ТЕСТИРОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ КПП С НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Куприянова Е.Г.¹, Кальтман Т.И.², Брумолл А.-М.³, Мехта Т.³

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

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Университет г. Варвик, Ковентри, Великобритания

TESTING OF METHODS OF RECOGNITION OF QPP WITH NON-STATIONARY PARAMETERS

Kupriyanova E.G.¹, Kaltman T.I.², Broomhall A.-M.³, Mehta T.³

¹Pulkovo observatory of the RAS, St. Petersburg, Russia

²SAO RAS, St. Petersburg, Russia

³University of Warwick, Coventry, UK

An important role of quasi-periodic pulsations (QPPs) frequently observed in solar and stellar flare emission in the diagnosis of flare processes is generally accepted now. The principal task is to recognize the significant QPPs, hidden in the time profiles. Following standard statistical methods are usually used for this purpose: autocorrelation analysis, Fourier periodogram, wavelet analysis. In most cases, the usage of such methods is justified, since the period of most of the QPPs found remains almost constant. However, in recent years, the indications have been found of QPPs with non-stationary, i.e. significantly changing in time, parameters. Analysis of such QPPs by standard methods leads to the appearance of artifacts. The empirical mode decomposition (EMD) method, which does not have basic periodic functions, is better suited for the analysis of such QPPs. However, each of the mentioned methods has its advantages and disadvantages. In this paper, we present first results of a statistical testing of the Fourier periodogram and EMD methods based on a large sample of the synthetic time profiles.

DOI: 10.31725/0552-5829-2019-261-264

Введение

В настоящее время общепризнана роль квазипериодических пульсаций (КПП) излучения солнечных и звёздных вспышек в диагностике вспышечных процессов. Не представляет сомнений, что результаты диагностики напрямую зависят от того, насколько правильно мы оценим статистическую значимость КПП и их параметры (период, амплитуда, фаза). Для распознавания и анализа КПП обычно применяются стандартные статистические методы: автокорреляционный анализ, периодограмма Фурье, вейвлет-анализ. В большинстве случаев применение таких методов оправдано, поскольку период большинства найденных КПП сохраняется почти постоянным. Однако в последнее время стали появляться указания на КПП с нестационарными, т.е. заметно меняющимися во времени, параметрами.

Постановка задачи

Согласно наблюдениям, мы выделяем два семейства КПП, которые могут привести к нестационарности параметров КПП во временных профилях. К первому семейству мы относим мультипериодические КПП, где нестационарность является результатом суперпозиции нескольких периодических компонент. Второе семейство формируют КПП, у которых временные вариации параметров связаны с временными вариациями физического процесса, вызывающего эти КПП.

Анализ перечисленных КПП при помощи упомянутых выше стандартных методов приводит к появлению артефактов. Так, в работе [1] показано, что суперпозиция КПП с близкими периодами приводит к эффекту биений, когда на вейвлет-спектре вместо двух полос, соответствующих двум периодам, видна одна прерывающаяся полоса. Это затрудняет определение истинных периодов и локализацию во времени. Метод разложения по эмпирическим ортогональным модам (EMD), не имеющий базовых периодических функций, лучше подходит для анализа КПП с меняющимися параметрами [2]. Тем не менее, его эффективность в случае мультипериодических КПП с близкими периодами до сих пор не анализировалась.

В данной статье проводится предварительный анализ первого семейства КПП, моделируемого суммой двух периодических компонент с фазовым сдвигом. Мы представляем результаты предварительного тестирования четырех методов: периодограммы Фурье полного ряда, периодограммы Фурье ряда без тренда, вейвлет-преобразования, метода EMD. Тестирование проведено на основе выборки из 600 синтетических временных профилей. Цель работы заключается в анализе эффективности этих методов в случаях КПП с близкими периодами (частотами).

Синтетические временные профили

Выборка временных профилей задается рядами на равномерной временной сетке с шагом по времени $\Delta t = 1$ с и длиной ряда $N = 300$ точек. Каждый временной ряд состоит из трех компонент: медленно меняющегося низкочастотного тренда (F_{trend}), шума (F_n) и КПП ($F_{\text{КПП}}$). Вся выборка состоит из 600 рядов и формируется за счет вариаций параметров компонент и их комбинаций.

Вспышечный тренд (F_{trend}) задается гауссовой функцией с амплитудой равной 1 и дисперсией σ . Проводится анализ фазы спада, начинающейся в максимуме. Мы выбрали два значения дисперсии, обеспечивающие более резкий и более плавный спад гауссовой функции: $\sigma = 60$ с и $\sigma = 90$ с.

