

НОВЫЙ ПОДХОД К ВОССТАНОВЛЕНИЮ ФУНКЦИИ ОТКЛИКА В ПРИЛОЖЕНИИ К АСТРОНОМИЧЕСКИМ НЕРАВНОМЕРНЫМ ВРЕМЕННЫМ РЯДАМ

Е.В. Шимановская, В.Л. Окнянский, Е.А. Бруевич

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, Государственный астрономический институт им. П.К.Штернберга, Москва, Россия

e-mail: eshim@sai.msu.ru, oknyan@mail.ru, red-field@yandex.ru

Аннотация. Предлагается новый подход к восстановлению функции отклика излучающих областей астрономических объектов, сочетающий в себе кросс-корреляционный анализ неравномерных временных рядов наблюдений и метод регуляризации Тихонова. Восстановленную функцию отклика можно использовать для изучения структуры и физических свойств области излучения путем сравнения с функциями отклика, предсказанными различными моделями.

Ключевые слова: некорректные обратные задачи, интегральное уравнение Фредгольма 1 рода типа свертки, функция отклика, неравномерные ряды, внегалактическая астрономия, активные ядра галактик, кросс-корреляционный анализ

NEW APPROACH TO RECONSTRUCTION OF THE RESPONSE FUNCTION FOR ASTRONOMICAL UNEVENLY SPACED TIME SERIES

Abstract. A new approach to reconstruction of the emitting medium response function for astronomical objects is suggested. It combines the cross-correlation analysis of observational unevenly spaced time series and Tikhonov regularization. Reconstructed response function can be used to investigate the structure and physical properties of the emitting medium though comparison with response functions, predicted by different models.

Key words: ill-posed inverse problems, Fredholm integral equation, convolution equation, response function, unevenly spaced time series, extragalactic astronomy, active galactic nuclei, reverberation mapping

В астрофизике достаточно типичной является ситуация, когда из наблюдений объекта регистрируются два сигнала $F_1(t)$ и $F_2(t)$, где $F_2(t)$ является результатом преобразования сигнала $F_1(t)$ в некоторой физической среде:

$$F_2(t) \sim const + \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\tau) F_1(\tau - t) d\tau \quad (1)$$

Функция отклика $\psi(\tau)$ определяется геометрией и физическими свойствами этой среды. Как правило, эти особенности являются ключевыми для моделей исследуемых объектов. Примерами таких задач являются исследования связи переменности континуума и широких эмиссионных линий в активных галактических ядрах, переменности континуума в оптическом и ИК диапазонах. В первом случае излучение центрального источника переизлучается плотными облаками в эмиссионных линиях. Во втором случае переменное коротковолновое излучение центрального источника переизлучается пылевыми облаками. В обоих случаях для понимания физики и геометрии объектов важно получить из наблюдений функцию $\psi(\tau)$, которую затем можно сравнить с функциями отклика, предсказанными различными моделями.

Типичной проблемой астрономических наблюдений является их неравномерность распределения во времени. Эта особенность не позволяет применять математические методы для получения $\psi(\tau)$ непосредственно из соотношения (1). Существует ряд методов кросс-корреляционного анализа неравномерных временных рядов, позволяющих получить кросс-корреляционную функцию двух кривых блеска на равномерной сетке. При этом легко показать, что кросс-корреляционная функция CCF_{F_1, F_2} является сверткой авто-корреляционной функции ACF_{F_1} с функцией отклика ψ :

$$CCF_{F_1, F_2}(t) \sim \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\tau) ACF_{F_1}(\tau - t) d\tau \quad (2)$$

Относительно $\psi(\tau)$ уравнение (2) представляет собой интегральное уравнение Фредгольма 1 рода типа свертки, являющееся классической некорректно-поставленной обратной задачей. Для ее решения можно применить метод регуляризации Тихонова. Решение, полученное на пространстве функций, интегрируемых с квадратом, представлено на рис. 1. Используя априорную информацию, можно получить функцию отклика с другими свойствами гладкости. Наличие двух максимумов в функции отклика характерно для некоторых моделей.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-02-01274

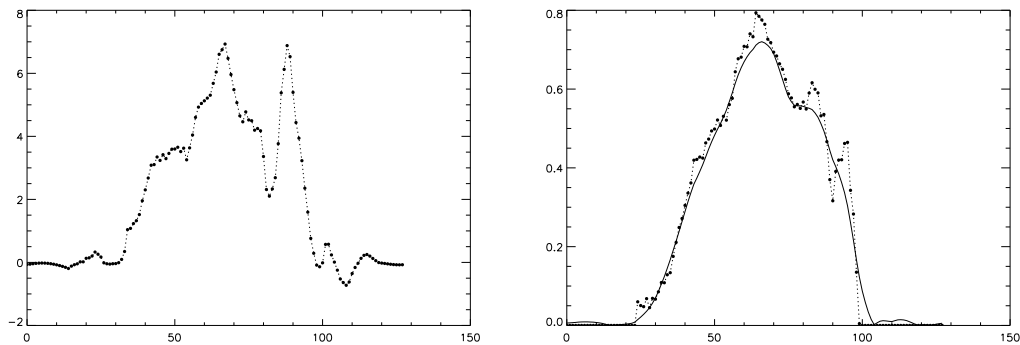


Рис. 1: Функция отклика, полученная из наблюдений NGC 7469 с помощью предлагаемого подхода (слева); кросс-корреляционная функция CCF_{F_V, F_K} для NGC 7469 (справа), сплошная линия соответствует найденной функции отклика

Литература

1. Гончарский А.В., Черепашук А.М., Ягола А.Г. Некорректные задачи астрофизики. М.: Наука, 1985. 352 с.
2. Леонов А.С. Решение некорректно поставленных обратных задач: Очерк теории, практические алгоритмы и демонстрации в МАТЛАБ. Либроком, 2010. 336 с.
3. Oknyansky V.L. et al. Correlation of Near-Infrared and Optical Variability of NGC 4151 in 2008–2013 // Astronomy Letters, 2014, V. 40, No. 9, pp. 527-536
4. Oknyansky V.L. et al. The relative wavelength independence of IR lags in AGNs: implications for the distribution of the hot dust // Odessa Astronomical Publications, 2015 (in preparation)
5. Suganuma M. et al. Reverberation Measurements of the Inner Radius of the Dust Torus in Nearby Seyfert 1 Galaxies // Astrophysical Journal, 2006, V. 639, 1, pp. 46-63
6. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В., Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990.