

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЧТИ-ПЕРИОДИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ СТРУКТУРЫ ТАЙФУНОВ

А.А. Парамонов¹, А.В. Калач^{1,2}

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Российская Федерация

² Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Российская Федерация

E-mail: paramonov_a_a99@mail.ru

Аннотация. Рассмотрен метод преобразования изображений из прямоугольной системы координат в полярную систему с целью для дальнейшего почти-периодического анализа структуры тайфунов на основе обобщённой сдвиговой функции. Основным методом почти-периодического анализа предполагается разделение данных на высокочастотные колебательные составляющие и низкочастотные тренды на основе теории пропорций, что позволяет выделить почти-периодические характеристики.

Показано, что почти-периодический анализ применим к данным изображений как по радиус-вектору, так и углу в полярной системе координат. Примеры анализа горизонтальных и вертикальных сечений изображения демонстрируют наличие значимых почти-периодов, которые соответствуют определённым пиксельным значениям. Для полярной системы координат был проведён почти-периодический анализ углов, который выявил дополнительные почти-периоды, учитывающие периодичность угловых координат. Расширение углового интервала до 720° и 1080° подтвердило устойчивость результатов почти-периодического анализа, что указывает на достаточность двукратного интервала для качественного анализа.

Таким образом, предложенный метод позволяет более точно и эффективно анализировать данные изображений, выявляя значимые почти-периоды, что открывает новые перспективы для прогнозирования и обработки информации в различных научных и прикладных задачах по анализу данных с упорядоченным аргументом.

Ключевые слова: методы анализа данных; данные с упорядоченным аргументом; тренд; нелинейные колебания; почти-период; анализ изображений; чрезвычайные ситуации; тайфуны; преобразование координат.

Введение

Тропические циклоны (тайфуны) представляют собой одно из самых разрушительных природных явлений, сопровождаемых ураганскими ветрами и огромными океанскими волнами, катастрофическими ливнями и вызванными ими наводнениями, оползнями и селевыми потоками, которые наносят колоссальные разрушения объектам инфраструктуры и уносят тысячи человеческих жизней. Необходимо отметить, что, несмотря на уровень развития современных технологий, точность прогнозирования возникновения тропических циклонов и их эволюции недостаточно высокая и является предметом интенсивных исследований учеными разных стран. В связи с данными фактами прогнозирование тропических циклонов представляет собой важную и актуальную научную задачу, направленную на обеспечение гидрометеорологической безопасности населения и отраслей экономики страны. Современный анализ информации позволяет осуществлять трансформацию исходных наборов данных согласно выдвигаемым суждениям и гипотезам в целях упрощения выявления закономерностей и других сведений. Такими преобразованиями могут быть, например, растяжение или сжатие изображения, Фурье-преобразование, кодирование смысловой нагрузки текста в латентные контекстные векторы или смена системы координат. Среди систем координат широко распространённой является прямоугольная декартова система координат, в которой возможно представить описание данных графического вида (например, фото и видео). Положение пикселя на изображении определяется координатами ширины и высоты, а цвет задаётся либо через яркость чёрно-белого оттенка в случае монохромного изображения, либо в виде комбинации яркостей трех или четырехцветных палитр RGB/CMYK.

Известно, что данные спутникового мониторинга тропических циклонов позволяют значительно расширить объем получаемой информации для подготовки объективного прогноза. Одна-

ко для анализа изображений, представляющих графический вид сферических объектов, например, таких, как тропические циклоны (тайфуны), необходимо учитывать циркулярный характер данных и применить к исходной информации преобразование в пространство полярных координат, выбрав в качестве центра построения радиус-векторов геометрический центр исследуемого объекта.

Основная часть

Преобразование изображения из прямоугольной системы координат в полярную проводится с применением тригонометрической функции арктангенса и выражения, известного как евклидова норма. Таким образом, система координат, описывающих положение пикселя с применением ширины и высоты, сменяется парой координат, задающих положение на основе длины радиус-вектора и угла отклонения радиус-вектора от нулевой оси согласно выражениям

$$\rho(x, y) = \sqrt{(x_c - x)^2 + (y_c - y)^2}, \quad \theta(x, y) = \arctan \frac{y_c - y}{x_c - x}, \quad (1)$$

где x_c, y_c – декартовы координаты центра преобразования; x, y – преобразуемые декартовы координаты пикселя; ρ, θ – полярные координаты – длина радиус-вектора и угол.

Таким образом, изображение в декартовых координатах можно преобразовать в полярные координаты для дальнейшего анализа. Пример такого преобразования приведён ниже – исходное изображение представлено на рис. 1, а, красной точкой отмечен центр преобразования в полярные координаты, и на рис. 1, б приведено представление изображения в полярных координатах соответственно.

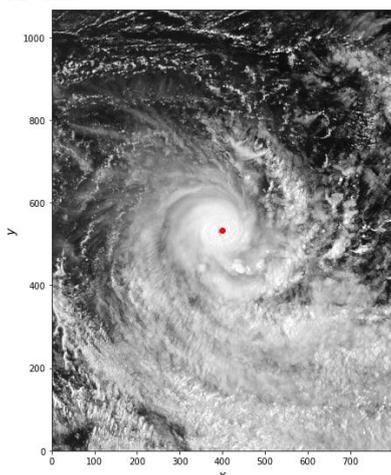


Рис. 1, а. Исходное изображение тропического циклона и центр преобразования данных

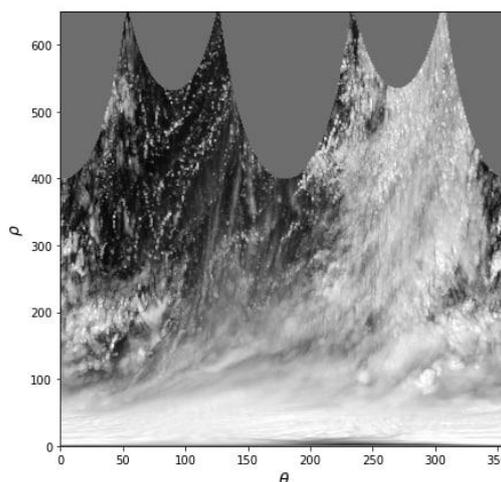


Рис. 1, б. Представление изображения тропического циклона в полярных координатах

Современный набор методов анализа данных имеет длинный список наименований, назначений и принципов работы. Среди прочих можно отдельно выделить методы почти-периодического анализа, в частности – метод, основанный на обобщённой сдвиговой функции [1, 2].

Эффективность метода в различных задачах представлена в ряде работ. Так, в исследовании [1] приведены результаты сравнительного анализа предлагаемого метода с классическим методом Фурье-анализа, основанным на априорных периодических функциях. Следует отметить, что в работе [3] приведены результаты применения почти-периодического анализа на больших данных, представленные эмпирическими значениями замеров атмосферного давления. В экономической области были проведены работы по оценке биржевых [4] и макроэкономических [5] показателей.

Рассматриваемый метод опирается на процедуру разделения высокочастотных колебательных составляющих от низкочастотных трендовых динамик на основе теории пропорций и процесс извлечения почти-периодических характеристик на основе набора данных, лишённых тренда. В качестве независимого метода по разделению трендовой и колебательной составляющих используется метод, основанный на теории пропорций, позволяющий представить данные в координатах:

$$\ln \left(\frac{y_{t-\Delta t} \cdot y_{t+\Delta t}}{y_t^2} \right) \sim t, \quad (2)$$

где y_t – текущее значение; $y_{t-\Delta t}$ – предыдущее значение на расстоянии Δt по аргументу; $y_{t+\Delta t}$ – следующее значение на расстоянии Δt по аргументу.

Полученные в результате разделения колебания затем анализируются на предмет наличия почти-периодов с учётом влияния параметра сдвига Δt :

$$a(\tau, \Delta t) = \frac{1}{n - \tau - 2\Delta t} \cdot \sum_{t=1}^{n-\tau-2\Delta t} \left| \ln \left(\frac{y_{t-\Delta t+\tau} \cdot y_{t+\Delta t-\tau}}{y_{t+\tau}^2} \right) - \ln \left(\frac{y_{t-\Delta t} \cdot y_{t+\Delta t}}{y_t^2} \right) \right|, \quad (3)$$

где n – общее число отсчётов функции $y(t)$; τ – почти-период.

Считая структуры данных подобными временным рядам, почти-периодический анализ можно применить по отношению к данным изображения по горизонтальным или вертикальным срезам в декартовой системе координат так же, как и к срезам по длине радиус-вектора в полярной системе координат. Так, для анализа по горизонтальному сечению изображения (см. рис. 1, а) обобщённая сдвиговая функция имеет следующий срез (см. рис. 2).

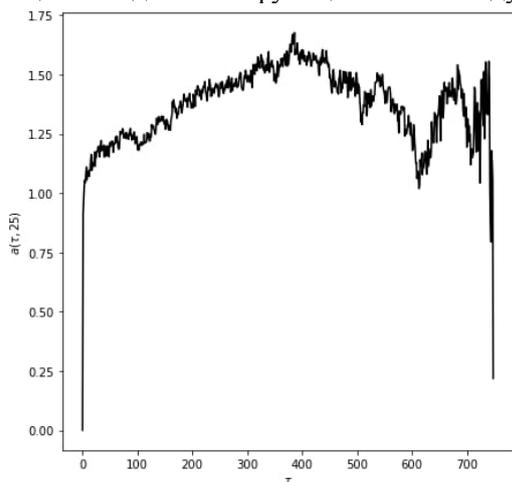


Рис. 2. Срез обобщённой сдвиговой функции горизонтального сечения изображения с рис. 1, а

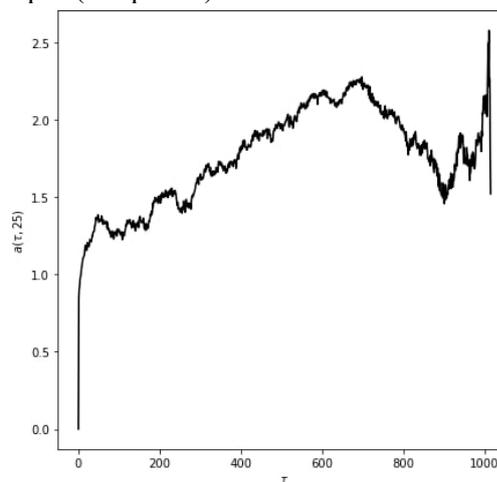


Рис. 3. Срез обобщённой сдвиговой функции вертикального сечения изображения с рис. 1, а

Срез показывает существование почти-периода в локальном минимуме вблизи значения в 600 пикселей. Также есть слабовыраженные локальные минимумы вблизи 100, 350 и 500 пикселей. При этом можно отметить систему малозначимых локальных минимумов в динамике кривой среза – иными словами, есть возможность определить менее значимые почти-периоды в других локальных минимумах, однако их существенность имеет меньший ранг.

Если провести почти-периодический анализ в отношении вертикального сечения изображения, то получится график, представленный на рис. 3.

Данный срез демонстрирует существенный локальный минимум в значении вблизи 900 пикселей, и также менее значимые вблизи 110, 260, 480, 640, 960 пикселей. Также видно, что существуют ещё менее значимые локальные минимумы.

Рассмотрим применение почти-периодического анализа к вертикальному срезу изображения 2, б – соответствующего длине радиус-вектора в полярных координатах (рис. 4).

Срез на рис. 4 демонстрирует более гладкую кривую по отношению к результатам на рис. 2 и 3, что указывает на то, что столбцы преобразованного изображения больше соответствуют классу почти-периодических временных рядов. Также срез демонстрирует существенный локальный минимум вблизи 600 пикселей и менее существенные вблизи 100, 150, 400 пикселей. Значение почти-периода в 600 встречается также и в системе почти-периодов, связанных с горизонтальным сечением декартовых координат изображения, а также близко к величине 640 – одного из существенных почти-периодов вертикального сечения прямоугольной системы координат.

Анализ вышеприведённых сечений единообразен в отношении предположения отношения данных к структуре ряда с упорядоченным аргументом и представляющей собой некоторую последовательность, для которой одной из основных целей анализа является прогнозирование значения вне обозримого диапазона.

Рассмотрим аналогичное исследование в отношении углового (горизонтального) среза исследуемых данных в полярных координатах на интервале значений аргумента $[0^\circ; 359^\circ]$ относительно данных с рис. 2 соответственно (рис. 5).

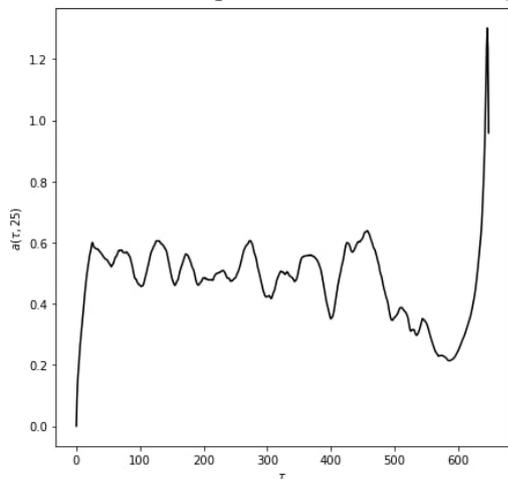


Рис. 4. Срез обобщённой сдвиговой функции вертикального сечения изображения с рис. 2

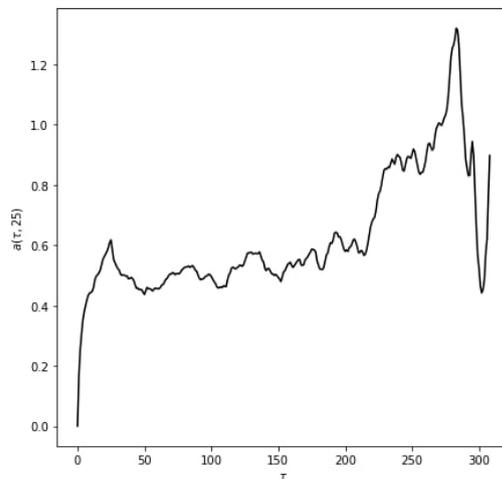


Рис. 5. Срез обобщённой сдвиговой функции горизонтального сечения изображения с рис. 1, б

Однако срезы изображения по угловой составляющей требуют отдельного внимания в отношении применения почти-периодического анализа. Данное суждение основывается на периодичности полярных координат – так, пиксель, находящийся в полярных координатах (ρ, θ) , также находится и в положении $(\rho, \theta + 360)$. Также при существовании углового почти-периода τ_1 должен существовать дополняющий почти-период $\tau_2 = 360 - \tau_1$ согласно периодичности полярных координат.

Сравнение среза с его разворотом согласно тезису о существовании дополняющего периода представлено на рис. 6.

Установлено, что характер существования минимума совпадает, однако локальный минимум почти-периода в 260° не обладает убедительностью ввиду своего недостаточно малого значения. К тому же встаёт вопрос оценки соседнего значения в 240° относительно принадлежности его к классу значений почти-периодов. Если посмотреть на дополняющий почти-период (развернутый срез), то вертикально ниже почти-период находится ровно между ними – в 250° .

Таким образом, возникает проблема несоответствия результатов набора данных естественной природе их описывающей шкалы.

В таком интервале не рассматривается периодическая связь между элементами, расположенными по разные стороны нулевой оси в порядке возрастания угла – так, например, мы не исследуем взаимосвязь между элементами на углах 250° и 13° .

Для решения этой проблемы предлагается рассмотреть расширенный угловой набор данных – исследовать интервал не $[0^\circ; 359^\circ]$, а удвоенный интервал $[0^\circ; 719^\circ]$. В таком случае устанавливается взаимосвязь разделённых нулевой осью элементов, а также рассматриваются большие наборы для оценки дополняющих почти-периодов. Таким образом, новый набор данных примет следующий вид (рис. 7).

В таком случае почти-периодический анализ увеличивает временную нагрузку согласно описанной асимптотической оценке [6].

