

Исследование частотно-фазовой синхронизации в динамике показателей солнечной активности методами неравновесной статистической физики

© Д.Э. Аверкиев, С.А. Демин, О.Ю. Панищев

Казанский (Приволжский) федеральный университет,
420008 Казань, Россия
e-mail: aver263@gmail.com

Поступило в Редакцию 26 апреля 2024 г.

В окончательной редакции 18 июля 2024 г.

Принято к публикации 30 октября 2024 г.

Для понимания физико-химических процессов, реализуемых в конвективной зоне и внешних слоях атмосферы Солнца в рамках формализма функций памяти, проведена параметризация корреляций и эффектов частотно-фазовой синхронизации, выявляемых в цюрихском ряде чисел Вольфа и наборе радиочастотных сигналов в метровом диапазоне. Вычислены характеристики спектров мощности кросскорреляционных функций и функций памяти, позволяющие оценить степень проявления частотно-фазовой синхронизации между указанными сигналами. Определены типы статистической памяти и пространственно-временные характеристики в одновременно регистрируемых сигналах.

Ключевые слова: солнечная активность, формализм функций памяти, перекрестные корреляции, частотно-фазовая синхронизация, эффекты статистической памяти, радиоизлучение.

DOI: 10.61011/JTF.2024.12.59241.340-24

Солнечная активность и космическое излучение являются объектом изучения во многих науках, среди которых астрофизика, астрономия и науки о сложных системах. Данные, отражающие активность солнечного и космического излучений, могут быть представлены в различных видах, среди которых числа Вольфа (индекс солнечной активности, относительное число солнечных пятен), разные частотные диапазоны радиоволн (например, индекс солнечной активности F10.7), а также энергетические характеристики, связанные с потоком элементарных частиц от удаленных объектов и выбросами солнечной плазмы [1,2]. Ранее ученые с помощью спектрального анализа чисел Вольфа установили, что магнитный цикл Солнца нестационарен и имеет период в 22.3 года [3]. В исследовании [4] авторы разработали метод оцифровки сигналов с очень высокими энергиями (излучения Черенкова), испускаемых астрофизическими объектами. В работе [5] было проведено исследование корреляций временных рядов чисел Вольфа и их производных, в ходе которого была установлена связь солнечных пятен и магнитной энергии.

Космическое излучение может быть связано с индексами солнечной активности. Так, в работе [6] с помощью математического метода была установлена высокая корреляция между интенсивностью космических лучей и числом пятен на Солнце, что может свидетельствовать о влиянии активности Солнца на поток космических лучей. Высокая корреляция сигналов также наблюдается между различными частотами радиоизлучения Солнца. В исследовании [7] показано, что корреляция между сигналами на частотах 161 и 2800 MHz, 245 и 2800 MHz выше, чем на частотах 161 и 245 MHz. Возможность оценки мощности излучения Солнца на

частоте 2800 MHz на основе величины потока на более низких частотах показана в работе [8].

Целью настоящего исследования является анализ перекрестных корреляций и частотно-фазовой синхронизации между динамическими переменными в одновременно фиксируемых астрофизических сигналах — индексах активности Солнца, таких как числа Вольфа (W) и радиоизлучение, фиксируемое на различных частотах в метровом диапазоне. Частотно-фазовая синхронизация понимается как проявление определенных соотношений между характерными амплитудами, частотами и фазами возбуждений временных сигналов, генерируемых верхними слоями атмосферы Солнца. Анализ эффектов синхронизации показателей солнечной активности является необходимым условием для исследования механизмов самоорганизации и коллективных процессов при формировании солнечных структур. Экспериментальные данные солнечной активности были взяты из открытых интернет-источников (база данных национального центра экологической информации — NCEI). Исследовались сигналы, фиксируемые ежедневно с 2007 по 2015 годы в период 24-го цикла солнечной активности.

Анализ выполнялся в рамках авторского теоретического подхода для анализа временных сигналов сложных систем негамильтоновой природы — формализма функций памяти. Метод представляет собой конечно-разностный аналог кинетических уравнений Цванцига-Мори, которые связывают нормированную кросскорреляционную функцию (ККФ) с функциями статистической памяти [9,10]. Данный метод основан на представлении динамики исследуемого процесса в виде многомерного вектора состояния, подчиняющегося уравнению движения, записанному в дискретном виде. Использо-

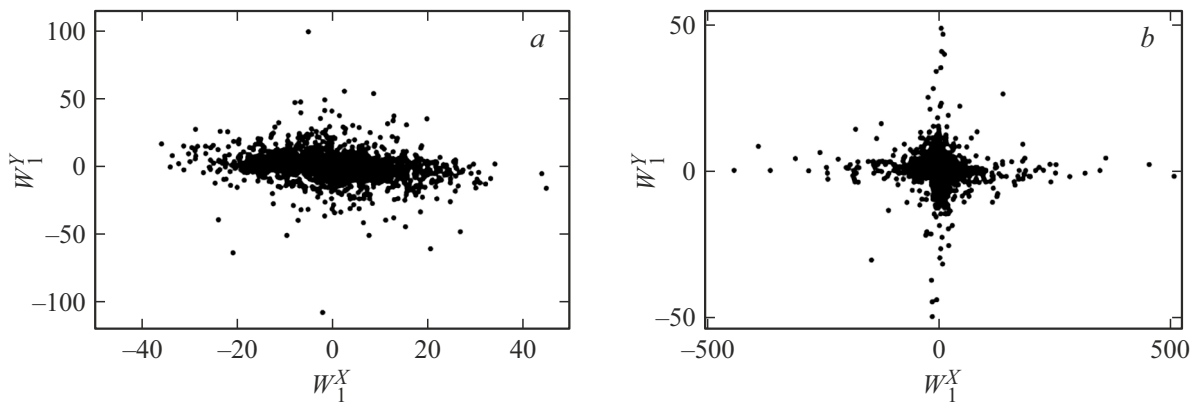


Рис. 1. Фазовые портреты, составленные комбинацией ортогональных динамических переменных индексов солнечной активности: числа Вольфа и радиосигнала на частоте 4995 MHz (*a*), радиосигналов на частотах 15 400 и 610 MHz (*b*).

ние проекционной техники Цванцига-Мори и процедуры ортогонализации Грама-Шмидта позволяет провести сокращение в описании. В рамках метода для исследуемых временных серий X и Y — одновременно фиксируемых индексов солнечной активности строится цепочка конечно-разностных зацепляющихся кинетических уравнений типа Цванцига-Мори для ККФ и функций статистической памяти. Непосредственно из экспериментальных данных рассчитываются фазовые портреты динамических переменных, отражающие пространственно-временную структуру временных сигналов: отклонения от средних значений фиксируемого параметра приводит к деформации фазового портрета; спектры мощности ККФ и функций статистической памяти, позволяющие выявить периодические закономерности, а также степень проявления эффектов частотно-фазовой синхронизации между сигналами X и Y ; частотную зависимость кросскорреляционного параметра немарковости, характеризующего степень проявления эффектов статистической памяти. Математические соотношения для расчета указанных характеристик представлены в работах [9,10].

В настоящей работе мы рассматриваем большой набор экспериментальных данных — комбинации различных индексов солнечной активности, вследствие чего приводятся только производные рассчитываемых характеристик: максимальные значения спектров кросскорреляционных функций памяти и значения параметра немарковости на нулевой частоте. Кроме того, мы представляем репрезентативные фазовые портреты, демонстрирующие основные типы пространственно-временной структуры анализируемых сигналов.

Особенности пространственно-временной структуры сигналов были исследованы на основе фазовых портретов, составленных комбинацией ортогональных динамических переменных [9,10]. В качестве примера на рис. 1 приведены фазовые портреты для сигналов: числа Вольфа и радиосигнала на частоте 4995 MHz (рис. 1, *a*), радиосигналов на частотах 15 400 и 610 MHz (рис. 1, *b*). Изучение всей совокупности фазовых портретов показало, что такие формы наиболее распространены, различия

были установлены только в пространственных размерах и углах наклона портрета относительно осей. Можно также отметить отсутствие расслоения на несколько частей в структуре портретов, что может свидетельствовать о высокой коррелированности между сигналами.

Анализ эффектов синхронизации сигналов солнечной активности выполнен на основе исследования спектров мощности соответствующих ККФ и функций статистической памяти [9,10]. В ходе анализа всей совокупности спектров мощности функций памяти было установлено, что синхронизация двух сигналов может проявляться как на всем диапазоне частот, так и в низко-, средне- или высокочастотных областях. Также для спектров мощности характерно наличие одной или нескольких резонансных частот, которые дополняются дополнительными периодическими процессами. На рис. 2, *a–c* представлены максимальные значения спектральной плотности мощности — уровня частотно-фазовой синхронизации в функциях памяти 1-го (рис. 2, *a*), 2-го (рис. 2, *b*), 3-го (рис. 2, *c*) порядков для индексов солнечной активности X и Y в логарифмическом масштабе. В ходе анализа максимальных значений синхронизации было установлено, что в среднем она имеет особенность усиливаться с уменьшением частот радиоизлучения. Наиболее значимая синхронизация наблюдается также между последовательностью чисел Вольфа и сигналами низкочастотного диапазона (245, 410 MHz). Это установлено не только при взаимодействии индекса X с Y (слева на графиках относительно диагонали, когда индексы X и Y совпадают — случай автокорреляции), а также при взаимодействии индекса Y с X (справа на графиках относительно диагонали).

Количественная характеристика эффектов статистической памяти анализируемых сигналов определялась с помощью кросскорреляционного параметра немарковости [9,10]. Параметр немарковости первоначально выступал простой количественной мерой, позволяющей сопоставить времена релаксации ККФ и функций статистической памяти. В работах [9,10] мы предлагаем частотную зависимость параметра немарковости, рас-

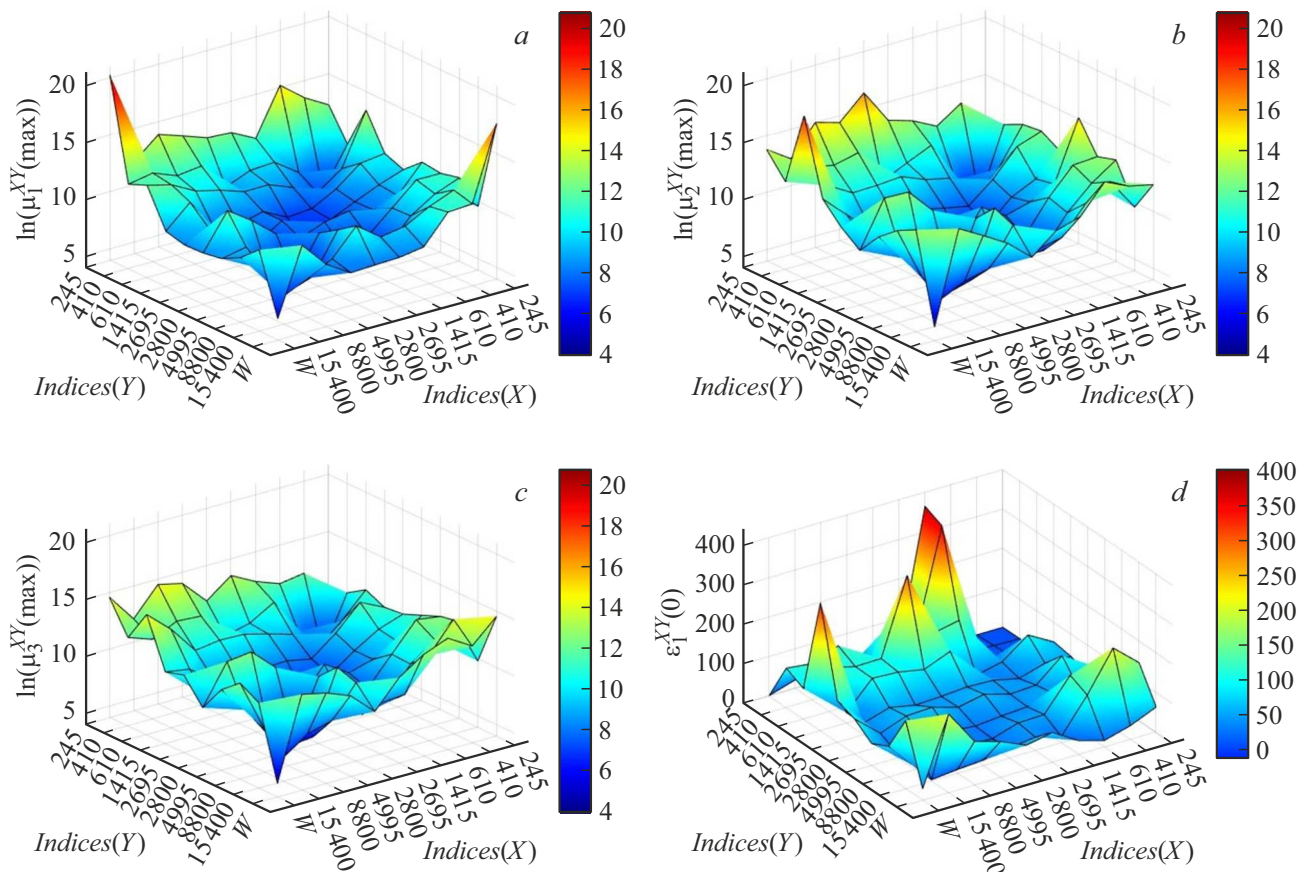


Рис. 2. Максимальные значения спектральной плотности мощности — уровня частотно-фазовой синхронизации функций памяти $\mu_i^{XY}(\max)$ 1-го (a), 2-го (b), 3-го (c) порядков для индексов солнечной активности X и Y в логарифмическом масштабе (W — безразмерное число Вольфа, единицы измерения остальных индексов — МГц); значения параметра немарковости на нулевой частоте $\epsilon_1^{XY}(0)$ для соответствующих сигналов (d).

считываемую из спектральных плотностей мощности ККФ и функций памяти. Для проведения количественной оценки степени проявления эффектов памяти в сигналах X и Y рассчитываются значения параметра на нулевой частоте $\epsilon = \epsilon_1^{XY}(0)$. В зависимости от значений указанного параметра выделяются процессы с сильной статистической памятью $\epsilon \sim 1$ (немарковские процессы), с умеренной памятью $\epsilon \sim 1$, с короткой памятью $\epsilon \gg 1$ (марковские процессы). На рис. 2, d приведены значения первой точки параметра немарковости на нулевой частоте для комбинаций индексов солнечной активности. Трехмерное представление позволяет установить какой тип статистической памяти проявляется для определенной комбинации сигналов. Анализ значений данного параметра показал, что в большинстве случаев во взаимной динамике исследуемых сигналов преобладают немарковские эффекты и умеренная память (например, в динамике сигналов на частоте 410 и 245 МГц, 610 и 245 МГц).

Таким образом, было проведено исследование эффектов частотно-фазовой синхронизации, а также определение характера проявления статистической памяти в одновременно фиксируемых астрофизических сигналах —

характеристиках солнечной активности. Представлены результаты анализа спектров мощности ККФ, функций памяти, фазовых портретов и частотно-зависимого параметра немарковости.

Полученные результаты после дальнейшей верификации (например, они могут быть дополнены исследованием частотно-фазовой синхронизации рассматриваемых индексов солнечной активности в рамках фликкершумовой спектроскопии [11,12]) позволят получить информацию о строении и физических свойствах солнечной атмосферы [13], а также о коллективных явлениях, связанных со вспышками на Солнце. Изучение радиоизлучения в широком диапазоне может быть использовано для прогнозирования на поверхности Солнца активных образований (факелов, пятен).

Финансирование работы

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета („Приоритет—2030“).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] G.A. Gusev, V.A. Chechin, B.N. Lomonosov, V.A. Ryabov. NIM A, **662**, 103 (2012). DOI: 10.1016/j.nima.2010.11.152
- [2] V.V. Borog, I.O. Ivanov, A.V. Kryanev, S.F. Timashev. Phys. Procedia, **74**, 336 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.252
- [3] L.B. Tsirulnik, T.V. Kuznetsova, V.N. Oraevsky. ASR, **20**, 2365 (1997). DOI: 10.1016/S0273-1177(97)00908-3
- [4] N.I. Moseiko, A.I. Klimov, V.G. Sinitsyna, V.Y. Sinitsyna, K.A. Balygin, S.S. Borisov, A.M. Kirichenko, R.M. Mirzafatikhov, I.E. Ostashev. NIM A, **952**, 161755 (2020). DOI: 10.1016/j.nima.2018.12.070
- [5] S.V. Starchenko, S.V. Yakovleva. Geomagn. & Aeronomy, **62** (6), 685 (2022). DOI: 10.1134/S0016793222050164
- [6] D. Sierra-Porta, M. Tarazona-Alvarado, Jorge Villalba-Acevedo. ASR, **72**, 638 (2023). DOI: 10.1016/j.asr.2023.02.044
- [7] А.Г. Сетов, Д.С. Кушнарев. Солнечно-Земная Физика, **9** (4), 54 (2023). DOI: 10.12737/szf-94202306 [A.G. Setov, D.S. Kushnarev. Solar-Terrestrial Phys., **9** (4), 46 (2023). DOI: 10.12737/stp-94202306]
- [8] М.Ю. Филиппов, Н.А. Ходатаев. Труды БИФФ «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, 2019), с. 226. [M.Y. Filippov, N.A. Khodataev. in *Proc. of BSFP Physical processes in space and near-Earth space* (The Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 2019), p. 226.]
- [9] O.Y. Panishev, S.A. Demin, J. Bhattacharya. Physica A, **389**, 4958 (2010). DOI: 10.1016/j.physa.2010.06.026
- [10] S. Demin, O. Panishev, V. Yunusov, S. Timashev. Studies in Systems, Decision, and Control, **350**, 27 (2021). DOI: 10.1007/978-3-030-67892-0_3
- [11] S.A. Demin, Y.A. Nefedyev, A.O. Andreev, N.Y. Demina, S.F. Timashev. ASR, **61** (2), 639 (2018). DOI: 10.1016/j.asr.2017.06.055
- [12] S.A. Demin, V.A. Yunusov, S.F. Timashev, A.V. Minkin. High Energy Chem., **57**, S19 (2023). DOI: 10.1134/S0018143923070081
- [13] S.A. Demin, V.A. Yunusov, A.V. Minkin, N.Y. Demina. High Energy Chem., **58**, S125 (2024). DOI: 10.1134/S0018143924700735