

УДК 523.98, 523.982

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ПОТОЧЕЧНОЙ ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИИ

С.А. Анфиногентов, Р.А. Сыч

### AUTOMATED DETECTION OF OSCILLATIONS IN THE SOLAR ATMOSPHERE USING PIXELIZE WAVELET FILTERING

S.A. Anfinogentov, R.A. Sych

Введение в строй космических обсерваторий SOHO, TRACE, STEREO и SDO открыло новые возможности для исследования динамических процессов в солнечной атмосфере. Традиционно поиск колебаний производится путем визуального исследования данных. Однако для анализа все возрастающих объемов данных чрезвычайно важно иметь быстрый и эффективный алгоритм поиска колебаний и определения их параметров.

В работе представлен новый метод для автоматического детектирования колебаний и волн в атмосфере Солнца, основанный на поточечной вейвлет-фильтрации (ПВФ). Алгоритм полностью автоматический и не требует участия человека. Он позволяет обнаруживать источники колебаний в атмосфере Солнца и определять их параметры.

Метод был протестирован на модельных данных и на реальных наблюдениях. Результаты тестирования показали, что метод достоверно обнаруживает колебания и работает достаточно быстро для обработки потока данных SDO/AIA в реальном времени.

The modern orbital solar observatories (SOHO, TRACE, STEREO and especially SDO) provide facilities for studying oscillations in solar atmosphere. Usually manual detection is used for finding oscillating areas. However this way is inefficient for very large data volume which is produced by Solar Dynamics Observatory (SDO). It is quite important to develop a fast and robust algorithm of automated oscillations detection.

We present the new approach for automated detection of oscillations and waves in solar atmosphere which is based on Pixelize Wavelet Filtering Method. Our algorithm is fully automated. It detects oscillation sources in temporal image sequences and finds out their properties. The algorithm was tested both on model data and on real observation in EUV and microwave emission. The test's result is that our method reliably detects oscillation sources almost without false detection and it is fast enough for the real time processing of the SDO/AIA data.

#### Введение

Запуски космических обсерваторий Solar and Heliospheric Observatory (SOHO) и Transition Region and Coronal Explorer (TRACE) открыли новые возможности для исследования динамических процессов в солнечной короне. Было обнаружено, что колебательные и волновые процессы часто наблюдаются в солнечной короне. Подробные обзоры представлены в статьях [Aschwanden, 2003; Nakariakov, Verwichte, 2005; De Moortel, 2005].

Во всех этих исследованиях источники колебаний были обнаружены путем визуального исследования данных в тех регионах, для которых есть предпосылки найти колебания. Хотя эта стратегия и оказалась успешной, ясно, что она практически неприменима для анализа все возрастающих потоков данных. Например, обсерватория SDO передает более 1.4 терабайт данных в сутки. Для продуктивной работы с этими данными чрезвычайно важно иметь быстрый и эффективный алгоритм поиска колебаний, обладающий следующими свойствами:

- 1) достоверное обнаружение источников колебаний;
- 2) быстродействие, достаточное для работы в режиме реального времени;
- 3) полностью автоматическое функционирование.

В настоящее время существуют четыре опубликованных алгоритма обнаружения колебаний в атмосфере Солнца: карты периодов (periodmap) [Nakariakov, King, 2007], поиск значимых волновых пакетов с помощью вейвлет-преобразования [De Moortel, McAtteer, 2004], подход, основанный на определении когерентности фильтрованного сиг-

нала [McIntosh et al., 2008], и байесовский подход [Marsh et al., 2008]. К сожалению, ни один из этих алгоритмов указанными свойствами в полной мере не обладает.

#### Описание алгоритма

Мы предлагаем следующую схему для определения присутствия колебаний во временном ряду изображений:

1. Проведение предварительной обработки поступающих данных:

- a) выравнивание изображений друг относительно друга;
- b) вычитание медленных трендов;
- c) умножение данных на временное окно с целью минимизации краевых эффектов;
- d) поиск резких пиков в сигнале и исключение из анализа точек, в которых они были обнаружены;
- e) удаление низкочастотной составляющей с помощью фильтра высоких частот.

2. Расчет для каждой точки критерия присутствия колебаний:

- a) фильтрация сигнала в заданном диапазоне частот;
- b) вычисление оценки отношения сигнал/шум для каждой точки изображения по формуле

$$SNR = \frac{CKO(S_{\text{фильтр}})}{CKO(S_{\text{оригинал}} - S_{\text{фильтр}})};$$

c) построение двумерной карты колебательной активности.

3. Выделение областей, в которых наблюдаются колебательные или волновые процессы.

#### Тестирование на модели

Для проверки работы алгоритма будем использовать модель, в которой помимо колебаний присутствуют помехи, встречающиеся в реальных данных и способные вызвать ложные срабатывания. Модель представляет собой серию изображений, на которых присутствуют следующие объекты:

- 1) область с синусоидально изменяющейся интенсивностью с амплитудой в 1 единицу (колебания);
- 2) область с медленно возрастающей интенсивностью (медленный тренд);
- 3) область с гауссовым всплеском, высота всплеска составляет 10 единиц;
- 4) фоновый шум с нормальным распределением и единичной дисперсией.

