

УДК 550.385:550.388

О. В. Лазоренко, С. В. Лазоренко, Л. Ф. Черногор

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Применение вейвлет-анализа в задачах космической физики и космической радиофизики

Вейвлет-анализ застосовано для розв'язування задач в царині космічної фізики і космічної радіофізики, зокрема для аналізу реакції іоносфери на сильні сонячні спалахи і магнітні бурі, для дослідження ефектів у іоносфері, викликаних сильними грозами, за період часу 1998—2003 рр. Поряд з вейвлет-аналізом використовувався традиційний фур'є-аналіз із побудовою динамічних спектрів. Оцінено параметри збурень, що виникають у навколосезонному і космічному просторах. Продемонстровано високу ефективність вейвлет-аналізу, особливо при дослідженні короткочасних ширококутових процесів.

ВВЕДЕНИЕ

В середине 80-х годов XX века благодаря работам Малла, Морле, Стомберга, Добеши и других исследователей появился математический метод, получивший название «вейвлет-анализ» [1, 5, 6, 8, 10]. Идея метода состоит в разложении анализируемой функции по вейвлетам. Вейвлет-анализ имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционно применяемым фурье-анализом. Во-первых, базисные функции вейвлет-преобразования имеют компактный носитель, тогда как базисные функции преобразования Фурье неограниченны. Поэтому первые в большей степени подходят для анализа реальных процессов, которые также являются ограниченными во времени. Во-вторых, базис вейвлетов строится с помощью растяжений-сжатий и сдвигов во временной области одной или двух функций. В-третьих, существует множество различных по своим свойствам вейвлетов, позволяющих выбрать систему базисных функций, которая наиболее удобна при решении конкретной задачи.

В настоящее время имеется лишь небольшое число работ, в которых вейвлет-анализ применялся для анализа временных рядов в задачах космической физики и геофизики.

Нами вейвлет-анализ использовался для анализа временных вариаций геомагнитного поля, зарегистрированных высокочувствительным магнитомет-

ром-флюксометром, доплеровского смещения частоты сигналов ВЧ-радаров, амплитуд частично-отраженных сигналов СЧ-радаров, некогерентно-рассеянной мощности ОВЧ-радаров и уровня радиозумов СЧ-, ВЧ- и ОВЧ-диапазонов [2—4, 7, 9]. Описанные вариации сопровождали нестационарные процессы на Солнце (солнечные вспышки, выбросы корональной массы и магнитных облаков) и изменения космической погоды, а также антропогенные воздействия на среду.

В качестве базисных функций использовались вейвлет Гаусса, МНАТ-вейвлет, вейвлет Добеши, вейвлет Морле и другие. Выбор вида вейвлета зависел от характера вариаций временных рядов, от необходимости обнаружить возмущение той или иной формы, а также от величины вычислительных затрат. Чем ближе форма базисной функции к форме обнаруживаемого (восстанавливаемого) импульса, являющегося реакцией на воздействие упомянутых источников, тем более локализованным оказывается вейвлет-спектр и меньше вычислительные затраты. Анализ вейвлет- и фурье-спектров производился параллельно.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

Вейвлет-анализ нами применялся для изучения сильнейших солнечных вспышек (СВ), имевших

Рис. 1. Вейвлет- и фурье-спектры сигнала и радишума 22/23 сентября 1998 г.: a , e — сигнал $s(t)$ и шум $n(t)$ соответственно; b , v и $ж$, $з$ — DOG-вейвлет-спектры сигнала и шума соответственно; $г$, $и$ — вейвлет-спектры на базе вейвлета $\text{bior} 3.1$ для сигнала и шума соответственно; $д$, $к$ — динамические фурье-спектры сигнала и шума соответственно (размер окна — 100 точек); T — период возмущений

Рис. 2. То же, для 24/25 сентября 1998 г.

место в 1998—2003 гг. Рассмотрим подробнее СВ класса М6/3В, наблюдавшуюся 23 сентября 1998 г. Она началась в 09.44, достигла максимальной интенсивности в 10.06 и закончилась в 13.09 (здесь и далее время киевское). Измерения проведены в районе г. Харькова (49.6° N, 36.3° E) с помощью радара некогерентного рассеяния (НР) [4]. НР-сигнал принимался с высот 97—500 км с шагом 10 км. Кроме мощности НР-сигнала P_s , регистрировалась мощность шумового радиоизлучения P_n на частоте 158 МГц в полосе частот 260 кГц.

Результаты анализа приведены на рис. 1. Сигнал $s(t)$ представляет собой результат усреднения по диапазону высот 204—408 км флюктуаций мощности $\delta P_s = P_s - \langle P_s \rangle$, где P_s и $\langle P_s \rangle$ — скользящие средние на интервале 7.5 и 120 мин, шаг скольжения — 1.5 мин. Сигнал $n(t)$ — результат усреднения флюктуаций мощности $\delta P_n = P_n - \langle P_n \rangle$, последние получены так же, как P_s и $\langle P_s \rangle$. После СВ появляются квазипериодические колебания P_s и всплески P_n . Вейвлет-анализ выявил тонкую структуру вариаций δP_s и δP_n (см. рис. 1).

МАГНИТНЫЕ БУРИ

Рассмотрим магнитную бурю (МБ), начавшуюся около 02.00 25 сентября 1998 г. Основная фаза МБ наблюдалась с 05.00 до 13.00 15 сентября. Ей соответствовали индексы $K_{pmax} = 9$, $D_{stmin} \approx -207$ нТл. Измерения выполнены на указанном выше радаре НР [4]. Методика обработки такая же, как при исследовании СВ 23 сентября 1998 г. Результаты анализа приведены на рис. 2. Видно, что МБ сопровождалась существенными вариациями мощности сигнала и шумового радиоизлучения, генерацией волновых возмущений (ВВ) в ионосфере.

Исследования самой большой ($K_{pmax} = 8$, $D_{stmin} \approx -220$ нТл) МБ 1999 г. выполнено при помощи высокочувствительного магнитометра-флюксметра [2, 3]. Внезапное начало бури имело место 21 октября в 05:25, основная фаза наблюдалась 22 октября с 04:00 до 10:00. Буря продолжалась до 25 октября. Фурье- и вейвлет-анализы свидетельствуют о существенном изменении спектрального состава флюктуаций геомагнитного поля (рис. 3).

ЭФФЕКТЫ ГРОЗ В ИОНОСФЕРЕ

Состояние космической погоды определяется не только процессами на Солнце, но и процессами в

нижней атмосфере, на Земле и под ее поверхностью. Одним из источников возмущений являются грозы. Для выявления эффектов гроз в ионосфере на высотах 100—300 км нами использовался доплеровский ВЧ-радар. Комплексный сигнал биений подвергался фурье- и вейвлет-анализам (рис. 4). Оказалось, что грозы могут приводить к заметным деформациям доплеровских спектров. Возможными причинами возмущений в ионосфере могут быть акустическое и электромагнитное излучения молний, мощность каждой из которых достигает 1—10 МВт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подтверждено, что вейвлет-анализ позволяет добиться одновременного увеличения разрешающей способности как по времени, так и по частоте. Это оказывается особенно важным при анализе кратковременных широкополосных процессов, какими часто являются отклики околоземной и космической среды на воздействие мощных источников энерговыделения естественного и искусственного происхождения.

СВ 23 сентября 1998 г. вызвала увеличение P_n , которое, скорее всего, обусловлено перестройкой ионосферно-магнитосферного взаимодействия в результате увеличения рентгеновского и ультрафиолетового излучения Солнца и концентрации электронов в ионосфере на высотах динамо-области. СВ сопровождалась усилением ВВ в ионосфере с периодами запаздывания около 1 ч, продолжительностью не менее 5 ч и относительной амплитудой около 10 %.

МБ 24/25 сентября 1998 г. привела к генерации ВВ с относительной амплитудой $\delta = \Delta N/N$ около 2 и 25 % в интервалах времени 11:00—14:00 и 13:00—15:00 25 сентября 1998 г. Им соответствуют периоды 10—13 и 24—120 мин. Первое ВВ, очевидно, связано с модуляцией глобальной конвекции, второе ВВ — с генерацией ВГВ в приполюсной области. Важно, что профиль второго ВВ был N-образным, а волна нелинейной.

МБ 22 октября 1999 г. сопровождалась усилением (на порядок и более) спектральных составляющих флюктуаций H и D -компонентов в диапазоне периодов от 20—40 с до 7—15 мин. Четко наблюдались отдельные пульсации с периодами 45—55 с, средней продолжительностью 5—7 мин и амплитудой около 10 нТл.

Сильные грозы сопровождалась заметными вариациями доплеровских спектров ВЧ-радиосигналов, отраженных от ионосферы.

Рис. 3. Вейвлет- и фурье-спектры вариаций магнитного поля, зарегистрированных во время магнитной бури 25 октября 1999 г.: a , z — сигналы во временной области для D - и H -компонента соответственно; b , d — DOG-вейвлет-спектры для D - и H -компонента соответственно; e , e — динамические фурье-спектры D - и H -компонента соответственно (размер окна — 750 с)

Рис. 4. Вейвлет- и фурье-спектры сигнала 15.07.2002 г.: a — сигнал $s(t)$; b — DOG-вейвлет-спектр сигнала; e — динамический фурье-спектр сигнала. Гроза имела место в интервале времени 18:30—20:30

1. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физ. наук.—1996.—166, № 11.—С. 1115.
2. Гармаш К. П., Лазоренко С. В., Пазюра С. А., Черногор Л. Ф. Флуктуации электромагнитного поля Земли во время самой большой геокосмической бури 1999 г. // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 3.—С. 252.
3. Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. Статистические характеристики флуктуаций электромагнитного поля Земли // Радиофизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 2.—С. 163.
4. Григоренко Е. И., Лазоренко С. В., Таран В. И., Черногор Л. Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождающие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. // Геомагнетизм и аэрономия.—2003.—43, № 6.
5. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории — к практике. — М.: СОЛОН-Р, 2002.—448 с.
6. Кравченко В. Ф., Рвачев В. А. «Wavelet»-системы и их применение в обработке сигналов // Зарубежная радиоэлектроника.—1996.—№ 4.—С. 3.
7. Лазоренко О. В., Лазоренко С. В., Черногор Л. Ф. Применение вейвлет-анализа к задаче обнаружения сверхширокополосных сигналов на фоне помех // Радиофизика и радиоастрономия.—2002.—7, № 1.—С. 46.
8. Чуи К. Введение в вейвлеты: Пер. с англ. Я. М. Жилейкина. — М.: Мир, 2001.
9. Chernogor L. F., Lazorenko O. V., Lazorenko S. V. Wavelet analysis and ultra-wideband signals // Radio Physics and Radio Astronomy.—2002.—7, N 4.—P. 471.
10. Daubechies I. Ten lectures on wavelets // CBMS-NSF conference series in applied mathematics. SIAM Ed. — 1992.

**THE APPLICATION OF WAVELET ANALYSIS
TO PROBLEMS OF COSMIC PHYSICS
AND COSMIC RADIO PHYSICS**

O. V. Lazorenko, S. V. Lazorenko, and L. F. Chernogor