

ПРИМЕНЕНИЕ ДИСКРЕТНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Н.Р. Зелинский¹, Н.Г. Клейменова¹, С.М. Агаян², Л.М. Лабунцова²

¹Институт физики Земли РАН (ИФЗ РАН), г. Москва, e-mail: hello_nikita@mail.ru

²Геофизический центр РАН (ГЦ РАН), г. Москва

Аннотация. Ввиду огромного объема хранящихся геомагнитных данных и тенденции к росту скорости увеличения этих данных, остро стоит задача их одновременной обработки. В этой работе представлено применение нескольких методов Дискретного Математического Анализа (ДМА) для исследования характеристик различных типов геомагнитных пульсаций. На первом этапе с помощью "гравитационного сглаживания" ликвидируются пропуски в данных, затем данные фильтруются фильтром Баттерворта 6-го порядка в выделенных частотных диапазонах, соответствующих различным типам пульсаций. В глобальном масштабе широт (от полярных до экваториальных) исследовались характеристики трех типов геомагнитных пульсаций: дневные длиннопериодные пульсации Pc5 ($f=2-5$ мГц), ночные нерегулярные пульсации Pi2 ($f=8-20$ мГц), и дневные короткопериодные пульсации Pc3 ($f=20-50$ мГц).

Затем вычислялись собственные значения матрицы ковариации компонент геомагнитных данных в скользящем окне. Для корреляции одновременных геомагнитных пульсаций на различных широтах вычислялась обобщенная дисперсия собственных значений матрицы ковариации.

Введение

Пульсации геомагнитного поля имеют большое значение для изучения процессов в магнитной оболочке Земли, как сейсмические волны для изучения строения земной коры. Возбуждение геомагнитных пульсаций сопровождается многие геофизические явления, такие, как магнитные бури и суббури, полярные сияния, взрывы, ураганы, землетрясения. В настоящее время на земной поверхности имеется более 300 станций, где производится цифровая регистрация переменного магнитного поля Земли с дискретизацией 1 мин, что позволяет исследовать геомагнитные пульсации с периодами несколько минут, т.е. типа Pc5 и Pi3 ($T \sim 150-600$ с, $f \sim 1.5-7.0$ мГц).

Быстрые вариации геомагнитного поля, т.е. геомагнитные пульсации, разделяются на два основных класса – устойчивые (pulsations continuous – Pc), наблюдающиеся днем, и импульсные, иррегулярные (pulsations irregular – Pi), наблюдающиеся ночью. Одной из первых работ в области изучения геомагнитных пульсаций явилась работа [В.А. Троицкая, 1953], заложившей основы этого направления исследований. Основные морфологические характеристики геомагнитных пульсаций были установлены в 60-70-х годах прошлого столетия на основании анализа аналоговой регистрации на бумажных самописцах [например, обзоры Троицкая и Гульельми, 1969; Пудовкин и др., 1976; Pilipenko, 1990; Клейменова, 2007]. Геомагнитные пульсации являются не только важной компонентой магнитного поля Земли, но и широко используются как для изучения физических процессов в плазменной оболочке Земли – магнитосфере, так и при проведении магнитотеллурических зондирований земной коры.

Для изучения геомагнитных пульсаций важно выделить те участки магнитограмм, на которых эти пульсации проявляются. Однако, в связи с тем, что объем доступных цифровых данных геомагнитных наблюдений ежегодно резко возрастает, на первом этапе изучения пульсаций встает задача "quick look" – выделения интересующих случаев (дат) на массиве данных.

Целью данной работы является разработка и опробование на различных типах геомагнитных пульсаций алгоритма, основанного на принципах ДМА – концепции анализа геофизической информации на базе нечеткой логики, созданного коллективом ученых ГЦ РАН под руководством академика А.Д. Гвишиани [Гвишиани и др. 2008, 2010], решающего эту задачу. Другими словами, алгоритм должен позволять выделить отдельные волновые пакеты пульсаций и при необходимости затем их кластеризовать.

Наблюдения

В этой работе более подробно рассмотрены два типа пульсаций:

- Pc5 ($f=2-5$ мГц). В анализе использованы 1-минутные данные базы спутниковой информации OMNI (B_x, B_y, B_z, V_x, P_d), данные скандинавского профиля станций IMAGE (станции HOR, LYR, SOR, BJJ, SOD, KEV,) с шагом дискретизации 10 с., 1-минутные данные среднеширотных и экваториальных станций (LVV, BOX и AAE, MBO, PHU, PPT соответственно) сети ИНТЕРМАГНЕТ. Для детального

анализа были выбраны два события (28 мая и 4 октября 2009) с наименьшими пропусками данных в спутниковой базе OMNI.

