

ФИЗИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ ЯВЛЕНИЙ В ФАКЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВАНИЯХ

Стрекалова П.В.¹, Соловьев А.А.¹, Смирнова В.В.¹, Наговицын Ю.А.^{1,2}

¹Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

A PHYSICAL INTERPRETATION OF OBSERVED PHENOMENA IN THE FACULAR FORMATIONS

Strekalova P.V.¹, Solov'ev A.A.¹, Smirnova V.V.¹, Nagovitsyn Y.A.^{1,2}

¹Central Astronomical Observatory at Pulkovo of RAS, Saint Petersburg, Russia

²Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia

The quasi-periodic variations of the magnetic field of small-scale structures on the Sun – facular formations are investigated. The found quasi-periodic variations with periods from one to several hours are interpreted as oscillations of a system with a time-variable rigidity. An approach to the analytical description of the significant oscillatory modes in the signal is proposed.

DOI: 10.31725/0552-5829-2018-357-360

Объектами исследования являются факельные образования (ФО) – уединенные, долгоживущие, устойчивые магнитные структуры, наблюдаемые на фотосфере и имеющие свои проявления в хромосфере. ФО не принадлежат активным областям. Их характерный размер варьируется от 1500 до 4000 км, а абсолютные значения максимальной напряжённости магнитного поля составляют 400–1100 Гс [1].

Мы анализировали изменения сигнала магнитограмм, полученных аппаратом SDO/HMI. Данные выбирались за время, в течение которого ФО сохраняли свою относительную целостность на магнитограмме и были наиболее стабильны. Инструмент HMI наблюдает полный солнечный диск на длине волны λ 6173 Å с пространственным разрешением в 1 угловую секунду. Максимальное временное разрешение получаемых магнитограмм составляет 45 с. Длина временных рядов, использованных для исследования вариаций магнитного поля, варьировалась в зависимости от времени жизни каждого ФО.

Для выявления колебательных мод в сигнале использовался метод EMD [2, 3], в основе которого лежит разложение сигнала на эмпирические моды. Т.к. метод не имеет базиса разложения, он не вносит никаких искажений в исследуемый сигнал, что делает его подходящим для анализа нестационарных и нелинейных колебаний.

Далее с помощью метода, описанного в работе [4], полученные колебательные моды проверялись на принадлежность к цветным шумам: белому, красному и розовому. Моды, лежащие выше доверительных интервалов цветных шумов, считались значимыми [5].

Во всех исследованных случаях, где максимальное магнитное поле превышало 500 Гс, было обнаружено по одной значимой моде одного из трёх типов:

- 1) Период и амплитуда растут со временем;
- 2) Период и амплитуда уменьшаются со временем;
- 3) Режимы возрастания и убывания амплитуды и периода сменяют друг друга.

Для того чтобы аналитически описать такие колебания мы можем рассматривать ФО, как систему с переменной во времени жесткостью. В рамках этого предположения запишем уравнение малых линейных колебаний при наличии трения:

$$1. \quad \ddot{x}(t) + 2\beta\dot{x}(t) + W^2(t)x(t) = 0,$$

где $W(t)$ – зависящая от времени эффективная упругость системы (возвращающая сила, рассчитанная на единицу массы).

Будем искать её решение, т.е. возмущение среднего поля ФО, как функцию вида:

$$2. \quad x(t) = A_0 \exp[(\gamma - \beta)t] \cos[\omega(t)t],$$

A_0 – амплитуда колебаний, γ – инкремент ее возрастания, $\omega(t)$ – изменяющаяся со временем частота, β – коэффициент трения.

Из этого можно получить выражение для упругости W :

$$3. \quad W^2(t) = \omega_0^2 \exp(-4\gamma t) - \gamma^2 + \beta^2,$$

В данном решении, упругость $W(t)$ есть переменная функция времени, зависящая от коэффициента γ : она уменьшается со временем, если $\gamma > 0$, и растёт, если $\gamma < 0$.

Из предыдущих выражений можно получить уравнение, описывающее наблюдаемые моды колебаний:

$$4. \quad x(t) = A_0 \exp[(\gamma - \beta)t] \cos \left[\frac{\omega_0}{2\gamma} \exp(-2\gamma t) + \varphi \right],$$

где φ – фаза.

Изменяя β , γ , ω_0 и φ , мы можем определить вид функции, описывающей ту или иную моду. На рис. 1 и рис. 2 представлены сравнения колебательных мод, выделенных из сигнала и аналитических функций с подобранными параметрами.

Третий случай описать сложнее и, при применении уравнения 3, требует построения кусочной функции. Поэтому, в рамках механической аналогии возьмём другую функцию для системы с переменной жесткостью:

5. $W^2 = \omega_0^2 [1 - a \sin(\gamma(t - t_0))]^2$,
 где $0 < a < 1$ константа, определяющая амплитуду периодической модуляции. На рис. 3 представлено сравнение значимой моды из сигнала и аналитически построенной колебательной функции.