Периодический сигнал ($F_{\text{КПП}}$) задан в виде суммы двух компонент: $F_{\text{КПП1}} = S \cos(2\pi t/P_1)$, $F_{\text{КПП2}} = S \cos(2\pi t/P_2 + \varphi)$. Здесь S – амплитуда сигнала ($S = 0.1$ и $S = 0.2$), $P_1 = 1/f_1$ и $P_2 = 1/f_2$ – периоды; φ – фаза, представляющая собой случайную величину, равномерно распределенную в интервале $[-3, 3]$. Отметим, что данные компоненты заданы не на всем временном

интервале N , а содержат только ограниченное количество полных периодов Q . Согласно [3], число периодов пульсаций излучения 29 солнечных вспышек, произведенных одной активной областью, колеблется от 2 до 10. Поэтому мы рассмотрели три варианта: $Q = 3$, $Q = 6$, $Q = 10$.

Множество периодов P_1 и P_2 формируется исходя из следующих соображений. Фиксируется массив частот f_1 , состоящий из пяти элементов, значения которых равномерно распределены в пределах от $f_{\min} = 0.34$ (период 29.4 с) до $f_{\max} = 0.25$ (период 4 с). Далее задается массив разностей $\Delta f = f_2 - f_1$. Если рассмотреть Фурье-периодограмму, то две периодические компоненты представляют собой два значимых пика на частотах $f_1 = 1/P_1$ и $f_2 = 1/P_2$. Мы считаем, что наиболее близко расположенные отдельные пики представлены на периодограмме пятью точками, т.е. минимальное расстояние между двумя пиками равно $2 df$, где df – частотное разрешение Фурье-сетки частот. Однако, наличие шума и конечность временного ряда приводят к уширению пиков. Поэтому в качестве минимального расстояния между двумя компонентами мы установили значение $\Delta f_{\min} = 4 df$, а массив расстояний определили как кратное этому значению $\Delta f = [4 df, 8 df, 12 df, 16 df, 20 df]$. Двумерный массив частот f_2 , состоящий из 25 значений, получается сложением вектора Δf и каждого элемента f_1 .

Шумовая компонента (F_n) представляет собой суперпозицию высоко-частотного белого (F_{WN}) и коррелированного красного (F_{RN}) шумов, $F_n = F_{WN} + F_{RN}$. Белый шум представляется собой временной ряд случайных величин, равномерно распределенных в интервале $[-N, N]$. Значение N выбрано, исходя из выбранного значения отношения сигнала к шуму $S/N = 5; 10$. Каждой модели M_i соответствует свой уникальный шумовой ряд $F_{WN i}$, на основе которого строится временной ряд красного шума $F_{RN i}$. Фурье спектр красного шума для каждой частоте Фурье-сетки частот (f_j) вычисляется по формуле $F_{WN ij} / f_j$ частоты, где $j = 0..m-1$, m – число Фурье-частот. К полученному таким образом спектру применяется обратное преобразование Фурье, а восстановленный временной ряд является красным шумовым сигналом F_{RN} .

Окончательный временной ряд, входящий в базу синтетических временных профилей, задается в виде суммы всех компонент: $F = F_{\text{trend}} + F_n + F_{\text{КПП}}$. Временной профиль нормируется на максимум: $F = F / \max(F)$.

Результаты

Предварительное тестирование методов на синтетических временных рядах показало, Фурье-методы оказались чувствительнее методов EMD и вейвлет, разделяя компоненты на меньшем расстоянии Δf .

На рис. 1 и рис. 2 приведены примеры спектрально разрешенных и спектрально неразрешенных компонент.

Рис. 1. Результаты для модели с входными параметрами: $f_1 = 0.109$, $f_2 = 0.111$, $\Delta f = 0.003$, $Q = 6$, $S/N = 10$, $S = 0.3$, $\sigma = 60$. (a) Синтетический временной ряд и его EMD-тренд. (b) Ряд без тренда и значимая EMD-мода. (c) Фурье-спектр полного ряда с трендом. (d) EMD-спектр полного ряда. Значимая компонента показана закрашенным кружком. (e) Фурье-спектр ряда без тренда. (f) Вейвлет-спектр и (g) глобальный вейвлет-спектр ряда без тренда.

Рис. 2. То же, что и на рис. 1, но для входных параметров: $f_1 = 0.109$, $f_2 = 0.186$, $\Delta f = 0.077$, $Q = 10$, $S/N = 10$, $S = 0.3$, $\sigma = 60$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-52-10001 Ко-а.

Литература

1. Kupriyanova et al. // Sol. Phys., 2013, V. 284, I. 2, p 559.
2. Broomhall et al. // Astrophys. J. Suppl. Ser., 2019, accepted.
3. Nakariakov et al. // Plasma Phys. Control. Fus., 2019, v. 61, id. 014024.