- РсЗ ($f=20-50$ МГц). В анализе использованы 1-секундные на геомагнитные данных за 5 апреля 2010 года, полученных на десяти обсерваториях французской сети BCMT (Bureau Central de Magnétisme Terrestre, <http://www.bcmf.fr/>): AAE, CLF, DMC, DRV, IPM, LZH, MBO, PAF, PHU, PPT. Указанные обсерватории также входят и в сеть ИНТЕРМАГНЕТ.

Анализ

При изучении геомагнитных пульсаций необходимо учитывать их различную природу и, как следствие, различие в физических характеристиках – частотных, поляризационных и амплитудных. Если учет частотных характеристик производится довольно просто – частотной фильтрацией, то учет амплитудных и поляризационных характеристик пульсаций, зарегистрированных на разнесенных по широте обсерваториях а также спутниках требует дополнительной работы со средствами визуализации для решения задачи "quick look" – предварительного выбора интересующих событий на массиве геомагнитных данных.

Для решения этой задачи предложен алгоритм, позволяющий выполнять обработку данных, нацеленную на выделение геомагнитных пульсаций на двух- и трехкомпонентных данных и их удобное представление. Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. *Ликвидация пропусков данных* (особенно актуально для спутниковых данных). Поскольку пропуски в данных затрудняют частотный анализ, а популярные инструменты интерполяции – линейная интерполяция и интерполяция кубическими сплайнами – создают искажения (частотные и амплитудные соответственно), для ликвидации пропусков данных был адаптирован алгоритм гравитационного сглаживания временных рядов [Гвишиани и др. 2011], которые не дает амплитудных и практически не дает частотных искажений.
2. *Частотная фильтрация данных* фильтром Баттерворта. Фильтр Баттерворта выбирался из соображений максимальной гладкости характеристики АЧХ (на этом этапе отсекались фильтр Чебышева и эллиптические фильтры, как обладающие пульсациями в переходной зоне), причем, в отличие от фильтра Бесселя, который обладает близким свойством – максимальной гладкости характеристики групповой задержки, это свойство сохраняется при дискретизации непрерывного фильтра методом билинейного преобразования. Также фильтр Баттерворта является минимально-фазовым [Parks and Burrus, 1987], что минимизирует задержку сигнала.
3. *Построение выпрямляющего функционала* [Агаян и др., 2005] "обобщенная дисперсия собственных значений матрицы ковариации" [Зелинский и др., 2014]. Функционал строится по двум или трем (а зависимости от надежности третьей компоненты) компонентам посредством вычисления колмогоровского среднего порядка p (свободный параметр алгоритма) собственных значений матрицы ковариации [Means, 1972], вычисленных в окне (ширина окна – другой свободный параметр алгоритма). В силу особенностей построения, функционал отражает изменения как относительной амплитуды, так и поляризационных характеристик сигнала. В качестве иллюстрации приведем сравнение со стандартным подходом к проблемам выделения сигналов, аналогичных пульсациям – использование огибающей узкополосного сигнала, вычисляемой с помощью преобразования Гильберта. Заметим, что выпрямление "обобщенная дисперсия" в отличие от построения огибающей преобразованием Гильберта имеет несколько свободных параметров, что делает алгоритм адаптивным, т.е. позволяет регулировать результаты в соответствии с пожеланиями эксперта. Кроме того, выпрямление "обобщенная дисперсия" строится сразу по нескольким компонентам, в то время как огибающая по одной. Пример сравнения выпрямления "обобщенная дисперсия" и огибающей Гильберта представлен на рис. 1.
Цель построения выпрямляющего функционала – сформировать такой временной ряд, который переводит выделенные интерпретатором аномалиями на записи в возвышенности на выпрямляющем функционале.
4. *Адаптивный выбор нужного уровня аномальности* с использованием инструмента нечетких граней [Каган и др. 2009, Зелинский и др. 2014].
5. *Кластеризация близко расположенных выделенных аномалий*. Используется нечеткое понятие близости, параметр близости определяется характерной длиной выделенных аномалий. Свободным параметром на этом этапе является коэффициент, на который умножается параметр близости.

