

УДК 523.98

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ИСТОЧНИКОВ КОЛЕБАНИЙ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА

С.А. Анфиногентов, Р.А. Сыч

SPATIAL STRUCTURE OF OSCILLATION SOURCES IN THE SOLAR ATMOSPHERE

S.A. Anfinogentov, R.A. Sych

Разработан и протестирован метод поточечной вейвлет-фильтрации (ПВФ-метод) для определения пространственной, временной и фазовой структуры источников колебаний во временных сериях двумерных изображений, основанный на непрерывном вейвлет-преобразовании. Этот метод позволяет получить информацию о существовании распространяющихся и стоячих волн и точно локализовать их во времени и пространстве. Метод был протестирован с использованием данных микроволнового (17 ГГц, NoRH) и ультрафиолетового (171Å, TRACE) диапазонов. Обнаружена тонкая пространственная структура источников колебаний с 3-, 5 и 15-мин периодами в излучении, генерируемом в атмосфере пятна. Дополнительно ПВФ-метод обеспечивает уникальную информацию о временной переменности мощности, амплитуды и фазы узкополосных пространственных карт наблюдаемых колебаний и волн. Обсуждается применимость метода для анализа корональных волновых феноменов.

Pixelized wavelet filtering (PWF-method) for determining spatial, temporal, and phase structures of oscillation sources in time sets of 2D images, based upon the continuous wavelet transform, has been developed and tested. The PWF method allows us to obtain information about the presence of propagating and non-propagating waves, and localize them precisely in time and space. The method was tested on the datasets obtained in microwaves with the Nobeyama Radioheliograph and in EUV with TRACE. The method reveals fine spatial structuring of the sources of 3-, 5-, and 15-min periodicities in the emission generated in sunspot atmosphere. In addition, the PWF-method provides unique information about time variability of the power, amplitude, and phase of narrowband spatial maps of the observed oscillations and waves. The applicability of the method to the analysis of coronal wave phenomena is discussed.

Введение

Основной целью этой работы является развитие и тестирование метода поточечной вейвлет-фильтрации (ПВФ-метод) для определения тонкой пространственной структуры источников колебаний и их взаимосвязи с полученными спектральными пиками при анализе пространственно-интегрированного сигнала. В этой работе мы, следуя [1], используем непрерывные вейвлет-преобразования с материнской функцией Morlet. Для каждого временного сигнала отдельной точки изображения применена вейвлет-фильтрация с целью его разложения на составные части во временной области и определено пространственное распределение мощности для различных спектральных компонент. Этот анализ позволяет нам получить узкополосные карты, связанные с определенно выбранной периодичностью, определить тип волны – распространяющейся или стоячей – в поле зрения наблюдателя и изучить ее временную эволюцию.

Мы применили ПВФ-метод для анализа колебаний в солнечных пятнах и корональных петлях, используя данные, полученные NoRH [2] и TRACE [3]. Целью работы было отразить результаты предыдущих работ и продемонстрировать применимость метода к получению новых результатов.

Схема метода

Входным сигналом является временной куб данных, состоящий из последовательности двумерных изображений. В частности, это могут быть ультрафиолетовые изображения Солнца SOHO/EIT или TRACE, рентгеновские данные Hinode/XRT или Yohkoh/SXT, а также радиоизображения NoRH. Прежде чем приступить к обработке экспериментальных данных, мы применили описанный выше метод для получения характеристик колебательного процесса с известными свойствами. С этой целью

мы использовали синтетический тест наложения [4] двух типов монохроматических волн – стоячей и бегущей – с различными периодами, длинами волн и амплитудами.

ПВФ-метод основан на вейвлет-преобразованиях, детально описанных в работах [1]. В качестве материнской функции использовалась хорошо локализованная комплексная функция Morlet. Для каждой точки источника строится временная кривая изменения яркости и выполняется непрерывное вейвлет-преобразование с построением амплитудного и/или фазового спектра. Используя всю доступную частотную полосу, реконструируем временные сигналы для всех частот. Для каждого узкополосного восстановленного сигнала рассчитываем вариацию и строим распределение мощности в зависимости от частоты в плоскости пятна как 3D-карту (непрерывный спектр, рис. 1, а) или 2D-изображения (выделенные частоты). По непрерывному 3D-распределению строим глобальный ПВФ-спектр с учетом распределения мощности вариации по источнику (рис. 1, б). Пики в спектре показывают значимые временные периоды, интегральное значение которых превалирует по источнику. По полученным периодам выделяем узкополосные восстановленные сигналы, находим их амплитуды и/или мощности и строим кривые изменения амплитуды или мощности сигнала со временем, фильтрованные узкополосные изображения пятна на различные моменты времени и распределение фазы в источнике. По полученным данным определяем тип волны: стоячая или движущаяся.

Пространственная структура источников колебаний в солнечных пятнах

Основываясь на достоверности результатов, полученных при работе ПВФ-метода с искусственными сигналами, мы применили его для анализа колеба-

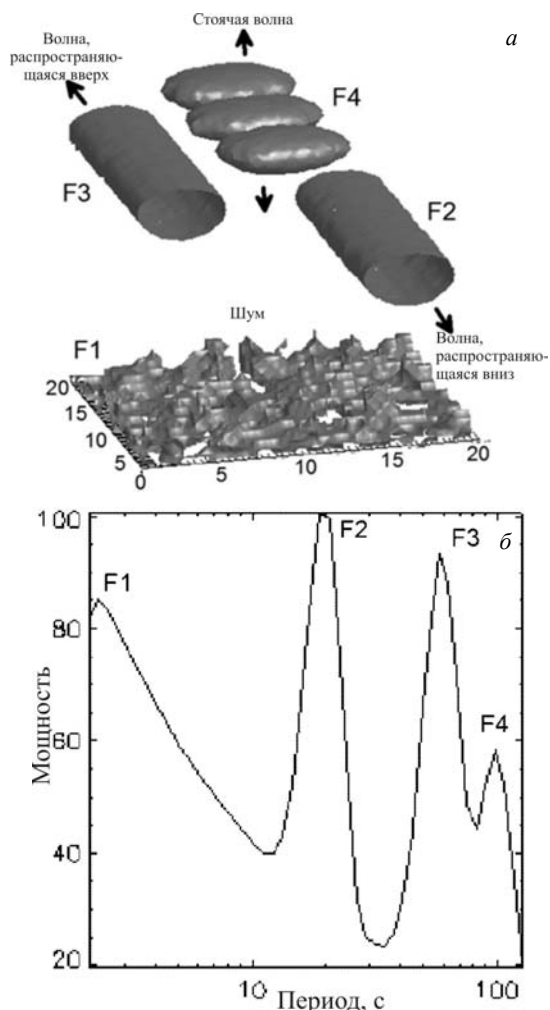


Рис. 1. а – пространственно-частотное распределение различных типов волн; б – глобальный ПФФ-спектр колебаний.

ний радиоизлучения в пятнах, используя данные NoRH на частоте 17 ГГц за 22 июля 1994 г., 30 июня 1993 и 16 августа 1992 г. с временным разрешением 10 с в канале круговой поляризации [2].

Для этих событий мы построили узкополосные изображения источников для каждой из значимых гармоник. Существуют пространственные различия как по форме, так и по местоположению источников ~ 3-, 5- и 15-мин колебаний друг относительно друга (рис. 2, а). Так, если для 22 июля 1994 г. размер, форма и местоположение всех источников в основном совпадают, то для события 30 июня 1993 г. существует различие между компонентами. Трехминутный источник в основном захватывает центральную часть радиоисточника вдоль оси симметрии. В то же время ~5-мин источник представляет собой двухкомпонентную структуру в виде малых пятен с угловым размером ~15", расположенных по обе стороны от центральной части источника. Пятнадцатиминутная компонента также находится в центре источника. Для события 16 августа 1992 г. повторяется ситуация, когда 3-мин и 15-мин компоненты сосредоточены в центральной части радиоисточника. Но для 5-мин компоненты существует существенное отличие как по местоположению, так и по форме. Как и для 30 июня 1993 г., эти источники представ-

ляют собой набор малых пятен, расположенных в виде окружности на границе тень-полутень и дающих основной вклад в колебания радиоисточника. При этом наблюдаются области, где отмечаются противофазные колебания. Такое поведение отдельных точек источника может привести к уменьшению мощности 5-мин колебаний. Этот эффект может объяснить присутствие 3-мин компоненты как основной в интегральном потоке (сфазированность колебаний).

