

Метод анализа нестационарных сигналов на основе декомпозиции данных и вейвлет-преобразования

Б.С. Мандрикова

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН

Камчатский край, Паратунка, Россия
555bs5@mail.ru

О.И. Есиков

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В. И. Ульянова (Ленина)

Санкт-Петербург, Россия
oiesikov@stud.etu.ru

Аннотация — Предложен новый автоматизированный метод анализа нестационарных сигналов сложной структуры. Метод включает операции анализа сингулярного спектра, дискретного вейвлет-преобразования и пороговых функций. Представлен алгоритм численной реализации метода. Показано применение метода к данным нейтронных мониторов (вторичные космические лучи). Эмпирически доказано, что совмещение декомпозиции данных с вейвлет-преобразованием позволяет детектировать аномалии в сигнале космических лучей. Результат важен для прогноза космической погоды.

Ключевые слова — нестационарный сигнал, аномалии, вейвлет-преобразование, анализ сингулярного спектра, нейтронные мониторы.

1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всего периода своего существования человечество непрерывно совершало технический прогресс. В настоящий момент для решения практических задач, многие из которых уже давно стали повседневными, люди активно используют различные технические объекты и средства связи. Работоспособность объектов программно-аппаратной инфраструктуры, а также поддержка бесперебойной связи во многом зависит от состояния космической погоды [1]. Негативные воздействия космической погоды подвергают опасности громадное количество различных объектов наземной и космической инфраструктуры [2]: системы телесвязи, радиосвязи, спутниковой связи, нефтепроводы и газопроводы, линии электропередач, спутники, системы позиционирования GPS, ГЛОНАСС, Galileo, а также могут повлечь сбой в работе электроники [2, 3, 4].

Значимым фактором космической погоды является интенсивность космических лучей (КЛ). Сигнал КЛ может включать регулярные (периодические) и аномальные (непериодические) вариации [5]. Последние, как правило, наблюдаются в периоды магнитосферных возмущений. Поскольку сигнал КЛ является нестационарным, содержит шумы аппаратного и природного происхождения, детектирование аномальных вариаций является особо актуальной и сложной задачей. На данный момент ещё не разработано математического аппарата, который позволял бы с удовлетворительной точностью и эффективностью определять наступление таких событий [6].

В докладе представлен новый метод детектирования аномальных вариаций в данных КЛ на основе

применения операций анализа сингулярного спектра, дискретного вейвлет-преобразования и пороговых функций. Анализ сингулярного спектра не зависит от типа значимых компонент ряда, позволяет исследовать нестационарные временные ряды и выполнить очистку сигнала от шумовых составляющих [7]. Вейвлет-преобразование позволяет провести детальный частотно-временной анализ нестационарного сигнала [8]. Для снижения риска наступления ложной тревоги предложено применение адаптивных пороговых функций.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Предлагаемый метод анализа нестационарных сигналов на основе декомпозиции данных и вейвлет-преобразования включает следующие операции:

1. Преобразование исходного одномерного ряда в траекторную матрицу:

$$X_i = (f_{i-1}, \dots, f_{i+L-2})^T, 1 \leq i \leq N - L + 1,$$

где f_i – элемент исходного ряда, L – длина окна, N – длина исходного ряда.

2. Сингулярное разложение траекторной матрицы:

$$X = \sum_i \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T,$$

где $\sqrt{\lambda_i}$ – сингулярное число, U_i – левый сингулярный вектор траекторной матрицы, V_i – правый сингулярный вектор траекторной матрицы.

3. Группировка множества индексов на m непересекающихся подмножеств. Результирующая матрица, соответствующая группе:

$$X_i = X_{i_1} + \dots + X_{i_p},$$

где $\{i_1, \dots, i_p\}$ – индексы группы.

4. С помощью применения диагонального усреднения [9] каждая результирующая матрица сгруппированного разложения преобразуется в новый ряд $F^{(s)}$ длины N . Восстановленный ряд определяется следующим образом:

$$F = \sum_i F_i^{(s)}, \quad (1)$$

5. Применение непрерывного вейвлет-преобразования

$$WF(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} F \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi^* \left(\frac{t-u}{s} \right) dt, \quad (2)$$

где Ψ – вейвлет, u – сдвиг во времени, s – масштаб, $s \neq 0$, $s, u \in R$.

6. Применение пороговой функции:

$$P_{T_s^l}[WF(u, s)] = \begin{cases} WF(u, s), & |WF(u, s)| \geq T_s^l \\ 0, & |WF(u, s)| < T_s^l \end{cases}, \quad (3)$$

где $T_s^l = q \times \sigma_s^l$, σ_s^l – среднеквадратическое отклонение коэффициентов, рассчитанное в скользящем окне длины l , q – пороговый коэффициент.

7. Оценка интенсивности аномалий в момент времени $t = u$:

$$E(u) = \sum_s P_{T_s^l}[WF(u, s)]. \quad (4)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

На Рис. 1 представлен результат применения метода к данным нейтронного монитора (НМ) ст. Оулу за период с 8 по 29 марта 2022 г. На Рис. 1а изображены исходные данные НМ [10], на Рис. 1б представлен результат операции (1) при $I = \{i_1, \dots, i_2\}$, на Рис. 1в и 1г показаны результаты применения операций (2) и (3) соответственно. Красными вертикальными линиями отмечены моменты регистрации геомагнитных бурь по данным [11].

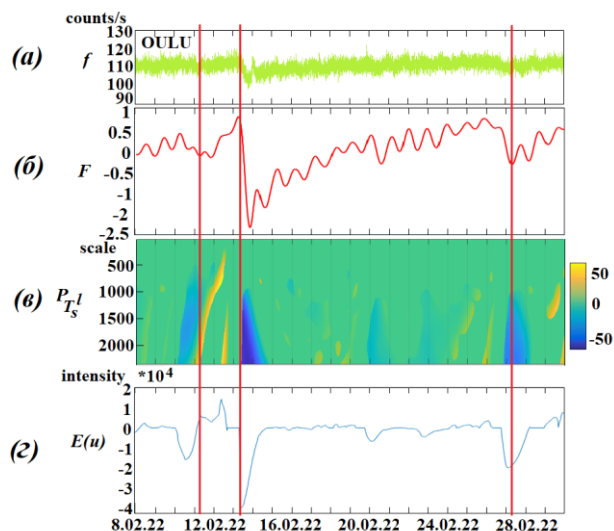


Рис. 1. Результат применения метода: (а) данные НМ ст. Оулу, (б) результаты применения операции (1) при $I = \{i_1, i_2, i_3\}$, (в) результаты применения операций (2) и (3), (г) результаты применения операции (4)

Результаты показывают, что предлагаемый метод позволяет детектировать аномалии разной частотно-

временной структуры в данных КЛ. По исходным данным нейтронного монитора визуально определить момент наступления геомагнитных бурь 11 и 27 марта не представляется возможным. Применение метода позволяет не только детектировать момент начала геомагнитной бури (Рис. 1в), но и оценить ее интенсивность и продолжительность (Рис. 1г). Результат демонстрирует эффективность метода для анализа вторичных космических лучей, а также подтверждает важность учета интенсивности КЛ в прогнозе космической погоды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках ГЗ по теме “Физические процессы в системе ближнего космоса и геосфер при солнечных и литосферных воздействиях” (2021–2023 гг.), регистрационный номер АААА-А21-121011290003-0.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Владимирский, Б.М. Космическая погода и наша жизнь / Владимирский, Б.М., Темурьян Н.А., Мартынюк В.С. – Век 2, 2004. – 224 с.
- [2] Кузнецов, В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности / В.Д. Кузнецов // Космическая техника и технологии. – 2014. – Т. 3, №6. – С. 3-13.
- [3] Авакян, С.В. Влияние магнитных бурь на аварийность систем электроэнергетики, автоматики и связи / С. В. Авакян, Н. А. Воронин, К. А. Дубаренко // Материаловедение. Энергетика. – 2012. – Т. 3-2, №154. – С. 253-266.
- [4] Severe Space Weather Events — Understanding Societal and Economic Impacts / A Workshop Report. Washington DC. The National Academies Press, – 2009.
- [5] Топтыгин, И.Н. Космические лучи в межпланетных магнитных полях / И. Н. Топтыгин. – М.: Наука, 1983. – 304 с.
- [6] Акасофу, С.И. Солнечно-земная физика / С.И. Акасофу, С. Чепмен. – М.: Мир, 1972. – 384 с.
- [7] Кашкин, В. Б. Применение сингулярного спектрального анализа для выделения слабо выраженных трендов / В. Б. Кашкин, Т. В. Рублева // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2007. – Т. 311, №. 5. – С. 116-119.
- [8] Каплинский, А.Е. Анализ временных рядов наблюдений характеристик байкальского аэрозоля с помощью вейвлет-преобразования / А.Е. Каплинский, О.Г. Хуторова // Ползуновский вестник. – 2010. – Т. 1. – С. 160-164.
- [9] Голяндина, Н. Э. Варианты метода «Гусеница»-SSA для анализа многомерных временных рядов / Н. Э. Голяндина, В. В. Некруткин, Д. Степанов // Труды II Международной конференции «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO. – 2003. – Т. 3. – С. 2139-2168.
- [10] Real Time DB of NM. [Electronic resource]. — Access mode: www.nmdb.eu (01.11.2022).
- [11] Forecast of space weather according to the data of Federov IAG. [Electronic resource]. — Access mode: http://ipg.geospace.ru (01.11.2022).