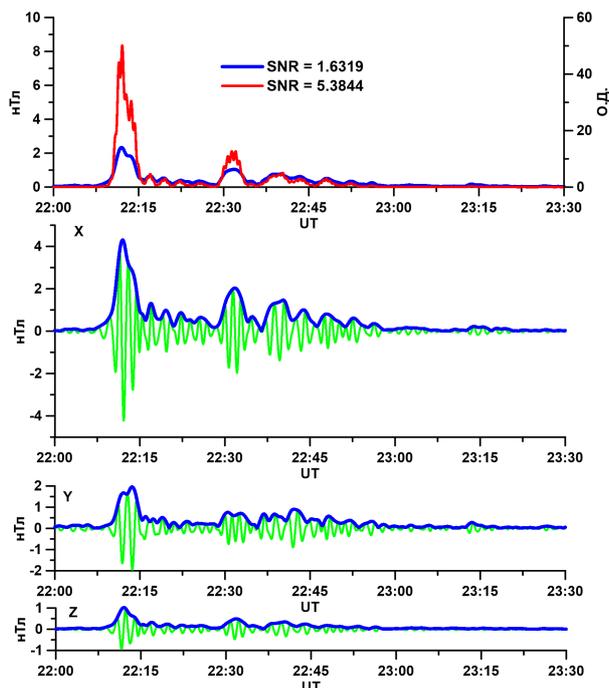


Рисунок 1. Сравнение выпрямления "обобщенная дисперсия собственных значений", рассчитанного по трем компонентам фильтрованного сигнала с геомагнитной обсерватории PAF (о. Кергелен) сети INTERMAGNET за 13.04.2010 с 22:00 по 23:30 UT (шаг дискретизации 1 с.) с огибающей, вычисленной преобразованием Гильберта. На трех нижних рисунках зеленым показаны X, Y, Z-компоненты фильтрованного сигнала, синим – огибающая Гильберта. На верхнем рисунке красным показано выпрямление "обобщенная дисперсия", рассчитанная по трем компонентам, синим – среднее арифметическое огибающих, приведенных ниже для компонент X, Y, Z. Всплескам пульсаций P12 (сигналу) соответствуют интервалы 22:10 – 22:15 и 22:29 – 22:34. Соотношение сигнал/шум для синей кривой 1.6319, для красной кривой 5.3844.

Пример результата работы алгоритма приведен на рис. 2.

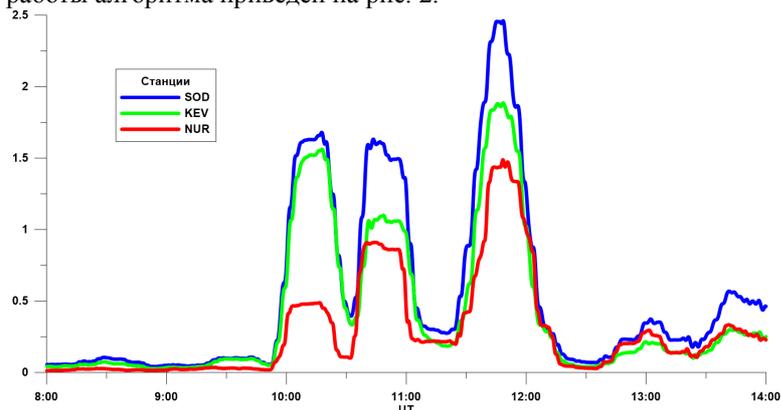


Рисунок 2. Примеры вычисления функционала "обобщенная дисперсия" после сглаживания по пяти точкам, для фрагментов магнитограмм с авроральных геомагнитных обсерваторий скандинавского профиля IMAGE с 10с разрешением во время события 04.10.2009. Четко выделяются три участка проявления пульсаций Pc5.