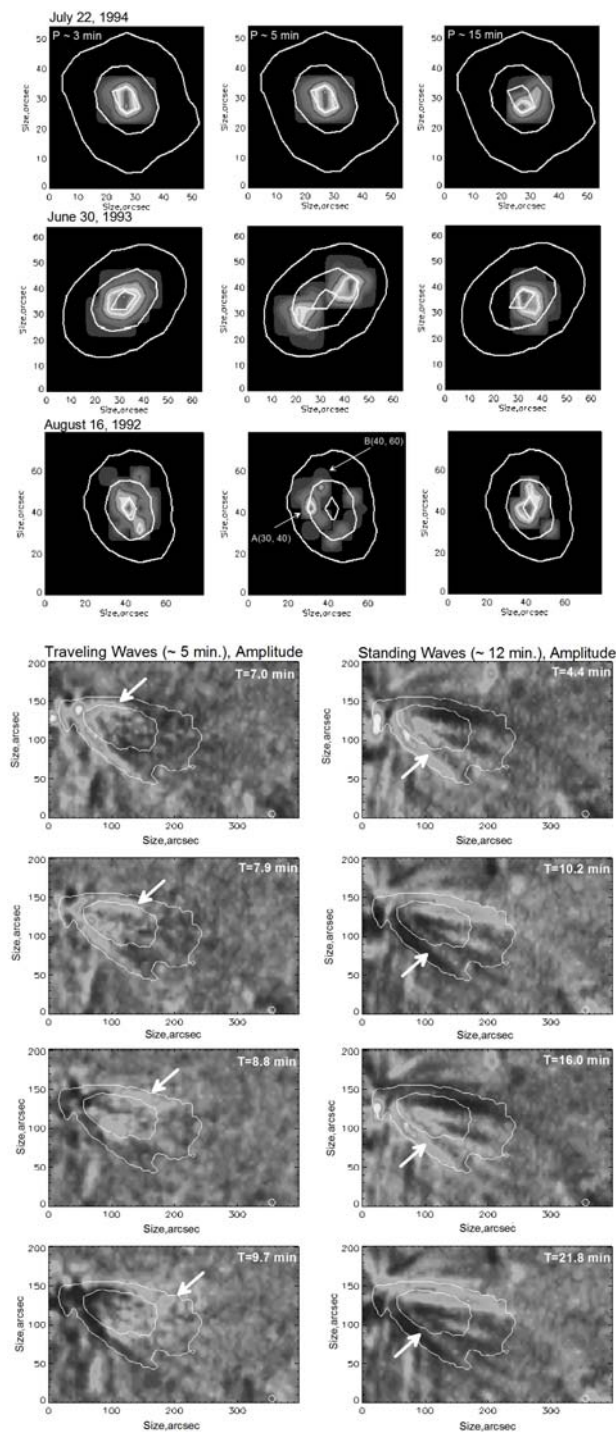


Рис. 2. а – узкополосные изображения источников колебаний радиоизлучения в солнечных пятнах (17 ГГц, NoRH) с периодами ~3, 5 и 15 мин. б – изображения распространяющихся (~5 мин) и стоячих (~12 мин) волн в магнитной петле (171Å, TRACE) на уровне короны. Стрелкой указаны рассматриваемые волны.

Волны и колебания в магнитных петлях

Для исследования колебания магнитных структур в солнечной короне мы использовали ряд наблюдений EUV данных TRACE за 23 марта 1999 г. [3, 4]. Наша задача состояла в применении ПФФ-метода для сравнения с данными, полученными другими методами. Последовательность обработки данных TRACE проводилась аналогично описываемой выше применительно к пятнам. Полученная вариационная карта показывает наличие тонких вытянутых структур, которые являются основным источником колебаний в петле. Глобальный ПФФ-спектр мощности колебаний показывает периоды ~5, 8 и 12 мин. Для определения местоположения источников колебаний для каждой выделенной гармоники была использована вейвлет-фильтрация с построением узкополосных изображений петли. Динамика отдельных деталей была отслежена со временем относительно изменения как их амплитуды, так и фазы. На рис. 2, б показаны двумерные узкополосные изображения для ~5- и ~12-мин колебаний. Видно, что для 5-мин компоненты колебания проявляются в виде движущихся волн с изменяющейся амплитудой, распространяющихся вдоль выделенных направлений внутри петли. Возникновение этих волн связано с основанием петли и их дальнейшим движением и расширением в сторону вершины. В то же время более низкочастотные колебания с периодом ~12 мин в основном сосредоточены на внешних тонких границах петли в виде стоячей волны. Фаза колебаний периодически меняется в этих областях без изменения ее локализации. Полученные данные о колебаниях показывают полное соответствие с данными, полученными методами EMD и CEOF [4], и дают информацию о точных значениях преобладающих периодов.

Выводы

Основной целью данной работы было развитие и тестирование метода поточечной вейвлет-фильтрации для анализа астрономических, в частности, солнечных, динамических рядов изображений. Новизна предлагаемого подхода состоит в возможности получать динамические амплитудные и фазовые узкополосные изображения, дающие информацию о типе волн, присутствующих в осциллирующих источниках, а также изучать изменения их пространственных структур со временем. Тестирование ПФФ-метода с использованием искусственно заданного 3D-ряда изображений, содержащего различные типы волн,

показало его эффективность в детектировании, идентификации, а также определении их пространственного расположения и динамики.

Применение метода к реальным наблюдательным данным – двумерным радиоизображениям Солнца в хромосфере на частоте 17 ГГц (NoRH) – показало, что источники 3-, 5- и 15-мин периодов колебаний, доминирующих в интегральном спектре радиопотока пятна, имеют различное пространственное расположение и форму. В тени пятна сосредоточены 3- и 15-мин колебания, в то время как 5-мин источники осцилляций расположены на границе тень–полутень в виде пятен малого углового размера. Подобная пространственная структура распределения мощности колебаний в солнечных пятнах наблюдалась в магнитном поле пятен [5] и в радиодиапазоне [6].

Данные, полученные на уровне короны (TRACE, 171 Å) показали присутствие осцилляций в магнитных структурах с периодами 5 и 12 мин. Исследование этих колебаний показало наличие 5-мин движущихся волн, распространяющихся вдоль тонких силовых трубок внутри магнитной петли от ее основания к вершине. Огибающая этих колебаний с 12-мин периодом наблюдается в виде стоячих волн, максимальная мощность которых сосредоточена на внешней границе петли. Полученный результат совпадает с ранее описанными наблюдениями, сделанными в [4] с использованием EMD и CEOF методов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Torrence C., Compo G.P. A practical guide to wavelet analysis // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1998. V. 79, N 1. P. 61–78.
2. Gelfreikh G.B., Grechnev V.V., Kosugi T., et al. Detection of periodic oscillations in sunspot-associated radio sources // *Solar Phys.* 1999. V. 185, N 1. P. 177–191.
3. De Moortel I., Ireland J., Walsh R.W. Observation of oscillations in coronal loops // *Astron. & Astrophys.* 2000. V. 355. P. L23–L26.
4. Terradas J., Oliver R., Ballester J.L. Application of statistical techniques to the analysis of solar coronal oscillations // *Astrophys. J.* 2004. V. 614, N 1. P. 435–447.
5. Zhugzhda, Y.D., Balthasar, H., Staude, J. Multi-mode oscillations of sunspots // *Astron. & Astrophys.* 2000, V. 355, P. 347–354
6. Nindos A., Alissandrakis C.E., Gelfreikh G.B. et al. Spatially resolved microwave oscillations above a sunspot // *Astron. & Astrophys.* 2002. V. 386. P. 658–673.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск