТПО, в сочетании с относительно небольшим по пространству шагом генерации отсчетов, приводящих к значительным перекрытиям элементов разрешения, является основанием для рассмотрения возможности повышения точности карт ТПО посредством решения задачи восстановления (деконволюции). Для компенсации влияния аппаратной функции использовался винеровский фильтр. В качестве тестового для экспериментов был выбран район банки Кашеварова, характеризующийся большими перепадами температур. Анализировались два источника ошибок – шумы радиометра и «размывание» фронтов, обусловленное низким пространственным разрешением отсчетов радиометра. Задача восстановления решалась только для фронтальных зон. Для выделения фронтальных зон после предварительной фильтрации использовался детектор границ Канни. В качестве эталона для сравнения использовались карты ТПО, полученные по данным ИК радиометра MODIS. Показано, что ошибки при расчете ТПО в зонах высоких градиентов температуры достигают на банке Кашеварова 3°K и носят систематический характер. Решение задачи восстановления позволяет существенно уменьшить такие ошибки.

Ключевые слова: температура поверхности океана, радиометр AMSR-E, повышение точности ТПО, задача восстановления, фильтр Винера.

Введение

Данные микроволнового радиометра AMSR-E/AQUA представляют большой интерес с точки зрения построения карт температуры поверхности океана (ТПО), ввиду высокой прозрачности облачности для микроволнового излучения по сравнению с ИК излучением. Недостатком микроволновых данных является невысокое пространственное разрешение (43.2X75.4 км для ключевого канала 6.9 ГГц), что снижает точность карт ТПО, особенно вблизи фронтов. Соседние элементы разрешения как вдоль направления сканирования, так и вдоль направления полета имеют существенное перекрытие – 82.6 и 86.6 % соответственно, что обусловлено относительно небольшим по пространству шагом генерации измерений радиометром (около 10 км). Эта избыточность является основанием для рассмотрения возможности повышения точности карт ТПО, полученных на основе данных AMSR-E, посредством решения задачи восстановления (деконволюции).

Можно выделить несколько подходов к улучшению изображений, полученных радиометром AMSR-E. В работах (Long and Daum, 1998), (Gunn and Long, 2008) развивается подход к решению этой задачи на основе итерационных алгебраических процедур подбора весовых коэффициентов для пересчета измеренных яркостей в исходные (десятикилометрового пространственного разрешения). В работе (Williams and Long, 2011) рассматривается задача улучшения пространственного разрешения. Задачи решаются на основе обработки временного ряда изображений. Подход демонстрирует хорошие результаты на стационарных объектах – не меняющих существенно положение и яркостные характеристики во времени. Подход чувствителен к шумам и требует высокой подпиксельной точности географической привязки изображений. Изменчивость во времени термических структур воды делает применение такого подхода проблематичным, что косвенно подтверждается отсутствием соответствующих примеров. Кроме того, подход применяется в основном для уточнения границ объекта, а не для восстановления точных значений яркости. Большой размер элемента разрешения радиометра усредняет яркостные характеристики, «срезая» экстремальные значения.

И данные значения уже невозможно восстановить только на основе подбора весовых коэффициентов. Решение проблемы деконволюции на основе одиночных изображений оптимизационными методами требует аккуратного расчета аппаратной функции датчика и перехода от 10 километрового пространственного разрешения к более грубому для уменьшения влияния шумов на точность расчетов. Так, в работе (Limaue et al., 2006) используется сетка с шагом в 25 км, что позволяет получить переопределенную систему уравнений при решении задачи деконволюции. Метод также чувствителен к шумам. Оценка точности его применения демонстрируется только на искусственно созданных (синтетических) изображениях суши. К улучшению карт ТПО он также не применялся. Еще одним подходом к улучшению пространственного разрешения является подход, основанный на использовании мультиспектральных характеристик изображений (Santi et al., 2008) – перенос структуры изображения с каналов высокого пространственного разрешения на каналы низкого разрешения. В данном случае возможно использование структуры изображения канала 89 ГГц (пространственное разрешение около 6 км) для улучшения пространственного разрешения канала 6.9 ГГц. Однако рисунок изображений высокочастотных каналов формирует не только, а часто и не столько структура ТПО, но и структура облачности и приводного ветра. Это делает мало-перспективным такой подход.

Оценки ТПО, полученные по микроволновым данным, обычно используются без процедур улучшения изображения, а для подавления шумов применяются процедуры сглаживания. В результате возможно значительное искажение температуры поверхности океана в районах с большими температурными градиентами. Оценке величины таких искажений и выработке подхода к их коррекции на основе алгоритмов обработки изображений посвящена данная работа.

Применяемая методика

Для повышения точности расчета ТПО методами обработки изображений приходится одновременно решать две противоречащие друг другу задачи. Уменьшение ошибок вблизи температурных фронтов предполагает применение методов выделения фронтов и обострения температурных градиентов. При этом применяемые методы не должны приводить к появлению систематических ошибок (изменению среднего) при пересчете температурного поля. Наличие значительных шумов радиометра предполагает применение противоположных по назначению процедур – процедур сглаживания.

Обозначим как T_O^B радиационную яркостную температуру излучения поверхности океана, а соответствующую яркостную температуру, измеренную радиометром, как T_B и аппаратную функцию радиометра как h . Тогда процесс измерения можно записать следующим образом:

$$T_B = h \otimes T_O^B + n \quad (1)$$

где n - шум и \otimes - операция свертки. Яркостную температуру поверхности океана T_O^B получают из T_B в результате обратного преобразования. Очевидно, что аппаратная функция будет искажать оценку яркостной температуры, что несущественно для однородных участков и более существенно для фронтальных зон. Уменьшение влияния аппаратной функции эквивалентно получению оценки \hat{T}_B^0 :

$$\hat{T}_B^0 = F(T_B, h) \quad (2)$$

Фактически (1) и (2) являются формулировкой задачи восстановления. Для конструирования восстанавливающего фильтра нужно знать аппаратную функцию. При отсутствии

информации об аппаратной функции для получения восстанавливающего фильтра нужно кроме T_B знать и T_B^0 . В нашем случае вместо T_B^0 мы будем брать карту ТПО, полученную по данным ИК-радиометра MODIS в то же самое время, что и изображение AMSR-E, и усредненную до требуемого 10-километрового разрешения. Соответственно нужно будет преобразовать яркостную температуру T_B в ТПО. Поскольку расчет ТПО – это в общем случае многошаговая нелинейная процедура преобразования радиационной яркости, то упомянутые ранее задачи целесообразно решать до ее проведения. Для имеющихся в свободном доступе полей ТПО, рассчитанных по данным AMSR-E, приведены лишь общие схемы алгоритмов (Shibata, 2004; Wentz and Meissner, 2007; Gentemann et al., 2010) без опубликования детальных формул. Поэтому для расчета ТПО будем применять единственный опубликованный алгоритм, доступный для воспроизведения и прошедший полномасштабную верификацию (Митник, 2005). Поскольку алгоритм был опубликован давно (известно, что характеристики сенсоров AMSR-E нестабильны) и использовал собственную линейную процедуру калибровки данных AMSR-E для получения радиационных температур, то рассчитанная алгоритмом температура также линейно корректировалась посредством регрессионной подгонки под поля температур поверхности океана, рассчитанных алгоритмом Шибаты (Shibata, 2004) и полученных нами от Японского метеорологического агентства. Для этого использовались 10 фрагментов изображений, взятых в различные сезоны и покрывающие весь диапазон значений температуры морской поверхности. Сравнение температур, рассчитанных двумя этими алгоритмами, показывало высокие значения корреляций и близкие по величине температуры.

Существующие методы построения восстанавливающих фильтров можно разделить на параметрические и непараметрические. Непараметрические методы привлекают отсутствием необходимости делать предположения о виде аппаратной функции. К ним относятся многочисленные работы по «слепой» обратной свертке, обзор которых можно найти, например, в (Kundur and Hatzinakos, 1996). Нами была предпринята попытка использования «слепой» версии алгоритма Ричардсона-Люси (Fish et al., 1995). Эксперименты показали, что алгоритм хорошо работает при небольших уровнях шума, добавленного к изображениям, полученным по данным ИК радиометра MODIS. В этих экспериментах в качестве T_B брались эти сгенерированные изображения, сглаженные фильтром с известным импульсным откликом. Однако для реальных изображений, полученных сенсорами AMSR-E, результаты оказались неудовлетворительными. Эти результаты можно объяснить довольно высоким уровнем шума реальных изображений и чувствительностью к шуму «слепой» версии алгоритма Ричардсона-Люси.

Классическим для задачи восстановления является винеровский фильтр:

$$G(f) = \frac{H^*(f)}{|H(f)|^2 + N(f)/S(f)}, \quad (3)$$

где $H(f)$ - частотная характеристика измерителя (Фурье преобразование аппаратной функции), $N(f)$ - спектр мощности шума, $S(f)$ - спектр мощности исходного сигнала. В задачах дистанционного зондирования достаточно хорошим является приближение аппаратной функции гауссовской (см., например, (Bensebaa, 2005; Limaye et al., 2006)). С учетом этого восстанавливающий фильтр будем искать на основе выражения:

$$\hat{g} = \arg \min_{(\sigma_1, \sigma_2, b)} ((g \otimes T_B - T_B^0)^2), \quad (4)$$

где σ_1, σ_2 - параметры двумерной гауссовской функции, а b - отношение шум/сигнал из (3).

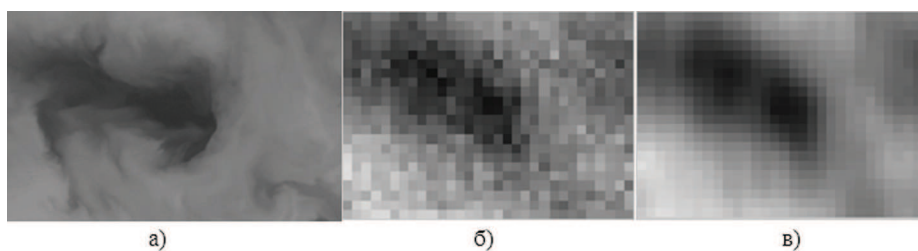


Рис. 1. ИК-изображение (радиометр MODIS) банки Кашеварова за 31.08.2009 (а); соответствующие радиационные температуры банки (радиометр AMSR-E, канал 6.9 ГГц) (б); конечный результат обработки микроволнового изображения (в)

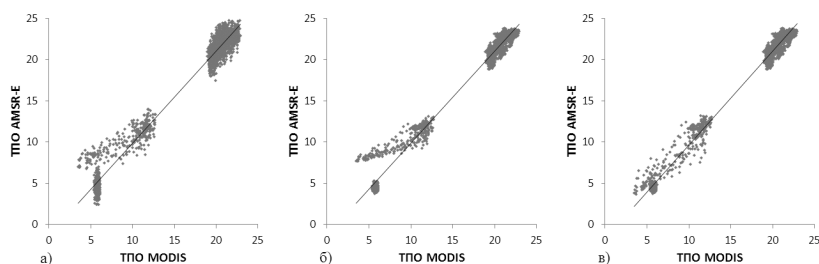


Рис. 2. Сопоставление температур, полученных радиометрами MODIS и AMSR-E: а – исходные температуры AMSR-E; б – температуры AMSR-E после применения фильтра (4); в – после фильтра (5)

Результаты экспериментов

Для экспериментов по решению задачи восстановления в качестве тестового был выбран район банки Кашеварова ($54.93-56.22^\circ$ с.ш., $143.15-146.91^\circ$ в.д.) за 31.08.2009, характеризующийся большими перепадами температур (рис.1а). Для иллюстративных целей были выбраны еще два участка – за 08.06.2008 ($47.41-49.30^\circ$ с.ш., $165.95-168.96$ в.д.) и за 09.05.2009 ($26.96-30.93^\circ$ с.ш., $132.66-136.92^\circ$ в.д.), сравнительно однородных по температуре, с холодной и теплой водой соответственно. На рис.2а представлен график соответствия ТПО этих трех участков, построенной по данным радиометров MODIS и AMSR-E. Визуально участки хорошо разделяются и помечены цифрами, 1- банка Кашеварова, 2- «холодный» участок, 3- «теплый» участок. Участок 1 содержит 298 пикселей (после отбраковки пикселей с частичной облачностью), участок 2 – 556 пикселей, участок 3 – 1677 пикселей. Пиксели с частичной облачностью определялись по карте ТПО Японского метеорологического агентства (алгоритм Шибаты). Участки 2 и 3 относительно компактные, т.е. характеризуются небольшим разбросом температур, участок 1 сильно вытянут и холодная его часть смещена в сторону высоких температур, что является проявлением искажающего влияния аппаратной функции, приводящего к значительному увеличению температуры, так как площадь холодных апвеллинговых зон сопоставима с пространственным разрешением AMSR-E. Характерная величина завышения температуры для холодных вод достигает величины не менее 3°K . Примерно эта же величина достигается и при использовании ТПО, рассчитанного алгоритмом Шибаты. Результат применения фильтра (4) при расчете ТПО по AMSR-E можно видеть на рис.2б. Все участки стали компактнее, т.е. шум уменьшился, однако смещение холодной части участка 1 в сторону высоких температур практически не изменилось. Это можно объяснить следующим образом. Все восстанавливающие фильтры для уменьшения ошибки восстановления пытаются найти баланс между увеличением локальных контрастов (применительно к изображениям) и уменьшением (или минимальным увеличением) шума. В нашем случае шум настолько высок, что восстанавливающий фильтр, оптимально настроенный по произвольно

выбранным участкам изображений, превращается практически в сглаживающий. Поэтому в качестве сглаживающего фильтра естественно использовать фильтр (4), который все же не столь сильно сглаживает контрасты, как простые процедуры осреднения. Собственно восстанавливающий фильтр будем искать по аналогии с (4), применяя двойную свертку:

$$g_0 = \arg \min_b ((g(b) \otimes (\hat{g} \otimes T_B) - T_B^0)^2) \quad (5)$$

Для минимизации суммарной ошибки предлагается ограничить применение (5) фронтальными зонами. Для выделения фронтальных зон после применения (4) использовался детектор границ Канни (Canny, 1986), а затем полученная граница расширялась морфологическими фильтрами в соответствии с размером элемента разрешения AMSR-E. Для того чтобы избежать возникновения ложных контрастов, границы полученных фронтальных зон «размывались», то есть в местах «размытия» яркостная температура определялась как взвешенная сумма температур перекрывающихся участков изображения, обработанного фильтром (4), и изображения фронтальной зоны, обработанного фильтром (5). Рис. 2в иллюстрирует применение (5). Видно, что систематическое смещение холодной части участка 1 почти исчезло, и участок 2 практически слился с холодной частью участка 1. В то же время, как и предполагалось, увеличился разброс значений на участке 1 (возросли шумы). На рис. 1б и рис. 1в представлены ТПО участка 1 до и после фильтрации (5) соответственно. Стандартные отклонения для участка 1 относительно ТПО/MODIS до и после фильтрации (4) и (5) составили 1.82 и 1.04°. Сравнение абсолютных значений температур двух радиометров для оценки качества предлагаемого подхода не совсем корректно. ИК- и микроволновые измерения подвержены влиянию атмосферы и подстилающей поверхности. Эти влияния различны, что приводит к систематическим ошибкам при расчете ТПО. В первом приближении такие искажения влияют в основном на величину средней температуры для небольших по площади участков, которые участвовали в экспериментах, так как на таких масштабах атмосферу можно рассматривать как однородную. Для исключения такого влияния были выровнены средние температуры на банке Кашеварова. После выравнивания средних значений ТПО, рассчитанных по данным MODIS и AMSR-E, стандартные отклонения составили 0.97 и 0.31°. Понижение стандартного отклонения более чем в 3 раза говорит о высокой эффективности фильтра, улучшившего рельеф ТПО.

Заключение

Проведенные эксперименты показывают, что для улучшения качества карт ТПО, строящихся по данным радиометра AMSR-E, помимо процедуры сглаживания необходимо применять процедуры улучшения изображения на основе решения задачи восстановления. На примере банки Кашеварова показано, что игнорирование последней процедуры приводит к появлению значительных ошибок в расчете ТПО в зонах высоких градиентов температуры, достигавших на банке Кашеварова 3°K.

Несмотря на то, что восстанавливающий фильтр был настроен на одиночном изображении, его применение на других изображениях с высокими температурными градиентами давало устойчивый положительный результат. Естественно предполагать, что оптимальность настройки восстанавливающего фильтра будет зависеть не только от величины контрастов температурной яркости изображения, но и от конфигурации этих контрастов. Поэтому решение данной задачи, а также задачи оптимального выделения границ и размеров фронтальных зон, требуют дополнительных исследований.

Работа поддержана грантами РФФИ № 11-01-12107-офи-м, 11-01-00590-а, 11-01-00593-а и грантами ДВО РАН.

Литература

1. Митник М.Л., Митник Л.М. Калибровка и валидация данных микроволнового радиометра AMSR-E спутника AQUA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т.1. С.244-249.
2. Bensebaa K., Banon G., Fonseca L. On-orbit spatial resolution estimation of CBERS-1 CCD camera // Third International Conference on Image and Graphics. Hong Kong. 2004. P.576-579.
3. Canny J. A Computational Approach To Edge Detection // IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1986. V.8. No 6. P.679–698.
4. Fish D.A. et.al. Blind deconvolution by means of the Richardson–Lucy algorithm // J.Opt.Soc.Am. 1995. V.12. №1. P. 58-65.
5. Gentemann C. L., Meissner T., Wentz F. J. Accuracy of Satellite Sea Surface Temperatures at 7 and 11 GHz // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2010. V.48. №3. P.1009-1018.
6. Gunn, B.A., Long D.G. Spatial Resolution Enhancement of AMSR Tb Images based on Measurement Local Time of Day // Proceedings of IGARSS. Boston. 2008. V.5. P.33-36.
7. Kundur D., Hatzinakos D. Blind image deconvolution // IEEE Signal Processing Magazine. 1996. V.13. №3. P.43–64.
8. Limaye A.S., Crosson W.L., Lyamon C.A. Estimating accuracy in optimal deconvolution of synthetic AMSR-E observation // Remote Sensing of Environment. 2006. V.100. P.133-142.
9. Long D. G., Daum D. L. Spatial Resolution Enhancement of SSM/I Data // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1998. V. 35. №2. P.407-417.
10. Santi E., Brogioni M., Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P., Pettinato, S. A simple technique to improve the AMSR-E spatial resolution at C-band // Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment. MICRORAD 2008. 2008. P.1-4.
11. Shibata A.A. AMSR/AMSR-E SST algorithm developments: removal of ocean wind effect // Italian J. Rem. Sens. 2004. V.30/31. P.131–142.
12. Wentz F.J., Meissner T. Supplement 1. Algorithm theoretical basis document for AMSR-E ocean algorithms // RSS Tech. Rep. 051707. May 17, 2007. P.1–6.
13. Williams B.A., Long D.G. Reconstruction From Aperture-Filtered Samples With Application to Scatterometer Image Reconstruction // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. №5. P.1663-1676.

Improvement of AMSR-E SST by deconvolution

A.I. Alexanin, V. Kim

*Institute for Automation and Control Processes FEB RAS,
690041 Vladivostok, 5 Radio str.
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru*

The substantial overlapping of adjacent AMSR-E footprints and low resolution of AMSR-E sensors make it possible to improve AMSR-E SST accuracy by deconvolution. The Wiener filter is suggested to compensate the influence of AMSR-E point spread function. Kashevarov's bank has been used as a test region. The noise and blurring have been considered as main sources of errors. As a standard we use SST based on IR MODIS data. It was shown that near Kashevarov's bank AMSR-E SST is higher than MODIS SST up to 3°K. Deconvolution of AMSR-E data can significantly reduce this kind of errors.

Keywords: sea surface temperature, AMSR-E sensor, improvement of SST accuracy, restoration problem, Wiener filter.