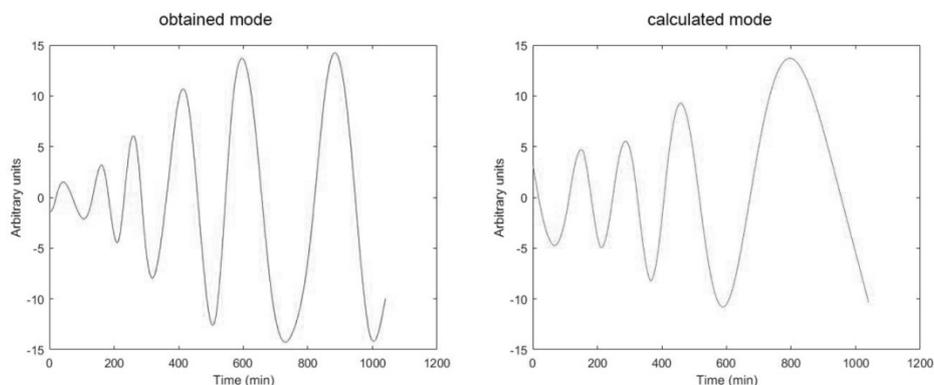


Рис. 1. *Левая панель:* значимая мода, полученная из наблюдений.
Правая панель: аналитически вычисленная функция с параметрами $\beta = 0,01$; $\gamma = 0,071$; $\omega_0 = 6$; $\varphi = 2$.

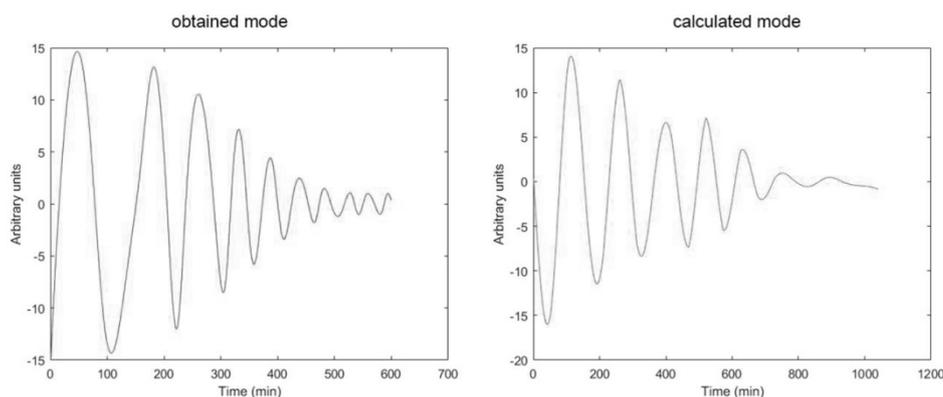


Рис. 2. *Левая панель:* значимая мода, полученная из сигнала.
Правая панель: аналитически вычисленная функция с параметрами $\beta = 0,08$; $\gamma = -0,013$; $\omega_0 = 2$; $\varphi = 2$.

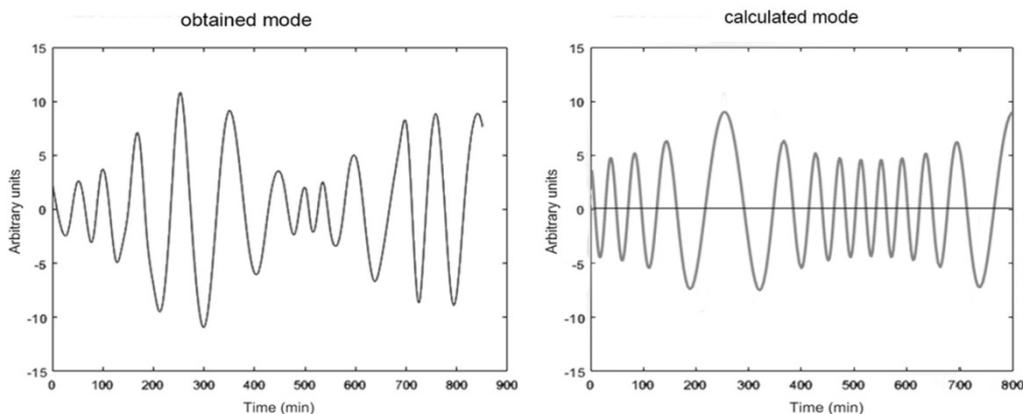


Рис. 3. *Левая панель:* значимая мода, полученная из сигнала.
Правая панель: аналитически вычисленная функция.

Правая и левая части находятся в хорошем согласии друг с другом. Таким образом, используя предположение о переменной жесткости системы, мы можем интерпретировать реальные колебания ФО. Однако модель не демонстрирует полного согласия с наблюдаемыми модами. Поэтому, она может быть уточнена, к примеру, решением «обратной задачи», основанной на фитировании значимых мод простыми моделями колебательных, с дальнейшим включением в них физических параметров.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 16-02-00090, 18-32-00555) и программы Президиума РАН № 28.

Литература

1. *Strekalova P.V., Nagovitsyn Y.A., Riehoainen A, Smirnova V.V.* Long-Period Variations in the Magnetic Field of Small-Scale Solar Structures // *Ge&A*, 2016, V. 56, P. 1–8.
2. *Huang N.E., Zheng S., Long S.R., and 7 co-authors.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // *Proc. R. Soc. L. Ser. A.*, 1998, V. 454, P. 903–995.
3. *Nagovitsyn Y.A.* A nonlinear mathematical model for the solar cyclicity and prospects for reconstructing the solar activity in the past // *Astronomy Letters*, Nov. 1997, V. 23, Is. 6, P. 742-748.
4. *Kolotkov, D.Y., Anfinogentov, S.A., & Nakariakov, V.M.* Empirical mode decomposition analysis of random processes in the solar atmosphere // *A&A*, 2016, V. 592, id.A153, 9 pp.
5. *Strekalova P.V., Nagovitsyn Y.A., Smirnova V.V.* Analysis of Oscillatory Modes of the Magnetic Field of Solar Faculae Formations // *Ge&A*, 2018, V. 58, No. 7, P. 893–898.