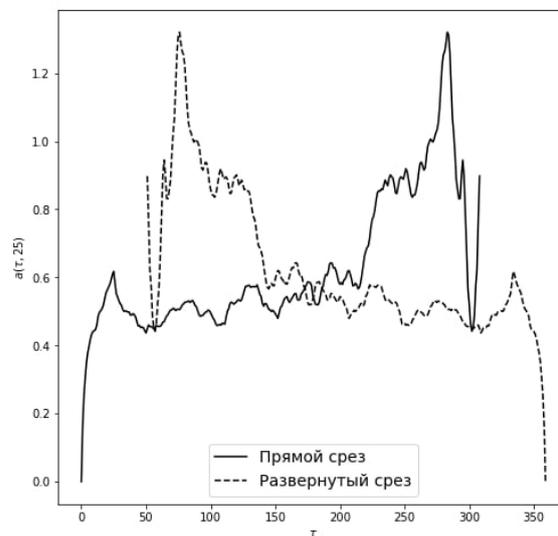


Рис. 6. Сравнение среза обобщённой сдвиговой функции с его отражением относительно 180°

Срез обобщённой сдвиговой функции для горизонтального сечения рис. 7 представлен на рис. 8.

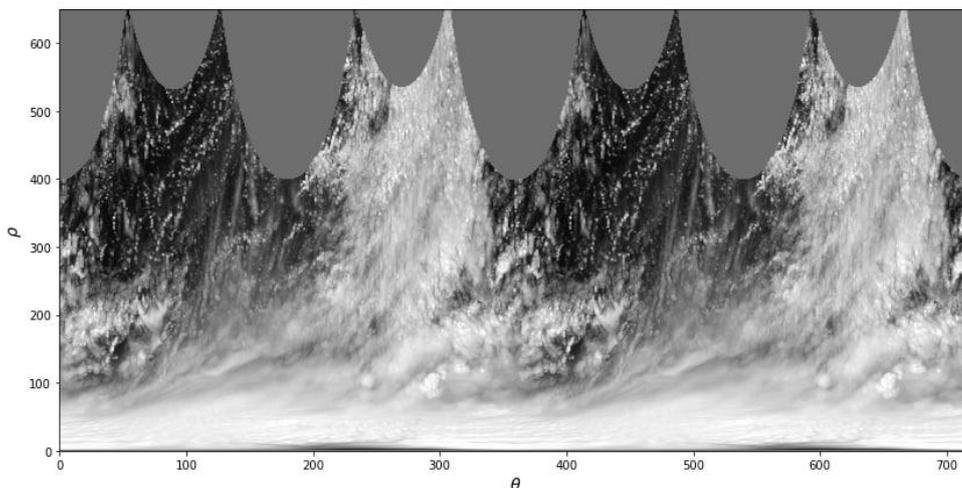


Рис. 7. Представление изображения в полярных координатах для углового интервала $[0^\circ; 719^\circ]$

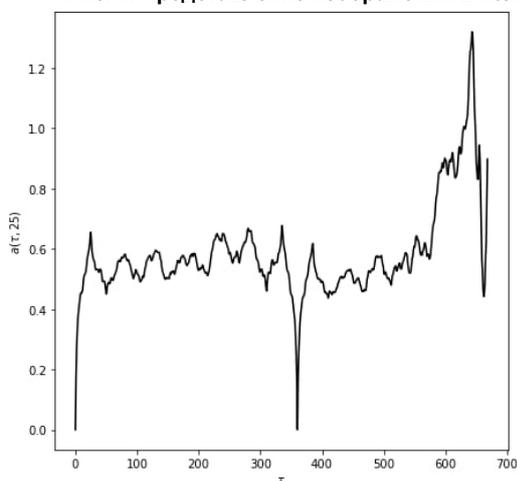


Рис. 8. Срез обобщённой сдвиговой функции горизонтального сечения изображения с рис. 7

