

# Определение фазы и разладки движения человека по сигналам носимых устройств

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

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

Данная работа посвящена определению фазы и разладки движения человека по сигналам носимых устройств. Исследуются классы периодического движения человека или животного нескольких типов. Требуется найти начало и конец движения, а также определить момент смены типа движения. С этой целью решается задача сегментирования временных рядов. Строится фазовая траектория движения и отыскивается фактическая размерность фазового пространства. Предлагается модель оценки фазы движения и определения начала сегмента. По повторению фазовой траектории сегментируются периодические действия человека, а по ее разладке определяется смена типа движения. Качество предлагаемого метода анализируется на временных рядах, считанных с трехосевого акселерометра.

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

**DOI:**

## 1 Введение

Решается задача анализа данных, считываемых с носимых устройств. Результаты анализа 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  $\{s_t\}_{t=1}^m$  движения человека или животного назовем *квазипериодическим* с периодом  $T$ , если

$$\forall t \exists \delta \hookrightarrow s_t \approx s_{t+T+\delta}, \quad |\delta| \ll T. \quad (1)$$

Решается задача разбиения таких временных рядов на периодоподобные временные интервалы. Целью этой работы является определение начала и конца движения. Предлагается *адекватная модель построения фазовой траектории*. Рассматривается способ получения оценки размерности *собственного пространства* фазовой траектории – траекторного пространства минимальной размерности, при котором аппроксимирующая модель строит адекватное приближение ряда (1). *Критерий отсутствия самопересечений*. По повторению фазовой траектории сегментируются периодические действия человека. Предлагается

способ извлечения устойчивой начальной фазы конкретного типа движения в собственном пространстве фазовой траектории.

В работе(ах) [5] [...] решается задача сегментирования квазипериодических временных рядов. Совершается переход в собственное пространство фиксированной размерности, равной двум. Целью данной работы является переход в фазовое пространство минимальной размерности. *Фазовая траектория не имеет самопересечений с точностью до стандартного отклонения восстановленной траектории.*

## 2 Постановка задачи

Данные, считанные с трехосевого акселерометра, представляют собой временной ряд

$$X = \{x(i)\}_{i=1}^N. \quad (2)$$

Он соответствует фиксированному классу периодического движения  $y \in \mathbb{Y}$  (ходьба, бег, шаги вверх и вниз по лестнице и т.п.).

### 2.1 Декомпозиция временного ряда методом главных компонент

Временной ряд (2) представлен в виде разложения, каждое слагаемое которого с высокой точностью аппроксимируется комбинацией главных компонент траекторной матрицы

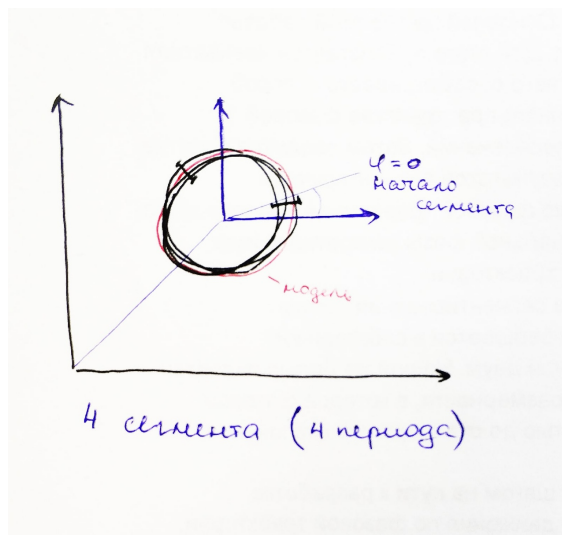
$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} x(1) & \dots & x(n) \\ x(2) & \dots & x(k+1) \\ \dots & \dots & \dots \\ x(N-n+1) & \dots & x(N) \end{pmatrix}.$$

Для нахождения аппроксимации выполняется сингулярное разложение ковариационной матрицы  $\mathbf{H}$

$$\frac{1}{l} \mathbf{H}^T \mathbf{H} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T, \quad \mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_l).$$

после чего определяются главные компоненты  $\mathbf{y}_k = \mathbf{H} \mathbf{v}_k$  для соответствующих собственных значений  $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$ .