Объекты разного типа перекрываются между собой, таким образом, в некоторых точках модели присутствуют как колебания, так и помехи в виде медленного тренда и всплесков. А отношение сигнал/шум для модельного источника колебаний равно единице, что соответствует сильно зашумленным данным. На рис. 1 показана вариационная карта для нашей модели. Все источники на модели имеют форму кругов, в случае правильной работы алгоритм должен выделить только объект № 1, соответствующий источнику колебаний. На рис. 1 приведен результат работы алгоритма. Видно, что алгоритм выделил только источник синусоидальных колебаний и ложных срабатываний не произошло.

### Тестирование на реальных данных

Теперь проверим работоспособность нашего алгоритма на реальных данных, полученных инструментом AIA на борту космической обсерватории SDO. Для тестирования мы выбрали активную область NOAA 11084. В основании области лежит одиночное солнечное пятно, а корональные петли уходят на большую высоту. Поэтому мы рассчитывали обнаружить в этой активной области колебательные явления. Результат обработки данных показан на рис. 2. Алгоритм уверенно определил источники трехминутных колебаний, связанные с основаниями корональных арок.

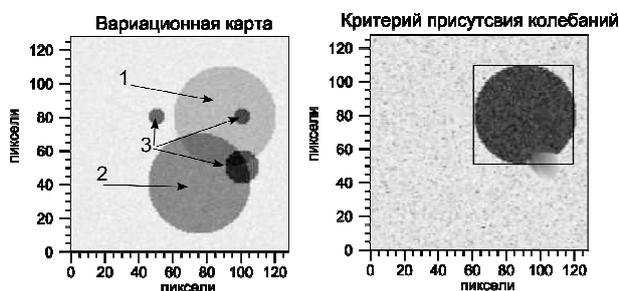


Рис. 1. Вариационная карта модельного сигнала (слева) и результат работы алгоритма автоматического обнаружения колебаний (справа). Большим значениям соответствуют более темные тона. Цифрами обозначены: 1 – источник колебаний, 2 – источник с медленно меняющейся интенсивностью, 3 – источники кратковременных всплесков.

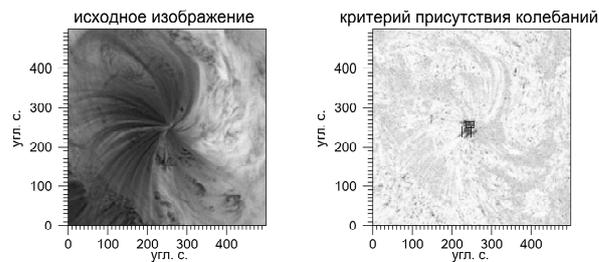


Рис. 2. Результат работы алгоритма на серии изображений Солнца, сделанных аппаратом SDO AIA (171 Å). Слева – изображение участка солнечного диска; справа – результат работы алгоритма автоматического обнаружения колебаний для того же участка. Прямоугольниками отмечены обнаруженные источники колебаний.

### Заключение

Предложенный алгоритм позволяет находить источники колебаний в последовательностях изображений Солнца в полностью автоматическом режиме. Тестирование на модели и реальных данных показало, что уровень ложных срабатываний алгоритма очень низок. Скорость работы алгоритма довольно высока. Время обработки последовательности 150 изображений с разрешением 4096×4096 пикселей составляет около 30 мин с учетом чтения данных с жесткого диска. Для тестирования производительности использовался компьютер на базе процессора Core 2 quad с тактовой частотой 2.6 ГГц. Такой уровень быстродействия позволяет вести потоковую обработку данных в режиме реального времени даже в случае большого пространственного разрешения и скважности наблюдений, как, например, у инструмента SDO/AIA.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aschwanden M.J. Review of coronal oscillations – an observer's view // *ArXiv Astrophysics e-prints*. 2003. URL: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0309505>.
- De Moortel I. An overview of coronal seismology // *Royal Society of London Philosophical Transactions Series A*. 2005. V. 363. P. 2743–2760.
- De Moortel I., McAteer R.T. J. Waves and wavelets: an automated detection technique for solar oscillations // *Solar Phys*. 2004. V. 223. P. 1–11.
- Ireland J., Marsh M.S., Kucera T.A., Young C.A. Automated detection of oscillating regions in the solar atmosphere // *Solar Phys*. 2010. V. 264. P. 403–431.
- Marsh M.S., Ireland J., Kucera T. Bayesian analysis of solar oscillations // *Astrophys. J*. 2008. V. 681. P. 672–679.
- McIntosh S., De Pontieu B., Tomczyk S. A coherence-based approach for tracking waves in the solar corona // *Solar Phys*. 2008. V. 252. P. 321–348.
- Nakariakov V., King D. Coronal periodmaps // *Ibid*. 2007. V. 241. P. 397–409.
- Nakariakov V.M., Verwichte E. Coronal waves and oscillations // *Living Reviews in Solar Physics*. 2005. V. 2. URL: <http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-3>.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск