



ВЕЙВЛЕТ-КОГЕРЕНТНОСТЬ КАК ИНСТРУМЕНТ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Дейнеко Ж.В., к.т.н., доцент кафедры МСТ, ХНУРЭ

Золотухин О.В., к.т.н., доцент кафедры ИИ, ХНУРЭ

Анализ и обработка последовательностей данных, представленных в форме временных рядов, является одной из распространенных методологий изучения различных процессов и явлений, относящихся к различным сферам деятельности и научных исследований. Многие данные о явлении или изучаемом процессе часто представлены в виде временного ряда. Банковский сектор, рынок ценных бумаг, медицина, графические изображения – это далеко не полный перечень сферы анализируемых процессов, когда исходные данные представлены временным рядом или когда исходные данные могут быть преобразованы во временной ряд. Обработка и анализ последовательностей данных с использованием вейвлет-декомпозиции и последующего анализа всех соответствующих коэффициентов такого разложения является одним из методов изучения различных процессов и явлений. Методика вейвлет-анализа позволяет выявлять в исследуемом сигнале различные нестационарные процессы, связанные с локальными кратковременными процессами. Вейвлет-преобразование обеспечивает двумерную развертку одномерной реализации, при этом частота и время рассматриваются как независимые переменные.

Многие изучаемые процессы и явление могут иметь довольно сложную структуру. Вейвлет-анализ преобразует исходные данные в иерархическую структуру с определенным набором вейвлет-коэффициентов. Основой непрерывного вейвлет-преобразования на временном интервале t является преобразование входного временного ряда $x(t) \in L2(R)$ с использованием материнского вейвлета $\phi(t)$ в ряд вейвлет-коэффициентов:

$$W_x(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \phi\left(\frac{t-u}{s}\right) dt.$$

Здесь: $1/\sqrt{s}$ – коэффициент нормализации, u – локальный параметр, s – параметр изменения масштаба, $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(t) dt = 0$.

Целесообразность вейвлет-анализа в исследовании временных рядов определяется тем, что метод вейвлет-анализа позволяет обнаружить локальные особенности исследуемого временного ряда. Информационные потоки, генерируемые фрактальными временными рядами, обладают свойствами, обнаруженными вейвлет-преобразованием, что делает его еще более информативным. Если сигнал прерывистый, только те вейвлеты будут иметь высокие амплитуды, где максимальное значение появится рядом с точкой разрыва, что позволит обнаружить контур изображения. В то же время точка



разрыва является резким прерывистым переходом в течение некоторого процесса. Количественно его можно оценить по значению первой производной такого процесса, принимая во внимание, что первая производная от прерывистых переходов очень велика. Если переход происходит в виде точки разрыва, то первая производная стремится к бесконечности. Чем резче переход, тем выше значение производной. Плавные переходы будут иметь небольшие производные значения. Это позволит определить наличие специальных характеристик анализируемого процесса, а также момент, в который эти характеристики могут возникнуть [1-2].

Одним из основных методов вейвлет-преобразования, используемых для анализа между различными временными рядами, является вейвлет-когерентность. Она позволяет вычислить локальную корреляцию двух временных рядов в области времени-частоты. В ней используется следующая формализованная модель: когерентность вейвлета в виде квадрата абсолютной величины сглаженных перекрестных всплесковых спектров $W_{xy}(u, s)$ (время (x) и частота (y) временного ряда), нормированная произведением сглаженного спектра вейвлет-мощности каждой серии [3]:

$$R^2(u, s) = \frac{|Q(s^{-1}W_{xy}(u, s))|}{Q(s^{-1}|W_x(u, s)|^2)Q(s^{-1}|W_y(u, s)|^2)},$$

где Q – сглаживающий оператор.

В ходе исследования в качестве материнского был использован вейвлет Морлета, который представляет собой сложный вейвлет с хорошей частотной локализацией. Квадратичный когерентный коэффициент вейвлета находится в диапазоне $0 \leq R^2(u, s) \leq 1$, значения, близкие к нулю, указывают на слабую корреляцию, а значения, близкие к единице, являются свидетельствами сильной корреляции. Таким образом, анализ вейвлет-когерентности дает возможность исследовать взаимосвязи между изучаемыми временными рядами.

В качестве анализируемого временного ряда были использованы экспериментальные данные, описывающие распад ядер тяжелых ионов в одномерном фазовом пространстве [2]. Было проведено сравнение экспериментальных данных с предсказаниями модели ультрарелятивистской квантовой молекулярной динамики (UrQMD), используя вейвлет-когерентность. Данное исследование помогает понять взаимосвязь между теорией и экспериментом, сложные моменты, которые могут при этом процессе возникнуть. Теория предсказывает явления, которые могут быть проверены экспериментально, а эксперименты очень часто дают новое понимание неожиданными результатами, что, в свою очередь, приводит к улучшению теоретического описания. В настоящей работе предпринята попытка найти связь между устойчивостью теоретической модели и экспериментом для изучения особенностей столкновений релятивистского тяжелого иона.

В ходе исследования была рассмотрена вейвлет-когерентность для отдельных пар временных рядов натурального $\log_{p,q}(M)$ (экспериментальные данные и теоретические данные), для моментов $q = 2 - 4$, и для $p = 0,5; 0,9; 1,2; 1,4; 1,6$ [2]. На рис. 1-2 представлены вейвлет-когерентности между выбранными временными рядами. Каждая из следующих фигур обозначает отдельную группу временных рядов, которые соответствуют друг другу. Это сравнение отображается в частотно-временной плоскости.

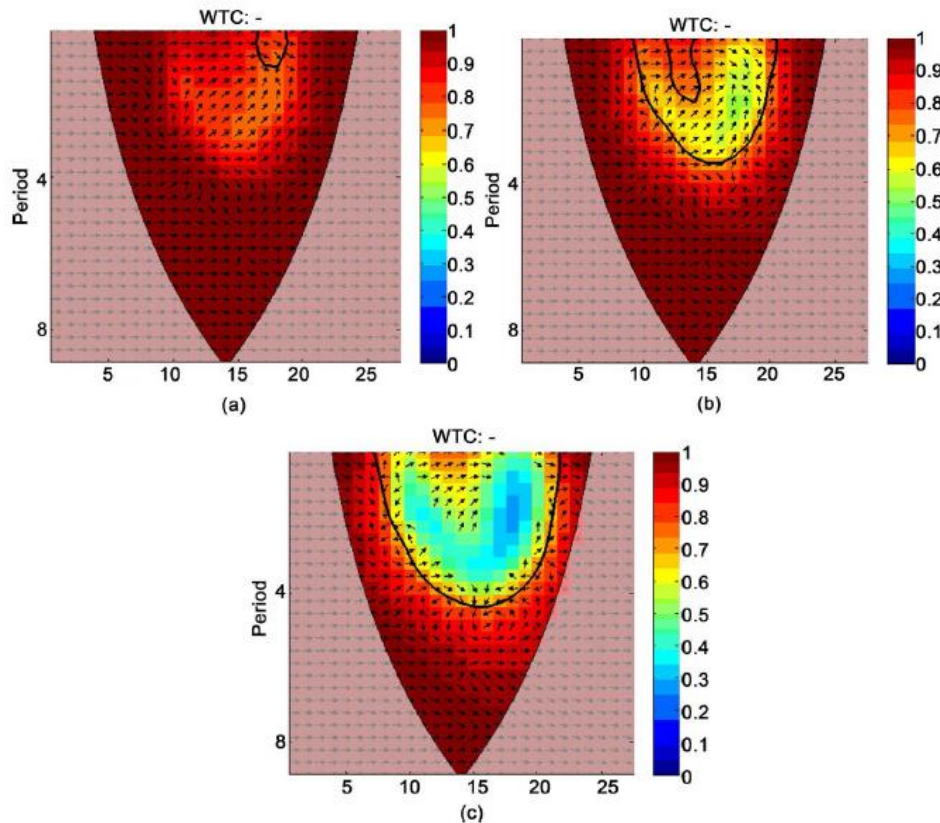


Рисунок 1 – Вейвлет-когерентность между экспериментальными и теоретическими данными для $p = 0,9$: (a) $q = 2$; (b) $q = 3$; (c) $q = 4$.

На вертикальной оси – взвешенные характеристики анализируемых рядов данных в частотном пространстве. Вдоль каждой из фигур масштаб значимости представлен в виде отдельных столбцов для отражений. Максимальное отражение говорит о полной согласованности экспериментальных и теоретических данных. Определенные линии являются проявлением локализации для неоднородностей в изучаемых временных рядах в зависимости от нерегулярностей. Разность фаз, обозначенная стрелками, дает сведения о задержках колебаний двух рассмотренных временных рядов. Стрелки, указывающие направление вправо (влево), когда временные ряды являются синфазными (антифазные) или имеют положительную (отрицательную) корреляцию.

Эксперимент показывает, что с ростом значений q возникает дисбаланс между экспериментальными данными и данными теоретическими. Это наблюдается для всех значений p . С увеличением значений p и при

увеличении значений q дисбаланс между экспериментальными данными и данными теории возрастает.

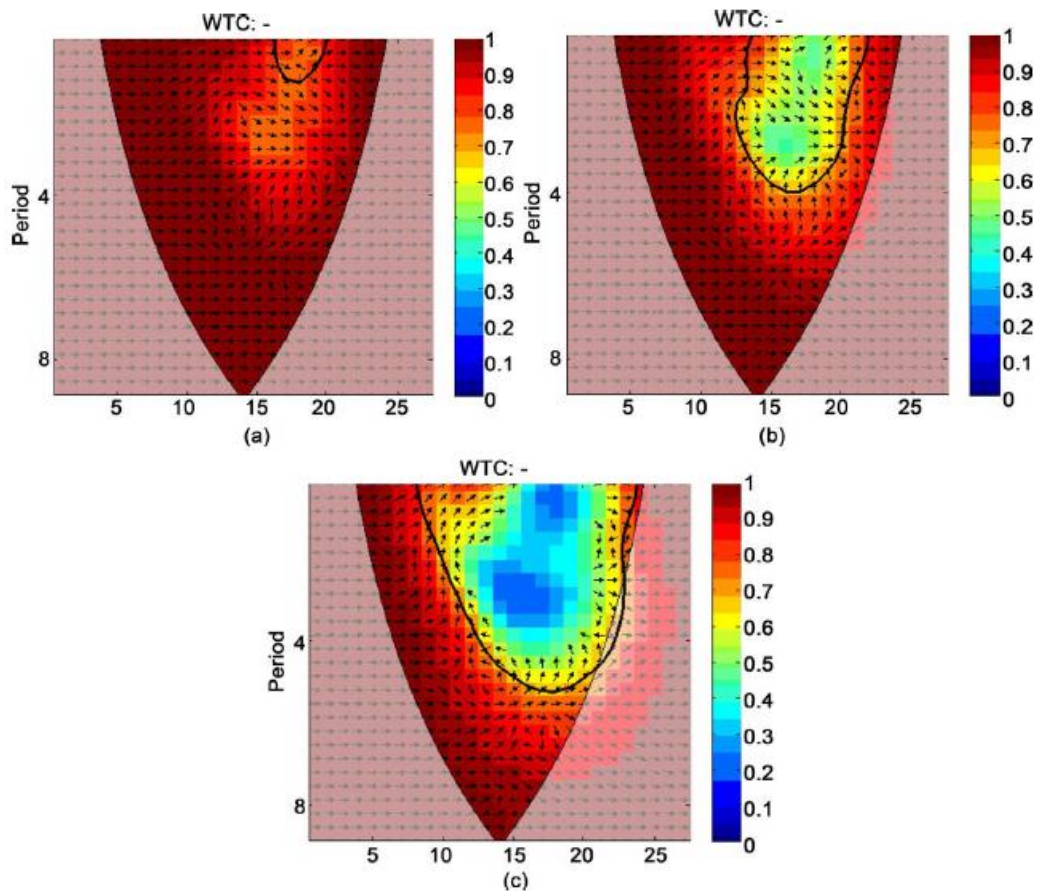


Рисунок 2 – Вейвлет-когерентность между экспериментальными и теоретическими данными для $p = 1, 2$: (a) $q = 2$; (b) $q = 3$; (c) $q = 4$.

Полученные результаты полностью подтверждают подлинность экспериментальных данных. Вейвлет-когерентность свидетельствует о наличии взаимосвязи исследуемых процессов и позволяет диагностировать эти связи. Результаты исследования могут определить подходящее применение методологии вейвлет-анализа как раскрытие вейвлет-когерентности между изучаемыми рядами данных в качестве инструмента визуализации сложных физических процессов.

Список литературы

1. Hurst Exponent as a Part of Wavelet Decomposition Coefficients to Measure Long-term Memory Time Series Based on Multiresolution Analysis / V.V. Lyashenko, R. Matarneh, V. Baranova, Zh.V. Deineko // American Journal of Systems and Software. – 2016. – Vol. 4, No. 2. – P. 51-56.
2. Methodology of Wavelets in Relativistic Heavy Ion Collisions in One Dimensional Phase Space (η -Space) / V.V. Lyashenko, M.A. Ahmad, Zh.V. Deineko, M.H. Rasool // Journal of High Energy Physics, Gravitation and Cosmology. – 2017. – No 3. – P. 254-266.
3. Lyashenko, V. Properties of Wavelet Coefficients of Self-Similar Time Series / V. Lyashenko, Z. Deineko, A. Ahmad // International Journal of Scientific and Engineering Research. – 2015. – Vol.6. – P. 1492-1499.