В данной работе требуется построить модель  $f \in \mathfrak{F}$ , аппроксимирующую фазовую траекторию с помощью минимального числа главных компонент. Каждая модель аппроксимирует временной ряд заданного класса  $y$ . Критерием оптимальной размерности является отсутствие самопересечений фазовой траектории с точностью до стандартного отклонения восстановленной траектории. Требуется разбить фазовую траекторию на столько сегментов, сколько периодов содержится во временном ряде (2).



## 2.2 Переход в собственное пространство фазовой траектории

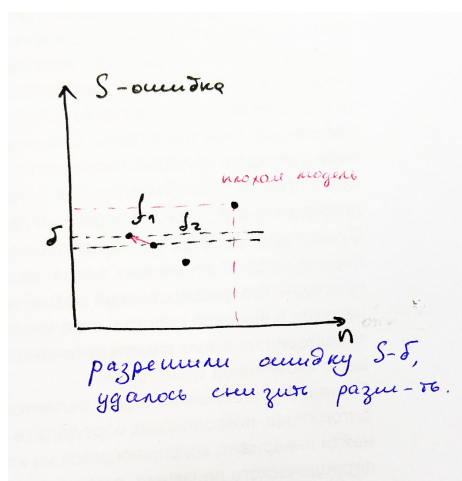
Критерий качества модели. Пусть  $y_1, \dots, y_p$  – выбранные главные компоненты, аппроксимирующие фазовую траекторию. Тогда восстановленная часть траекторной матрицы  $\mathbf{H}$

$$\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}_1 + \dots + \mathbf{H}_p, \quad \mathbf{H}_j = \sqrt{\lambda_j} \mathbf{v}_j \mathbf{y}_j^T.$$

С помощью антидиагонального усреднения матрицы  $\tilde{\mathbf{H}}$  восстанавливается временной ряд  $\tilde{X}$ . В качестве критерия качества модели используется функционал MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка)

$$\text{MAPE} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} 100 \frac{|\tilde{x}_i - x_i|}{|x_i|}.$$

Сложностью модели является размерность фазового пространства.

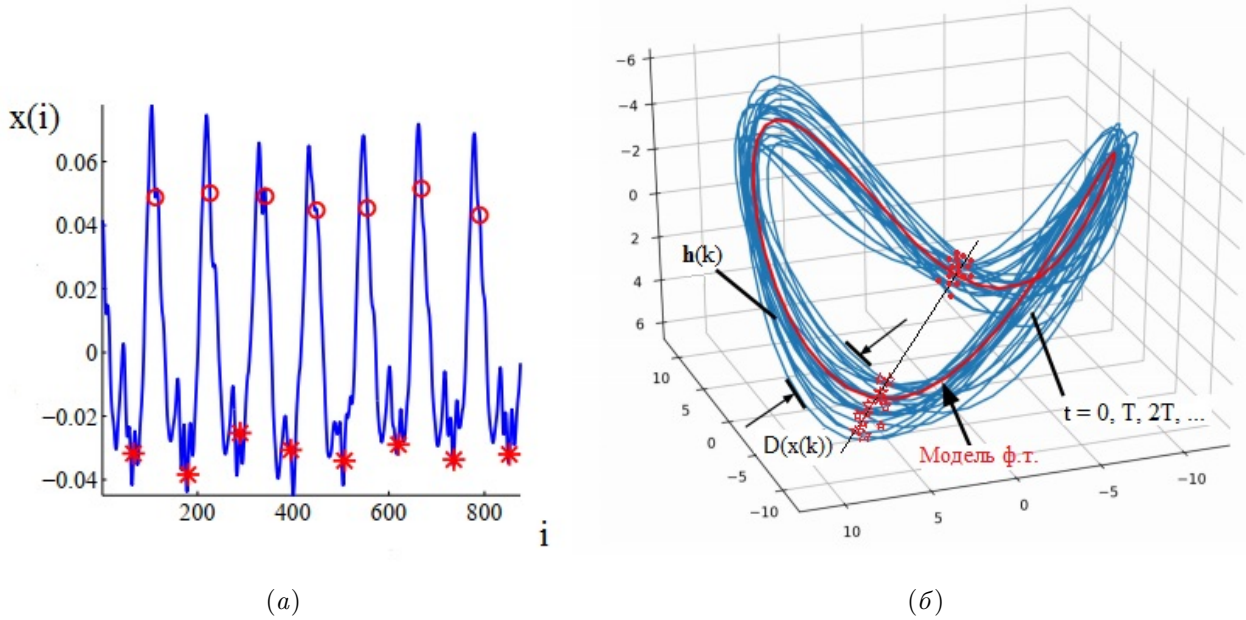


## 2.3 Определение фазы с алгоритмом сегментации

Рассмотрим пример квазипериодического ряда, представленного на рис.1. Красными кружочками и звездочками обозначены концы полупериодов:  $i_t^+$  и  $i_t^-$ . Величина периода

55 изменяется со временем, а фазовая траектория плавно отклоняется от своей аппрокси-  
 56 мации. Точки временного ряда, соответствующие концам полупериодов временного ряда,  
 57 образуют кластер в собственном пространстве. Множества  $I^+ = \{i_t^+\}_{t=1}^T$  и  $I^- = \{i_t^-\}_{t=1}^T$  –  
 58 кандидаты на искомое множество  $I$  точек сегментации временного ряда. Точки  $x(i_t), i_t \in I$   
 59 соответствуют разным значениям фазы, поэтому будем выбирать то множество, которое  
 60 будет минимизировать эту разницу

$$61 \quad I = \arg \min_{* \in \{+, -\}} \sum_{i_t^*, i_q^* \in I^*} \|(y_1(i_t^*), \dots, y_p(i_t^*)) - (y_1(i_q^*), \dots, y_p(i_q^*))\|.$$



**Рис. 1** Квазипериодический временной ряд и его фазовая траектория.

62 Выбранны главные компоненты  $y_1, \dots, y_p$ , аппроксимирующие фазовую траекторию.  
 63 Будем полагать, что они нормированны. В собственном пространстве размерности  $p$  фа-  
 64 зовая траектория не имеет самопересечений с точностью до среднеквадратичного откло-  
 65 нения. Будем рассекать фазовую траекторию гиперплоскостью, наиболее приближенной  
 66 к плоскости симметрии фазовой траектории. Для нахождения плоскости симметрии вос-  
 67 пользуемся методом, описанным в [6, 7]. Пусть  $y_1 = 0$  совпадает с плоскостью симметрии.  
 68 Для множества точек  $(y_1, \dots, y_p)$  вводит вспомогательный вектор  $Y = [y_1^T, \dots, y_p^T]^T$ .  
 69 Тогда вектор  $Y_s$ , соответствующий симметричному множеству точек, минимизирующий  
 70 отклонение  $\|Y_s - Y\|_2$ , получается из  $Y$  посредством линейного преобразования

$$71 \quad Y_s = QY.$$

Тогда в качестве рассекающей гиперплоскости будем выбирать ту, которая минимизирует отклонение

$$\|\tilde{Y}_s - \tilde{Y}\|_2.$$

Вектор  $\tilde{Y}$  состоит из компонент вектора  $Y$  в системе координат, повернутой вокруг начала отсчета таким образом, чтобы ось  $y_1$  была совмещена с нормалью, задающей гиперплоскость.

### 3 Сечение фазовой траектории в пространстве оптимальной размерности

*Описание алгоритма.*

*Сечение в евклидовом пространстве с повышением размерности.*

*Сечем на наиболее целое множество, иначе увеличиваем размерность пространство на 1.*

### 4 Вычислительный эксперимент

В этом разделе исследуется зависимость средней абсолютной ошибки MAPE от размерности фазового пространства, из которого происходит восстановление 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. Соответствующий временной ряд изображен на рис. 1.

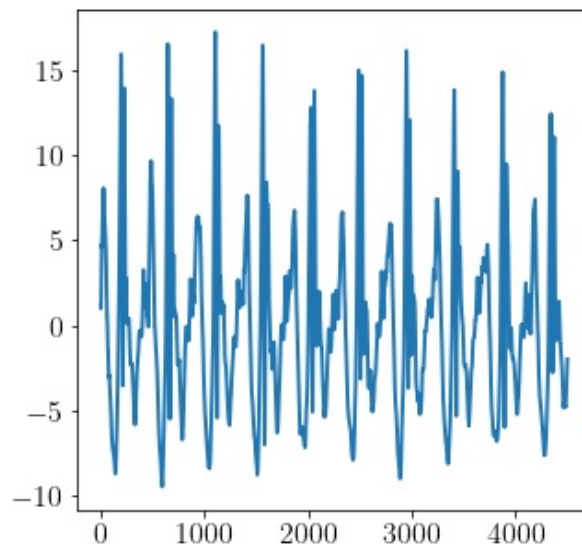
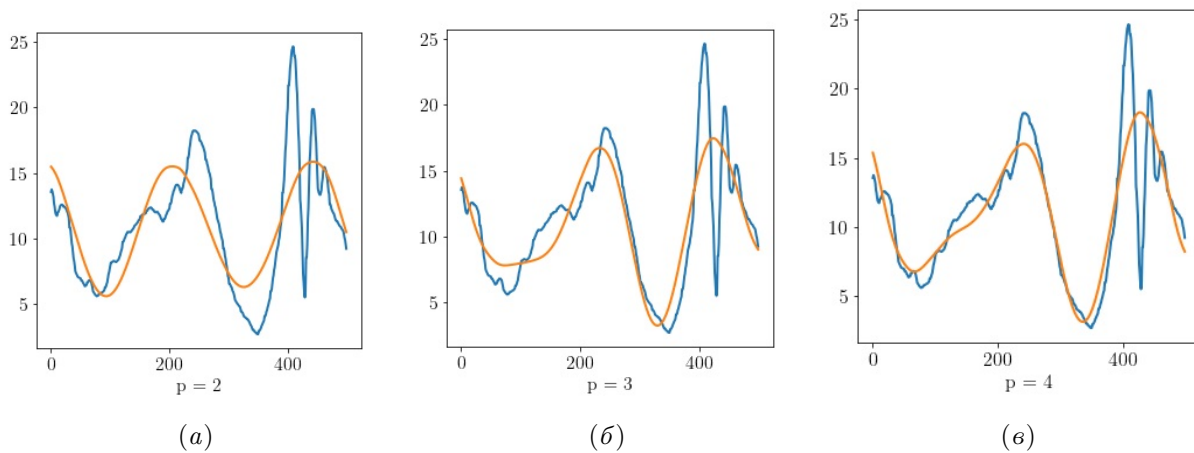
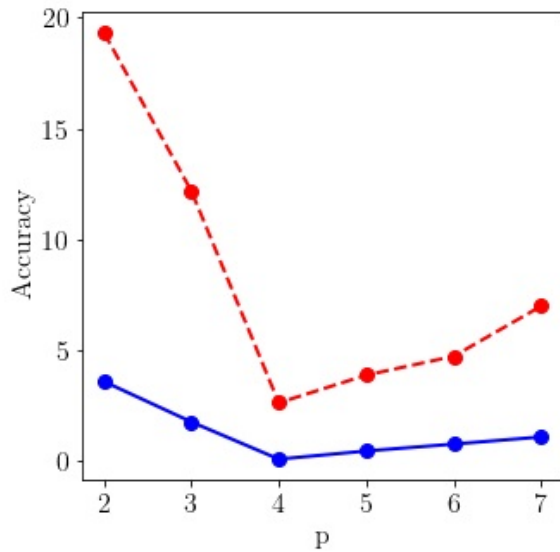


Рис. 2 Исследуемый временной ряд.

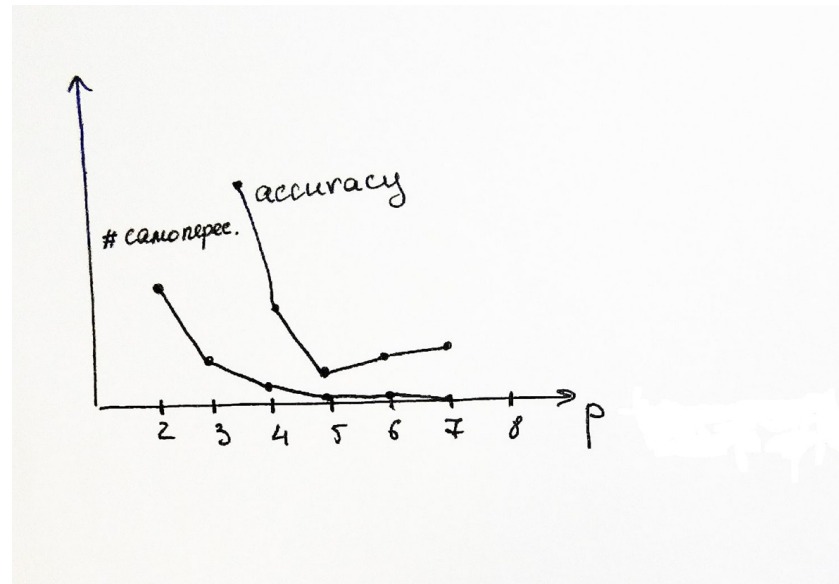
Разложение временного ряда с помощью метода главных компонент и его восстанов-  
ление описано в работе [5]. Количество выбранных главных компонент определяет раз-  
мерность фазового пространства. По соответствующим собственным векторам восстанавливается временной ряд. Анализ ошибки МАРЕ в зависимости от размерности фазового  
пространства позволяет определить оптимальную размерность пространства, в котором  
фазовая траектория не имеет ярковыраженных самопересечений. Процесс сегментирования фазовой траектории в пространстве меньшей размерности так же описан в [5].



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



(а)



(б)

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

## 5 Анализ ошибки

Дана выборка. Рисунок с разметкой на фазу и полуфазу. Тест – другой временной ряд с аналогичным типом движения. С помощью PCA переходим в пространство размерности 2. Итеративно увеличиваем размерность пространства, пока точность классификации не станет максимальной. Классификатор – линейный SVM.

Оценка параметров гиперплоскости с помощью бустрапа - ?

График качества классификации в зависимости от размерности.

Смотрим на качество уменьшения и восстановления другого временного ряда и ряда с размеченной выборкой.

Возможно: 1) поиграться с марджисом в размерности на 1 больше, на 1 меньше и в самой оптимальной. 2) проверить, что прямая, соединяющая размеченные точки, перпендикулярна гиперплоскости, построенной SVM. 3) можно посмотреть на зависимость уверенности (адекватности разделимости) SVM от размерности.

## 6 Заключение

Первая часть заключения.

Вторая часть заключения. 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 движения, а также распознать суперпозицию нескольких движений.

116 Эти результаты крайне важны с точки зрения понимания и моделирования человека,  
117 биомедицинского применения и внесли бы значительный вклад в область анализа биосиг-  
118 налов.

## 119 Литература

- 120 [1] JBJ Bussmann, YM Van de Laar, MP Neeleman, and HJ Stam. Ambulatory accelerometry to  
121 quantify motor behaviour in patients after failed back surgery: a validation study. *Pain*, 74(2-  
122 3):153–161, 1998.
- 123 [2] Bijan Najafi, Kamiar Aminian, Anisoara Paraschiv-Ionescu, François Loew, Christophe J Bula,  
124 and Philippe Robert. Ambulatory system for human motion analysis using a kinematic sensor:  
125 monitoring of daily physical activity in the elderly. *IEEE Transactions on biomedical Engineering*,  
126 50(6):711–723, 2003.
- 127 [3] Agnes Grünerbl, Amir Muaremi, Venet Osmani, Gernot Bahle, Stefan Oehler, Gerhard Tröster,  
128 Oscar Mayora, Christian Haring, and Paul Lukowicz. Smartphone-based recognition of states and  
129 state changes in bipolar disorder patients. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*,  
130 19(1):140–148, 2014.
- 131 [4] Xin Ma, Haibo Wang, Bingxia Xue, Mingang Zhou, Bing Ji, and Yibin Li. Depth-based human fall  
132 detection via shape features and improved extreme learning machine. *IEEE journal of biomedical*  
133 *and health informatics*, 18(6):1915–1922, 2014.
- 134 [5] Anastasia Motrenko and Vadim Strijov. Extracting fundamental periods to segment biomedical  
135 signals. *IEEE journal of biomedical and health informatics*, 20(6):1466–1476, 2015.
- 136 [6] AN Karkishchenko and VB Mnukhin. Recovery of points symmetry in images of objects with  
137 reflectional symmetry. *Machine Learning and Data Analysis*, 1(5):621–631, 2013.
- 138 [7] AN Karkishchenko and VB Mnukhin. Reflective symmetrization of feature points in images. In  
139 *11th Conference (International) on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information*  
140 *Technologies (PRIA-11-2013) Proceedings. Samara*, pages 209–212, 2013.

141 *Поступила в редакцию*