Результаты

- На основе математической теории ДМА разработан новый выпрямляющий функционал "Обобщенная дисперсия собственных значений матрицы ковариации", характеризующий интегральное временное приращение суммарной горизонтальной амплитуд колебаний относительно фоновых значений в данной точке в выбранный интервал времени. Функционал опробован при анализе пространственно-временных характеристик многокомпонентных записей геомагнитных пульсаций различных диапазонов частот. Показано, что отношение сигнал/шум в этом функционале более чем в 3 раза превышает соответствующее значение в случае преобразования Гильберта.
- С помощью выпрямления "обобщенная дисперсия" исследованы особенности широтного распределения дневных геомагнитных пульсаций Pc5 ($f=2-5$ мГц), вызванных флюктуациями в плотности солнечного ветра и в ММП. Показан нелинейный отклик генерации геомагнитных пульсаций на разных широтах. Сделан вывод, что в дневном секторе флюктуации в плотности солнечного ветра более геоэффективны в возбуждении Pc5 пульсаций, чем флюктуации в Vz ММП. Механизмы генерации пульсаций, наблюдаемых на разных широтах, по-видимому, различны.

- Построен алгоритм автоматического распознавания пульсаций Pc3 (20–50 мГц) для исследований в области гелиобиологии и магнитотеллурических задач. С использованием разработанных алгоритмов впервые выполнен анализ одновременных данных 1-секундных наблюдений геомагнитных пульсаций Pc3 на сети разнесенных по долготе приэкваториальных и низкоширотных обсерваторий ИНТЕРМАГНЕТ. Обнаружено, что в экваториальных широтах внезапное начало магнитной бури (SC) сопровождается всплеском геомагнитных пульсаций Pc3 с максимальной амплитудой в околорасположенном секторе, а начало магнитосферной суббури - в полуночном секторе, т.е. так же, как и для геомагнитных пульсаций Pi2.

Выводы

Полученные результаты позволяют сделать заключение о возможности использования методов ДМА в анализе как геомагнитных пульсаций, так и волновых аномалий в флюктуациях параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля без предварительного визуального отбора данных, что очень важно при исследовании большого массива геофизической информации.

Данная работа выполнена при поддержке Программы ОНЗ РАН №7 и частично гранта РФФИ 13-05-00233.

Список литературы

- Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Гвишиани А.Д., Граева Е.М., Диаман М., Злотники Ж., Родкин М.В. Исследование морфологии сигнала на основе алгоритмов нечеткой логики // Геофизические исследования. Сборник научных трудов. – М.: ИФЗ. – 2005. – С.143-155
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Определение аномалий на временных рядах методами нечеткого распознавания // ДАН. Т. 421. № 1. С. 101-105. 2008.
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. - 2010. - № 2. – Вып. № 16. - С. 109–125
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Каган А.И. Гравитационное сглаживание временных рядов // Труды Института математики и механики УрО РАН. - 2011. - Т.17. - № 2. - С.62-70
- Зелинский Н.Р., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А. Алгоритм распознавания геомагнитных пульсаций Pc3 на секундных данных экваториальных обсерваторий сети ИНТЕРМАГНЕТ // Физика Земли. – 2014. – № 2. – С.91-99
- Каган А.И., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Определение стохастической непрерывности методами нечеткой логики и геофизические приложения // Международная конференция «Итоги Электронного Геофизического Года» в Переславль-Залесском, Россия. Тезисы докладов. - 2009. - июня – С.97
- Клейменова Н.Г. Геомагнитные пульсации // Модели космоса. М.:МГУ. ред. Панасюк М.И. Т.1. С.511-627. 2007.
- Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Ч. 2. Короткопериодные колебания геомагнитного поля. Л.:ЛГУ, 1976. 271 с.
- Троицкая В.А., Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы // Успехи физич. Наук. Т. 97. С. 453-494. 1969.
- Троицкая, В.А. Короткопериодные возмущения электромагнитного поля Земли/ В.А.Троицкая // Доклады АН СССР, новая серия. - 1953. - Т. 91. - № 2. - С. 241
- Means J. D. Use of the three-dimension covariance matrix in analyzing the polarization properties of plane waves // J. Geophys. Res. V. 77. N 28. P. 5551–5559. 1972.
- Pashin A. B., Glabmeier K.H., Baumjohann W., Raspopov O.M., Yahnin A.G., Opgenoorth H.J., Pellinen R.J. Pi 2 magnetic pulsations, auroral breakups, and the substorm current wedge: A case study // J. Geophys. V. 51. P. 223–233. 1982.
- Parks, T.W. Digital Filter Design / T.W. Parks, C.S. Burrus // John Wiley & Sons. – 1987. – P. 162-171.
- Pilipenko, V.A. ULF waves on the ground and in space / V.A. Pilipenko //J. Atmos. Terr. Phys. Vol.52. - 1990. - №12. – P. 1193–1209.