

Многоканальный сингулярный спектральный анализ данных по гравитационному полю Земли со спутников GRACE.

Аннотация

Спутники-близнецы GRACE с 2002 г. обеспечивают исследователей ежемесячными данными по глобальному гравитационному полю Земли, отражающими перераспределение масс в оболочках планеты. Однако эти данные нуждаются в фильтрации и удалении так называемых полос (stripes), обусловленных несовершенствами модели и погрешностями обратного решения. Мы применили метод многоканального сингулярного спектрального анализа (МССА) к ежемесячным данным GRACE как в спектральной, так и в пространственной областях. Метод позволил отфильтровать шумы и разделить главные компоненты, содержащие периодические и вековые члены, связанные сезонным перераспределением водных масс, таянием ледников, изостатическим послеледниковым поднятием. Гибкость метода делает его перспективным для обработки данных GRACE и других спутниковых наблюдений.

Введение

Спутники-близнецы GRACE (Эксперимент по исследованию гравитационного поля и климата), разработанные NASA/DLR были запущены с космодрома Плесецк 17.03.2002. Спутники следуют один за другим на расстоянии ~220 км по околополярной орбите на высоте ~500 км. Основными измеряемыми величинами являются расстояние между спутниками и его изменения под влиянием ускорений, обусловленных пролетами над притягивающими массами и другими причинами. Измеренные величины формируют данные первого уровня (Level 1). Их обработка включает определение орбит с использованием бортовых GPS, моделирование негравитационных эффектов с использованием измерений акселерометров, коррекцию за морские и земные приливы, за отклик океана и суши на изменения атмосферного давления и др. Результаты обработки формируют данные второго уровня (Level 2), представляющие собой ежемесячные наборы коэффициентов Стокса разложения внешнего гравитационного потенциала Земли вплоть до гармоник 60 (120) степени [2]. Представленная работа посвящена разработке альтернативного метода удаления так называемых полос (stripes) или высокочастотных географически-коррелированных шумов, хорошо заметных на ежемесячных картах гравитационных аномалий GRACE, а также выделению главных компонент (ГК) из данных второго уровня.

Исходные данные и методика обработки.

Постоянную составляющую гравитационного поля Земли можно получить из моделей GGM01C, GGM02C, EGM2008 (вплоть до степени 2160),

построенных по данным спутников CHAMP, GRACE, альтиметрии, наземной и морской гравиметрии. Переменная часть получается вычитанием постоянной составляющей (использовалась модель GGM01C) из ежемесячных данных GRACE, вычисленных в одном из центров обработки данных (использовались данные CSR RL04 Level 2). Данные представлены в виде набора коэффициентов Стокса C_{nm}, S_{nm} разложения геопотенциала по шаровым функциям [2]

$$V(\varphi, \lambda, r) = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n (C_{nm} \cos m\lambda + S_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi), \quad (1)$$

где n – степень, m – порядок гармоники, $P_n^m(\sin \varphi)$ – нормализованная присоединённая функция Лежандра, a – средний экваториальный радиус Земли, аргументы φ, λ, r – широта, долгота, радиус соответственно. Мы использовали данные, полные до степени 60 включительно. Коэффициенты нулевой и первой степени равны нулю из-за выбора координатной системы, кроме того, GRACE не чувствителен к коэффициентам первой степени (геоцентру). Нами обрабатывались наблюдения с 8/2002 по 8/2009. В 2002-2003 проходила калибровка и настройка спутников, данные за этот период не так точны, как более поздние. Разность наблюдаемых коэффициентов и модели ($\Delta C_{nm}, \Delta S_{nm}$) переводится в величины эквивалентного уровня воды (ЭУВ) с использованием выражения

$$\Delta h(\varphi, \lambda, t) = \frac{a\rho_{ave}}{3\rho_w} \sum_{n=2}^{60} \sum_{m=0}^n \frac{2n+1}{1+k_n} W_n(\Delta C_{nm}(t) \cos m\lambda + \Delta S_{nm}(t) \sin m\lambda) P_n^m(\sin \varphi), \quad (2)$$

где ρ_{ave}, ρ_w – средние плотности земли и морской воды соответственно, k_n – нагрузочный коэффициент Лява n -й степени, W_n – коэффициент фильтрации. Поскольку нашей целью было осуществить фильтрацию методом МССА, мы использовали $W_n = 1$. Разными авторами для устранения полос и уменьшения шума в ежемесячных данных по гравитационному полю GRACE используются гауссовская фильтрация [4], фильтры Винера, регуляризирующие фильтры [5], фильтры, устраняющие полосы [8], коэффициенты которых зависят не только от степени, но и от порядка. МССА может также применяться совместно с различными видами фильтрации.

Метод МССА является обобщением метода сингулярного спектрального анализа (ССА) на многомерные временные ряды [6,9]. ССА, в свою очередь, берет начало в методе главных компонент (МГК), и выполняется в четыре этапа: формирование траекторной матрицы, SVD-разложение по сингулярным числам, группировка главных компонент и их восстановление посредством генкелизации. Алгоритм ССА детально описан в работах [1,3]. Главным параметром алгоритма является параметр задержки L , который определяет размерность пространства вложения временного ряда. После некоторых экспериментов мы выбрали $L = 18$, что дало сравнительно хорошие результаты по разделению компонент.

Полная траекторная матрица X , составленная из однотипных траекторных матриц-блоков для каждого канала – в нашем случае степени и порядка коэффициентов Стокса C_{ij} или S_{ij}

$$X = [X_{C_{2,0}}, X_{S_{2,0}}, \dots, X_{C_{ij}}, X_{S_{ij}}, \dots, X_{C_{60,60}}, X_{S_{60,60}}], \quad (3)$$

может быть использована для вычисления ковариационной матрицы $A = X^T X$ с задержкой L . Главные компоненты (ГК) получаются из решения задачи на собственные значения матрицы A . Их также можно получить напрямую, выполнив SVD-разложение матрицы $X = USV^T$. Квадраты сингулярных чисел s_i , стоящих по диагонали S , будут собственными значениями матрицы A , а левые собственные векторы v_i – столбцы V формируют эмпирические ортогональные функции (EOF). Тогда компонента i , соответствующая матрице $X^i = s_i u_i v_i^T$, образует главную компоненту (вообще говоря, несколько сингулярных чисел могут группироваться в одну ГК). На последнем этапе, генкелизации ГК в каждом канале восстанавливаются из соответствующих блоков матрицы, упорядоченных как в выражении (3).

Результаты обработки

Вначале метод МССА был применен в спектральной области к коэффициентам Стокса. После выделения, главные компоненты были преобразованы в пространственные карты величин ЭУВ (2). Основная энергия сигнала оказалась сосредоточена в первых трех главных компонентах.

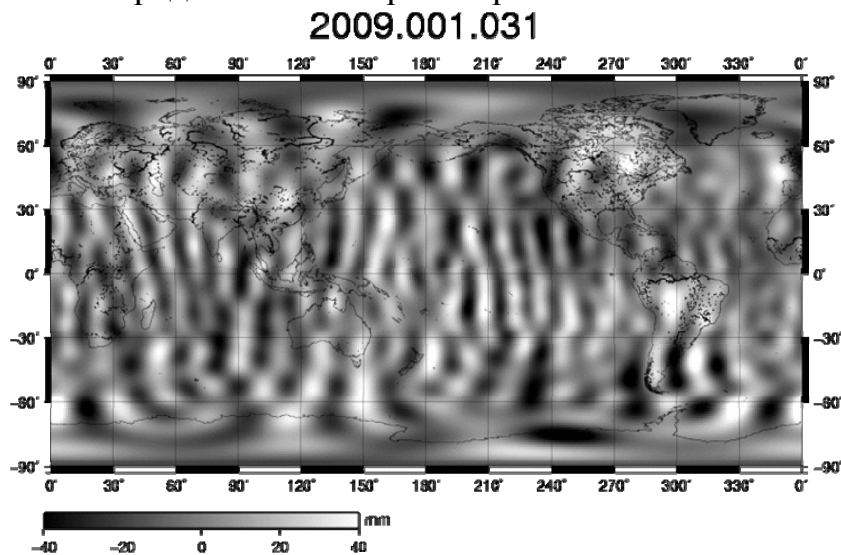


Рис. 1 Карта первой главной компоненты отклонений гравитационного поля от модели GGM01C, выраженная в ЭУВ, полученная методом МССА ($L=18$) в спектральной области. ГК 1 содержит основную энергию полос. Год, начальный и конечный дни эпохи наблюдений указаны в заголовке.

Первая ГК (рис. 1) оказалась практически неизменной по амплитуде, с сохраняющейся во времени геометрией. Она содержит большую часть энергии полос и, вероятно, некоторую постоянную компоненту полезного сигнала. Эта ГК может быть использована для удаления полос, но при ее вычитании некоторая постоянная часть сигнала также пропадет. Чтобы выделить полезную часть из ГК 1, необходима дополнительная информация.

Вторая ГК (рис. 2), полученная группировкой сигналов, соответствующих второму и третьему сингулярным числам, содержит гидрологический сигнал с годовой цикличностью и практически не содержит шумовых полос. В ней

отчетливо видны сезонные гидрологические изменения в бассейнах Амазонки, Конго, Инда, а так же на территории России, Канады, США, Китая и др.

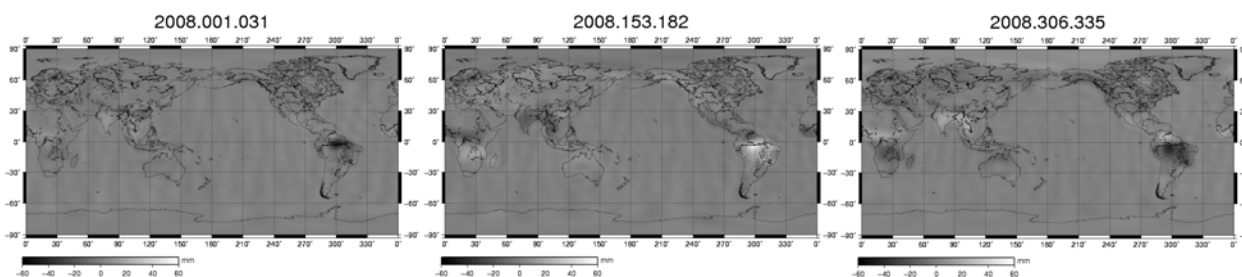


Рис 2. Вторая ГК, представляющая годовой гидрологический цикл.

Третья ГК содержит вековые изменения. Уменьшение силы тяжести отчетливо заметно на юго-западе Гренландии и в Западной Антарктиде к востоку от моря Росса, что обусловлено таянием льдов и послеледниковым изостатическим поднятием. Нашло отражение также таяние горных ледников на Аляске в Гималаях и др.,

ГК более высокого порядка содержат высокочастотные компоненты шумов, в том числе связанные с динамикой полюсов и транзитными событиями, такими как сброс напряжений при землетрясении на Суматре в декабре 2004 г.

На следующем этапе МССА был применен к ежемесячным картам ЭУВ градусного разрешения GRACE, вычисленным в соответствии с выражением (2). Выделенные в пространственной области главные компоненты оказались, с точностью до порядка следования сингулярных чисел, сходными с полученными в спектральной области. В них также нашли отражение и оказались отделены друг от друга постоянная составляющая сигнала и полюс, сигнал с годовой цикличностью, вековые изменения, высокочастотные компоненты.

При $L=1$ метод ССА переходит в МГК, который под названием EOF-анализа применялся к данным GRACE в работах [6,7]. Проведенное сравнение МССА ($L=18$) с МГК ($L=1$) показывает следующие преимущества МССА: если в МССА первая ГК практически неизменна по амплитуде, то в МГК она периодически меняется, хотя в обоих случаях ГК 1 сохраняет пространственную структуру. Вторая ГК, отражающая годовую цикличность, в МГК иллюстрирует лишь амплитудные колебания ЭУВ в определенных районах, таких как бассейны Амазонки и Конго, в то время как МССА-карты показывают сезонное пространственное перемещение этих изменяющихся участков (паттернов). Таким образом, результаты МССА лучше отражают поведение участков пространственно-временной корреляции и обладают лучшими показателями при фильтрации.

Анимации полученных ГК представлены на сайте: <http://Infml.sai.msu.ru/~tempus/GRACE/index.htm>.

Заключение

Несмотря на математическую сложность, МССА дает существенные преимущества при обработке данных по гравитационному полю со спутников

GRACE. Главные компоненты, полученные этим методом, содержат корреляции, появляющиеся одновременно в разных каналах. МССА позволяет выделить частотно-временные (в случае анализа матрицы коэффициентов Стокса в спектральной области) или пространственно-временные (в случае анализа цифровых карт аномалий в координатах широта-долгота) корреляции, присутствующие во всех координатных компонентах (каналах) сигнала.

Предварительные результаты показывают, что МССА позволил выделить физически значимые компоненты сигнала, разделять их, уменьшить влияние полос. Точная физическая интерпретация требует сравнения с гидрологическими моделями, моделями океанической циркуляции, послеледникового поднятия GIA и другими наблюдениями, такими как баланс таяния льда, что является темой будущих исследований.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Президента России МК-4234.2009.5. Данные GRACE предоставлены С.К.Shum. Вычисления выполнялись на суперкомпьютере «Чебышев» МГУ им. М.В. Ломоносова.

Список литературы

1. Голяндина Н.Э., Метод ``Гусеница-SSA``: прогноз временных рядов. СПб., ВВМ, 2004
2. Bettadpur S., Level-2 Gravity Field Product User Handbook, 2007, ftp://podaac.jpl.nasa.gov/pub/grace/doc/L2-UserHandbook_v2.3.pdf
3. Ghil M., R.M. Allen, M.D. Dettinger et al., Advanced spectral methods for climatic time series, *Rev. Geophys.* 40(1), 3.1-3.41, 2002.
4. Han Shin-Chan, Shum C.K., Jekeli Ch. et al. Non-isotropic filtering of GRACE temporal gravity for geophysical signal enhancement. *Geophys. J. Int.*, Vol. 163, Issue 1 2005, pp. 18–25
5. Kusche J., R. Schmidt, S. Petrovic, et al., Decorrelated GRACE time-variable gravity solutions by GFZ and their validation using a hydrological model. *J. of Geodesy*, N 83, 2009, pp. 903-913.
6. Rangelova E., Wal W., Braun A. et al., Analysis of GRACE time-variable mass redistribution signals over North America by means of principal components analysis. *J. of Geophys. Res.*, Vol. 112, 2007.
7. Schrama E., Wouters B., Lavallee D. Signal and noise in Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) observed surface mass variations. *J. of Geophys. Res.*, Vol. 112, 2007.
8. Swenson S., and J.Wahr, Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophys. Res. Letters*, 33, 2006.