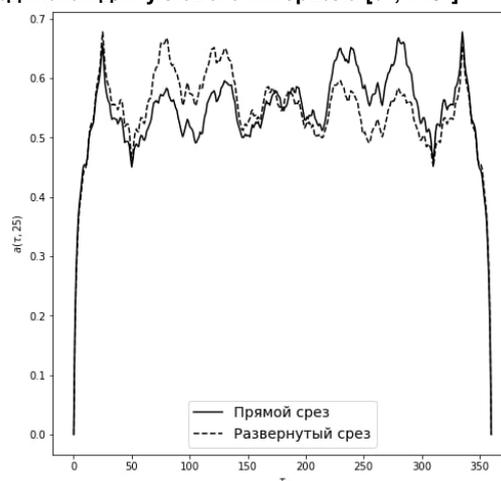


Рис. 9. График среза и разворота среза обобщенной сдвиговой функции на исследуемом интервале данных $[0^\circ; 360^\circ]$

Срез показал существование чистого периода в 360° – значение среза в данном аргументе равно 0. Также видна сильная корреляция внутри интервала $[0^\circ; 360^\circ]$ для прямого значения среза и развёрнутой его последовательности (рис. 9).

Аналогичным образом возможно проверить воспроизведение почти-периодов, превышающих основные, имеющие значение до 180° , на 360° – то есть совпадение локальных минимумов на интервалах среза $[0^\circ; 360^\circ]$ и $[360^\circ; 670^\circ]$ соответственно. Результат проведенной проверки представлен на рис. 10.

Таким образом, установлено, что расширение диапазона угла позволяет качественно уточнить структуру угловых почти-периодов в системе полярных координат представления исходного изображения тропического циклона.

Необходимо отметить, что аналогичным образом возможно оценить эффект наращивания длины интервала – добавление ещё 360° – таким образом, получается 1080° . В таком случае срез обобщенной сдвиговой функции примет вид согласно рис. 11.

Установлено, что исследуемый срез обобщённой сдвиговой функции на интервалах $[0^\circ; 360^\circ]$ и $[360^\circ; 720^\circ]$ имеет практически идентичные значения. Повторение кривой среза на разных интервалах и инверсия этих интервалов носят идентичные характеры и близкие значения. Установлено, что последующее наращивание величины углового интервала качественно не изменило результата, закрепив структуру воспроизведением аналогичной системы почти-периодов на интервале $[360^\circ; 720^\circ]$ градусов. Таким образом, сделан вывод об избыточности трехкратного углового

интервала, но достаточности двукратного интервала при решении задачи выявления структурных особенностей тайфунов в полярных координатах с применением почти-периодического анализа путем обработки и анализе данных с упорядоченным аргументом в сложных условиях динамического изменения параметров тропических циклонов.

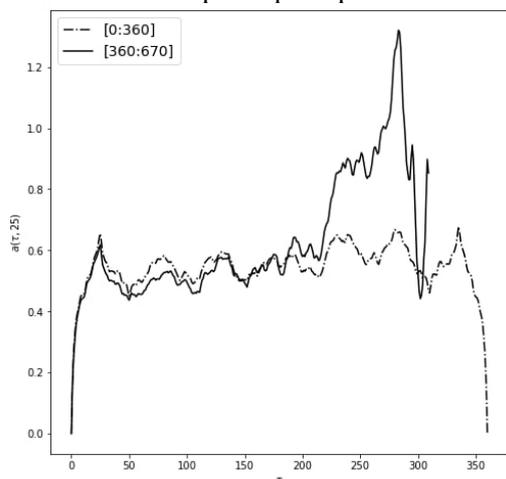


Рис. 10. График периодических интервалов среза обобщенной сдвиговой функции

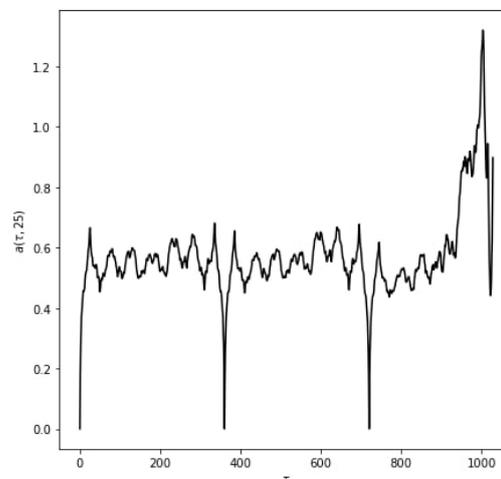


Рис. 11. Срез обобщенной сдвиговой функции углового среза для трехкратного кругового интервала

Следует отметить, что вопросами использования современных вычислительных технологий обработки информации при человеко-машинном взаимодействии в сложных условиях успешно занимаются в научной школе профессора РАН Р.В. Мещерякова. Авторы выражают признательность за предоставленную возможность регулярного общения с Романом Валерьевичем Мещеряковым, поздравляют с юбилеем и желают успехов в научной деятельности.

Заключение

Исследование показало специфику применения почти-периодического анализа в полярной системе координат при обработке изображения тропического циклона. Сравнение срезов обобщенной сдвиговой функции, примененной к данным прямоугольной и полярной систем координат, показывает более гладкие, а как следствие, более естественные результаты во втором случае. Полярные координаты демонстрируют качественные результаты в обработке изображений круглых объектов. Исследование показало, что для получения наиболее точных результатов в значениях угловых почти-периодов необходимо рассмотрение расширенного, удвоенного интервала значения угла, если такое возможно в рамках источника данных. В таком случае увеличивается сила взаимосвязанных элементов, данных в полярных координатах на основе естественной периодичности циклических (или круговых) данных, что позволяет провести полносвязный угловой анализ и сформировать полноценную систему оценочных почти-периодов, которая соответствует представлениям о дополняющих углах.

Полученные результаты могут быть использованы для визуализации данных из метеорологических центров, моделирования динамики развития чрезвычайных ситуаций, обусловленных активностью тропических циклонов, с целью обеспечения мероприятий и проведения аварийно-спасательных и других неотложных работ.

Литература

1. Левитан, Б.М. Почти-периодические функции / Б.М. Левитан. – М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1953. – 396 с.
2. Модели и методы определения параметров нелинейных процессов / В.И. Кузьмин, А.Б. Самохин, А.Ф. Гадзаов, В.В. Чердынцев. – М.: Московский технологический ун-т (МИРЭА), 2016. – 147 с.
3. Парамонов, А.А. Современные аспекты анализа больших данных с упорядоченным аргументом / А.А. Парамонов, Т.Е. Смоленцева, А.В. Калач // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики» (4–6 декабря 2023 г.). – Воронеж, 2024. – С. 609–613.

4. Dzerjinsky, R.I. The Changes Dynamics Analysis in the Japanese Stock Exchange Nikkei²²⁵ Index in the Latest Time / R.I. Dzerjinsky, B.A. Krynetsky, N.V. Chernorizova // In: Silhavy R., Silhavy P., Prokopova Z. (eds) Data Science and Intelligent Systems. CoMeSySo-2021. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. – V. 231.

5. Парамонов А.А., Кузьмин В.И. Анализ динамики макроэкономических показателей России // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2022. – №11-2. – С. 123–128.

6. Парамонов, А.А. Асимптотический анализ алгоритма поиска почти-периодов в данных с упорядоченным аргументом / А.А. Парамонов, Б.А. Крынецкий // Защита информации. Инсайд. – 2023. – № 4(112). – С. 53–57.

Поступила в редакцию 21 августа 2024 г.

Сведения об авторах

Парамонов Александр Александрович – аспирант, старший преподаватель кафедры прикладной математики, Институт информационных технологий РТУ МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: paramonov_a_a99@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8504-2108>.

Калач Андрей Владимирович – доктор химических наук, профессор, начальник кафедры безопасности информации и защиты сведений, составляющих государственную тайну, Воронежский институт ФСИН России, г. Воронеж, Российская Федерация; Институт информационных технологий РТУ МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация, e-mail: a_kalach@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2024, vol. 16, no. 4, pp. 67–74

DOI: 10.14529/mmph240408

SIMULATION OF EMERGENCIES USING ALMOST PERIODIC ANALYSIS OF IMAGES OF TYPHOON STRUCTURE

A.A. Paramonov¹, A.V. Kalach^{1,2}

¹ Institute of Information Technologies RTU MIREA, Moscow, Russian Federation

² Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation

E-mail: paramonov_a_a99@mail.ru

Abstract. The paper considers the method of transforming images from rectangular coordinate system to polar coordinate system for further near-periodic analysis of typhoon structure based on generalized shear function. The basic method of near-periodic analysis involves dividing the data into high-frequency oscillatory components and low-frequency trends based on the proportion theory, which can identify near-periodic characteristics.

