Detection of phase and change point of human motions with signals of wearable devices

A. D. Kurdyukova, G. V. Kormakov, D. M. Tihonov, V. V. Strijov

kurdiukova.ad@phystech.edu; egor2898@mail.ru; tihonov.dm@phystech.edu;

strijov@ccas.ru

The paper proposes detections of the phase and check point of human motions. *Signals of wearable devices. Human motion is quasi-periodic.* Find the phase of quasi-periodic movement. Determine the moment of changing the type of movement. For this purpose, the author proposes to solve the task of segmenting time series. In this paper we construct the phase trajectory of the motion and find the actual dimension of the phase space. The proposed model estimates the phase of motion and determines the beginning of the segment. Repeat of the phase trajectory enable to segment the periodic actions of a person. Change point enable to determine a change in the type of movement. The computational experiment analyzes the quality of the proposed model. The time series are collected from the three-axis accelerometer.

Keywords: *time series, phase trajectory, trajectory space, segmentation, disorder, principal component analysis*

DOI:

Определение фазы и разладки движения человека по сигналам носимых устройств

А. Д. Курдюкова, Г. В. Кормаков, Д. М. Тихонов, В. В. Стрижов

kurdiukova.ad@phystech.edu; egor2898@mail.ru; tihonov.dm@phystech.edu; strijov@ccas.ru

Данная работа посвящена определению фазы и разладки движения человека по сигналам носимых устройств. Исследуются несколько классов периодического движения человека. Требуется построить модель, которая восстанавливает фазу движения, а также определить момент смены типа движения. Строится фазовая траектория движения и отыскивается фактическая размерность фазового пространства. По разладке фазовой траектории определяется смена типа движения. Качество предлагаемой модели анализируется на временных рядах, считанных с трехосевого акселерометра.

Ключевые слова: *временные ряды, фазовая траектория, траекторное пространство, сегментация, разладка, метод главных компонент*

DOI:

1 Введение

Решается задача анализа сигналов, считываемых с носимых устройств. Результаты анализ этих данных используются в различных медицинских приложениях [1, 2], в частности, при мониторинге состояния пациентов [3], для автоматизированного обнаружения падений пожилых людей [4].

Временной ряд $\{s_t\}_{t=1}^N$ движения человека назовем *квазипериодическим* с периодом T, если для всех $t \in [0, +\infty)$ найдется δ, такое что для любого $l \in \mathbb{N}$ выполнено

$$s_t \approx s_{t+lT+\delta}, \quad |\delta| \ll T. \tag{1}$$

При анализе временных рядов рассматривают разбиения (такие разбиения называются сегментацией или класетризацией []) на квазипериодические временные интервалы, которые позволяют перейти в пространство фазовых траекторий.

Предлангается способ оценки фиксированной размерности собственного подпространства фазовых траекторий. В работах [5–7] показана избыточность исходного пространства для построения аппроксимирующей модели. Она восстанавливает временной ряд по

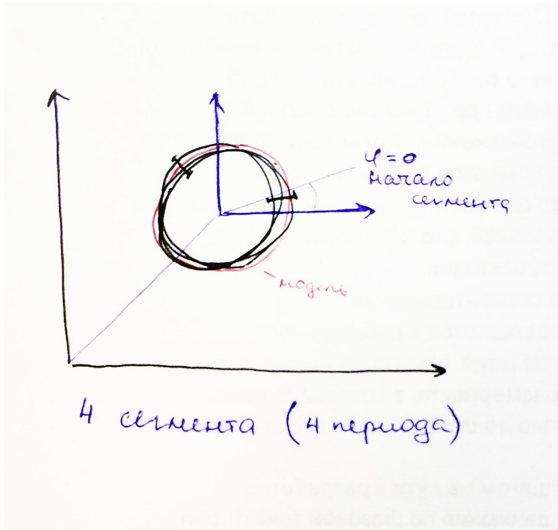


Рис. 1 Фазовая траектория временного ряда (1)

фазовым траекториям в собственном подпространстве. адекватно приближая исходный квазипериодический временной ряд (1).

Для сегментации квазипериодических временных рядов необходимо определить период. *Ввести определение фазы?* Данное значение фазовой траектории интерпретируется как начальная фаза фиксированного класса. В собственном подпространстве возможно более устойчивое извлечение начальной фазы. При добавлении шума в исходный временной ряд модель, определяющая фазу, не изменяет существенно своего прогноза.

В работах [5, 8] решается задача сегментации квазипериодических временных рядов. Переход в собственное подпространство фиксированной размерности, равной двум, является сильным ограничением. Данное предположение на размерность опирается на теорему [5] об аппроксимации периодических компонент синусоидального временного ряда с периодом $T > 2$. В реальных данных встречается суперпозиция нескольких главных компонент, для которых эта теорема неприменима. Размерность собственного подпространства, равная двум, не является достаточной для построения устойчивой модели.

В работах [6, 8] задача сегментации квазипериодических временных рядов решается путем построения низкоразмерного фазового пространства и переходом к признаковому описанию точек исходного временного ряда с использованием метрик в фазовом пространстве. При работе в высокоразмерном фазовом пространстве данный подход становится более неустойчивым из-за "проклятия размерности".

Целью данной работы является построение алгоритма нахождения устойчивой фазы квазипериодического временного ряда. Предлагаемый алгоритм прогнозирует фазу временного ряд фиксированного класса периодического движения. *в пространстве опти-*

мальной размерности. Описывается критерий оптимальности размерности, опирающийся на условие отсутствия самопересечений в фазовом пространстве.

2 Постановка задачи

Данные, считанные с трехосевого акселерометра с частотой семплирования $\nu = 500c^{-1}$, представляют собой временной ряд

$$\{\mathbf{a}_i\}_{i=1}^N, \quad \mathbf{a}_i = \begin{bmatrix} a_{ix} \; a_{iy} \; a_{iz} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{a}_i \in \mathbb{R}^3. \tag{2}$$

В работе рассматривается временной ряд

$$\{s_i\}_{i=1}^N, \quad s_i = \sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2 + a_{iz}^2}, \quad s_i \in \mathbb{R}^1. \tag{3}$$

Предполагается, что он соответствует фиксированному классу периодического движения $y \in \mathbb{Y}$: ходьба, бег, шаги вверх или вниз по лестнице. Для анализа периодических компонент осуществляется переход в собственное пространство с проомощью построения ганкелевой матрицы. Далее в текущей работе будем называть ее траекторной матрицей.

Временной ряд (3) представлен в виде разложения, каждое слагаемое которого аппроксимируется комбинацией главных компонент траекторной матрицы

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} s_1 & \dots & s_n \\ s_2 & \dots & s_{k+1} \\ & \dots\dots\dots & \\ s_{N-n+1} & \dots & s_N \end{bmatrix}^\top = \begin{bmatrix} \mathbf{s}_1 \\ \mathbf{s}_2 \\ \cdot \\ \mathbf{s}_m \end{bmatrix}^\top, \quad m = N - n + 1$$

где n – ширина окна, не меньшая, чем преполагаемый период: $n\mu^{-1} \leqslant T$ Для понижения размерности фазового пространства выполняется сингулярное разложение матрицы $\mathbf{H}^\top\mathbf{H}$

$$\frac{1}{n}\mathbf{H}^\mathsf{T}\mathbf{H} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^\mathsf{T}, \quad \mathbf{\Lambda} = \mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n).$$

после чего определяются главные компоненты $\mathbf{y}_k = \mathbf{H}\mathbf{v}_k$, $k \in 1, \dots, n$ для ее собственных значений.

Требуется построить модель f, аппроксимирующую фазовую траекторию с помощью минимального числа главных компонент. Предполагается, что траектория порождает движение человека из фиксированного класса. Каждая модель аппроксимирует временной ряд заданного класса y. На рисунке () изображено ? сегмента класса ходьбы

Размерность исходного фазового пространсства избыточна. Осуществляется переход в собственное подпространство меньшей размерности. Пусть $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_p$ – выбранные главные компоненты, аппроксимирующие фазовую траекторию. Восстановленная часть траекторной матрицы $\widehat{\mathbf{H}}$

$$\widehat{\mathbf{H}} = \mathbf{H}_1 + \dots + \mathbf{H}_p, \quad \mathbf{H}_j = \sqrt{\lambda_j}\mathbf{v}_j\mathbf{y}_j^{\mathsf{T}}, \quad j \in \overline{1,p}$$

$$\mathbf{X} = \widehat{\mathbf{H}}\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ . \\ \mathbf{x}_m \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^p,$$

где $\mathbf{W}$ — матрица преобразования алгоритма PCA с количеством компонент равным p, соответствующим наибольшим собственным значениям.

В полученном фазовом пространстве требуется построить модель фппроксимации фазовой траектории, определить критерий выбора оптимальной размерности пространства и модель нахождения фазы в исходном временном ряде.

3 Определение фазы в пространстве оптимальной размерности

3.1 Аппроксимационная модель фазовой траектории

Из предыдущего раздела найдена модель f, переводящая исходный временной ряд в фазовое пространство. Обозначим за $g : \varphi \to \mathbf{x}$ модель, ставящую в соответствие фазе $\varphi \in [0, 2\pi]$ точки средней траектории $\mathsf{E}(\mathbf{x}|\varphi)$ и дисперсии $\mathsf{D}(\mathbf{x}|\varphi)$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^p$.

Модель g^{-1} сопоставляет точке собственного подпространства размерности $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^p$ скалярную величину $\varphi_i \in [0, 2\pi]$, $i \in \overline{1,m}$. Общая схема

$$t_i \xrightarrow{f} \mathbf{x}_i \xrightarrow{g^{-1}(\mathbf{x}_i)} \varphi_i, \tag{4}$$

где $t_{i+1} \approx t_i + T\nu^{-1}$, $t_0 = 0$.

Модель g используется для получения точек $\mathbf{x}_i$ по фазе. Предлагается осуществить аппроксимацию по траекторной матрице $\mathbf{X}$ с помощью регрессии Надарая-Ватсона. Тогда средняя траектория получается по формуле

$$\mathsf{E}(\mathbf{x}_i|\varphi) = \frac{\sum_{\mathbf{x}_i \in X} \mathbf{x}_i K\left(\frac{\rho(\varphi', \varphi)}{h}\right)}{\sum_{\mathbf{x}_i \in X} K\left(\frac{\rho(\varphi', \varphi)}{h}\right)}, \tag{5}$$

где h – фиксированная ширина окна, φ' – предполагаемые фазы точек фазовой траектории $\mathbf{X}$. При помощи имеющихся предположений о периоде T сопоставляем каждой точке фазовой траектории фазу $\varphi' = \frac{2\pi \cdot i}{T} \mod 2\pi$.

В качестве ядра предлагается рассмотреть следующие функции спользуется RBF функция

$$K(r) = \exp\left(-\gamma\|r\|^2\right) \text{ – RBF функция}$$

$$\Pi(r) = [|r| \leqslant 1] \text{ -- прямоугольое ядро}$$

$$T(r) = (1 - |r|)[|r| \leqslant 1] \text{ -- треуголное ядро}$$

$$E(r) = (1 - |r|^2)[|r| \leqslant 1] \text{ -- квадратичное ядро}$$

Введена метрика

$$\rho(\varphi', \varphi) = \frac{1 - \cos(\varphi' - \varphi)}{2}, \quad \varphi',\, \varphi \in [0, 2\pi]$$

Соответствующие значения дисперсии

$$\mathsf{D}(\mathbf{x}_i|\varphi) = \ldots, \quad i \in \overline{1, T}$$

3.2 Обнаружение самопересечений

Определение. Оптимальная размерность пространства - это размерность пространства, в которой выполняется критерий отсутствия самопересечений

Введем множество индексов

$$M = \left\{ i \,|\, \mathsf{E}(\mathbf{x}_i|\varphi) \pm \mathsf{D}(\mathbf{x}_i|\varphi) \bigcap \mathsf{E}(\mathbf{x}_j|\varphi) \pm \mathsf{D}(\mathbf{x}_j|\varphi) \neq \varnothing,\ \mathbf{x}_j \in X,\ |i - j| > k \right\},\ k \in \mathbb{N},\, k \geqslant \frac{T}{4}$$

Если множество M пусто, то самопересееinий нет.

3.3 Модель определения фазы

Для определения фазы модель опирается на следующие предположения

1. Точкам с большим индексом соответствует большая фаза. Если $j > i$, то $\varphi_j > \varphi_i$ для $i,\, j \in \overline{1, m}$.
2. Фазы соседних точек близки. Если $\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_2^2 < \varepsilon$ (ε – гиперпараметр), то $\|\varphi_i - \varphi_j\| < \delta$ для некоторого δ, где $i,\, j \in \overline{1, m}$.

Выбор предполагаемых фаз. Точки фазовой траектории $\mathbf{x}_i$ и $\mathbf{x}_j$ будем называть соседствующими, если

$$\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\|_2^2 < \varepsilon, \quad \varepsilon \text{ -- гиперпараметр.}$$

Для каждой точки фазовой траектории (?) введем множество индексов точек средней траектории, попадающих в область дисперсии

$$N_i = \{ j \,|\, \mathbf{x}_i \in \mathsf{E}(\mathbf{x}_j|\varphi) \pm \mathsf{D}(\mathbf{x}_j|\varphi) \}.$$

По набору индексов N_i составляется набор фаз

$$\Phi_i = \left\{ \varphi_j \,:\, \varphi_j = \frac{2\pi j}{M},\ M \text{ -- число точек в средней траектории},\ j \in N_i \right\}.$$

Причем $\mathbf{x}_j$ соответствуют точкам средней траектории, которую задает $\mathsf{E}(\mathbf{x}_i|\varphi)$. Поиск соседней точки для $\mathbf{x}_i$ завершается "успехом", если

$$N_i \neq \varnothing.$$

Функция потерь

$$L(\varphi_j) = \lambda_1 \sum_{i<j} |\varphi_i - \varphi_j|_+ + \lambda_2 \sum_{\|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j\| < \varepsilon} \rho(\varphi_i, \varphi_j) + \lambda_3 \sum_{l=\overline{1,N_{step}}} L_3(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_l(\varphi_i)), \quad \|\lambda\| =?$$

L_3 – для точек одинаковой фазы, обычная квадратичная функция, $\mathbf{x}_l(\varphi_i)$ – после установления взаимооднозначного соответствия.

Таким образом, задача нахождения фазы для текущей точки формализуется в следующем виде

$$\widehat{\varphi}_i = \arg\min_{\varphi_j \in \Phi_i} L(\varphi_j).$$

3.4 Критерий обнаружения разладки

Критерий обнаружения разладки

$$R_\gamma = \left\{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^n | \mathbf{x} \notin \mathsf{E}(\mathbf{x}_i|\varphi) \pm \gamma\, \mathsf{D}(\mathbf{x}_i|\varphi),\, i \in \overline{1, L} \right\}.$$

Точка фазовой траектории не является соседней. Параметр γ – степень доверия.

4 Вычислительный эксперимент

В этом разделе исследуется зависимость средней абсолютной ошибки MAPE от размерности фазового пространства, из которого происходит воостановление временного ряда. В пространстве *оптимальной размерности* фазовая траектория разбивается на сегменты, соответствующие периодам рассматриваемого движения. Эксперименты проводятся на реальных данных, полученных с акселерометра мобильного устройства во время ходьбы. Соответсвующий временной ряд изображен на рис. 1.

Разложение временного ряда с помощью метода главных компонент и его восстановление описано в работе [5]. Количество выбранных главных компонент определяет размерность фазового пространства. По соответствующим собственным векторам восстанавливается временной ряд. Анализ ошибки MAPE в зависимости от размерности фазового пространства позволяет определить оптимальную размерность пространства, в котором фазовая траектория не имеет ярковыраженных самопересечений.

В качестве анализа качества сегментации предлагается рассмотреть стандартное отклонение сегментированных точек от точек исходного временного ряда, имеющих максимум автокорреляции при длине окна, равной длине периода движения. Также требуется, чтобы количество сегментированных точек совпадало с с количесттвом периодов исходного временного ряда.

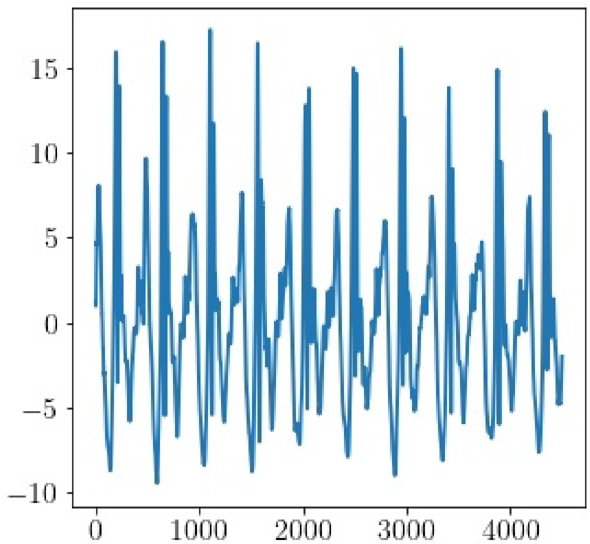
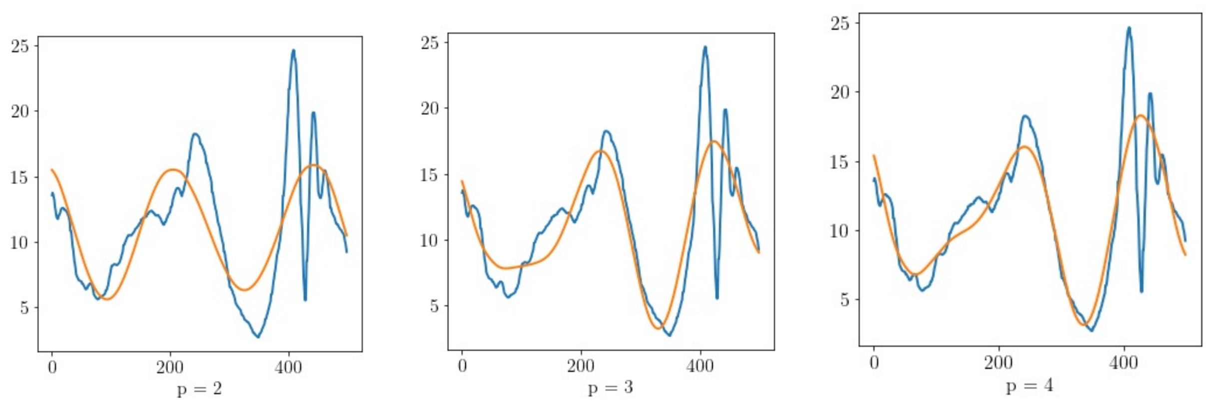


Рис. 2 Исследуемый временной ряд.



(*а*) (*б*) (*в*)

Рис. 3 Исходный временной ряд и его разложение для различных размерностей фазового пространства.

5 Заключение

В данной работе был проведен вычислительный эксперимент по определению оптимальной размерности фазового пространства. Был предложен алгоритм поиска точек временного ряда одинаковой фазы, обобщающий идею, описанную в работе [5], на случай размерности большей, чем два. Проведено исследование качества сегментации в зависимости от размерности фазового пространства.

Решение поставленных задач является важным шагом на пути к разработке алгоритмов, позволяющих определить разладку движения по фазовой траектории, найти инвариант, сохраняющийся на классах эквивалентности конкретного типа периодического дви-

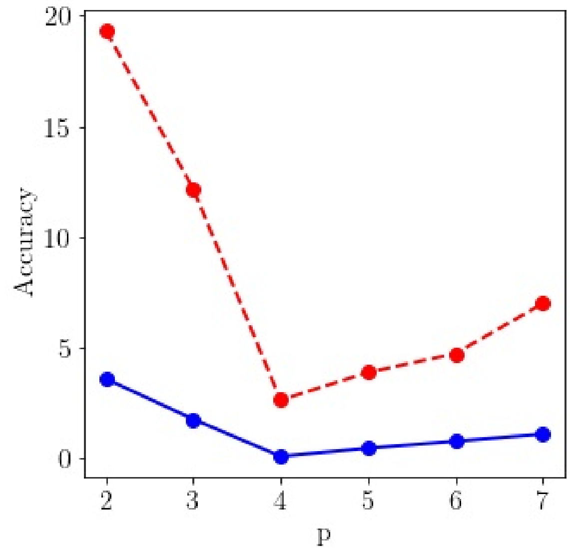


Рис. 4 График зависимости точности аппроксимации и количества самопересечений фазовой траектории от размерности фазового пространства пространства.

жения, а также распознать суперпозицию нескольких движений. Эти результаты крайне важны с точки зрения понимания и моделирования человека, биомедицинского применения и внесли бы значительный вклад в область анализа биосигналов.

Литература

[1] JBJ Bussmann, YM Van de Laar, MP Neeleman, and HJ Stam. Ambulatory accelerometry to quantify motor behaviour in patients after failed back surgery: a validation study. *Pain*, 74(2-3):153–161, 1998.

[2] Bijan Najafi, Kamiar Aminian, Anisoara Paraschiv-Ionescu, François Loew, Christophe J Bula, and Philippe Robert. Ambulatory system for human motion analysis using a kinematic sensor: monitoring of daily physical activity in the elderly. *IEEE Transactions on biomedical Engineering*, 50(6):711–723, 2003.

[3] Agnes Grünerbl, Amir Muaremi, Venet Osmani, Gernot Bahle, Stefan Oehler, Gerhard Tröster, Oscar Mayora, Christian Haring, and Paul Lukowicz. Smartphone-based recognition of states and state changes in bipolar disorder patients. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 19(1):140–148, 2014.

[4] Xin Ma, Haibo Wang, Bingxia Xue, Mingang Zhou, Bing Ji, and Yibin Li. Depth-based human fall detection via shape features and improved extreme learning machine. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 18(6):1915–1922, 2014.

[5] Anastasia Motrenko and Vadim Strijov. Extracting fundamental periods to segment biomedical signals. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 20(6):1466–1476, 2015.

[6] AV Grabovoy and VV Strijov. Quasi-periodic time series clustering for human activity recognition. *Lobachevskii Journal of Mathematics*, 41(3):333–339, 2020.

[7] Карина Равилевна Усманова, ЮИ Журавлёв, КВ Рудаков, and ВВ Стрижов. Аппроксимация фазовой траектории квазипериодических сигналов методом сферической регрессии. *Вестник Московского университета. Серия 15: Вычислительная математика и кибернетика*, (4):40–46, 2020.

[8] Andrey D Ignatov and Vadim V Strijov. Human activity recognition using quasiperiodic time series collected from a single tri-axial accelerometer. *Multimedia tools and applications*, 75(12):7257–7270, 2016.

Поступила в редакцию