The paper shows that near-periodic analysis is applicable to both radius-vector and angle image data in a polar coordinate system. The practical component of the work is demonstrated by analyzing an image of a tropical cyclone. Experiments performed using horizontal and vertical sections of the image revealed significant near-periods corresponding to certain pixel values, such as 600 pixels in the horizontal section and 900 pixels in the vertical section. An angular analysis was performed for the polar coordinate system, which revealed additional almost-periods that accounted for the periodicity of the angular coordinates. Extending the angular interval to 720 and 1080 degrees confirmed the robustness of the almost-periodic analysis results, indicating that a twofold interval is sufficient for qualitative analysis.

Thus, the proposed method can analyze image data more accurately and efficiently by identifying significant near-periods, which opens new perspectives for prediction and data processing in various scientific and applied problems of data analysis with ordered argument.

Keywords: data analysis methods; ordered argument data; trend; nonlinear fluctuations; near-period; image analysis; emergencies; typhoons; coordinate transformation.

References

1. Levitan, B.M. *Pochti-periodicheskie funktsii* (Almost-Periodic Functions). Moscow, Gos. izd-vo tekhn.-teoret. lit., 1953, 396 p. (in Russ.).
2. Kuzmin V.I., Samokhin A.B., Gadzaov A.F., Cherdyn'tsev V.V. *Models and Methods for Determining the Parameters of Nonlinear Processes*. Moscow Technological University (MIREA), 2016, 147 p. (in Russ.).
3. Paramonov A.A., Smolentseva T.E., Kalach A.V. Sovremennye aspekty analiza bol'shikh dannykh s uporyadochennym argumentom (Modern Aspects of Big Data Analysis with an Ordered Argument). *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Aktual'nye problemy prikladnoy matematiki, informatiki i mekhaniki" (4–6 dekabrya 2023 g.)* (Proc. Int. Scientific and Technical Conference "Actual problems of applied Mathematics, Computer Science and Mechanics" (December 4–6, 2023)), pp. 609–613. (in Russ.).
4. Dzerjinsky, R.I., Krynetsky, B.A., Chernorizova, N.V. The Changes Dynamics Analysis in the Japanese Stock Exchange Nikkei²²⁵ Index in the Latest Time. In: Silhavy, R., Silhavy, P., Prokopova, Z. (eds) *Data Science and Intelligent Systems*. CoMeSySo 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, Vol 231. Springer, Cham, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-90321-3_11
5. Paramonov A.A., Kuzmin V.I. Analysis of the Dynamics of Macroeconomic Indicators in Russia. *Sovremennaya nauka: aktual'nye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* (Modern science: current problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences), 2022, no. 11-2, pp. 123–128. DOI 10.37882 / 2223-2966.2022.11-2.24.
6. Paramonov A.A., Krynetsky B.A. Asymptotic Analysis of an Algorithm for Searching for Almost-Periods in Data with an Ordered Argument. *Zashchita informatsii. Insayd* (Information Security. Inside), 2023, no. 4 (112), pp. 53–57. (in Russ.).

Received August 21, 2024

Information about the authors

Paramonov Alexander Alexandrovich is Post-graduate Student, Senior Lecturer, Department of Applied Mathematics, Institute of Information Technologies RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, e-mail: paramonov_a_a99@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8504-2108>.

Kalach Andrey Vladimirovich is Dr. Sc. (Chemical), Professor, Head of the Department of Information Security and Protection of Information Constituting State Secrets, Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia, Voronezh, Russian Federation; Institute of Information Technologies RTU MIREA, Moscow, Russian Federation, e-mail: a_kalach@mail.ru, ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8926-3151>.