

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. Исследуется широкий класс периодических движений человека или животного. Требуется найти начало и конец движения, а также определить момент смены типа движения. С этой целью решается задача сегментирования временных рядов. Строится фазовая траектория одного движения и отыскивается его фактическая размерность. Особенностью данной работы является автоматизация процесса нахождения минимальной размерности фазового пространства. По повторению фазовой траектории сегментируются периодические действия человека, а по ее разладке определяется смена типа движения. Анализ качества предлагаемого метода осуществляется на временных рядах, считанных с трехосевого акселерометра.

Ключевые слова: *Временной ряд, фазовая траектория, траекторное попространство.*

DOI:

1 Введение

С активным развитием области беспроводных технологий появилась возможность получать значительные объемы данных с носимых устройств. Анализ этих данных позволяет решать задачи, связанные с различными медицинскими приложениями, например, мониторинг состояния пациента, автоматизированное обнаружение падений для пожилых людей.

Имея дело с данными о движении человека или животного, приходится сталкиваться с “почти периодическими” временными рядами. Возникает задача сегментации таких временных рядов на периодоподобные участки. Основной целью этой работы является определение начала и конца движения. Для этого предлагается адекватная модель построения фазовой траектории. После чего рассматривается способ вычисления минимальной размерности собственного пространства фазовой траектории согласно критерию отсутствия самопересечений. Затем вводится понятие модели фазовой траектории. С помощью этих результатов сегментируются периодические действия человека по повторению фазовой траектории. Помимо этого, предлагается способ извлечения устойчивой начальной фазы конкретного типа движения в собственном пространстве фазовой траектории.

17 Существуют работы, в которых решается задача сегментирования “почти периодиче-
 18 ских” временных рядов, но переход совершается в собственное пространство фиксирован-
 19 ной размерности, равной двум. Нашей же целью является переход в фазовое простран-
 20 ство минимальной размерности, в которой фазовая траектория не имеет самопересечений
 21 с точностью до стандартного отклонения восстановленной траектории.

22 Решение поставленных задач является важным шагом на пути к разработке алгорит-
 23 мов, позволяющих определить разладку движения по фазовой траектории, найти инвари-
 24 ант, сохраняющийся на классах эквивалентности конкретного типа периодического дви-
 25 жения, а также распознать суперпозицию нескольких движений. Эти результаты крайне
 26 важны с точки зрения понимания и моделирования человека, биомедицинского примене-
 27 ния и внесли бы значительный вклад в область анализа биосигналов.

28 2 Постановка задачи

29 Данные, считанные с трехосевого акселерометра, представляют собой временной ряд

$$30 \quad X = \{x(i)\}_{i=1}^m \quad (1)$$

31 Он соответствует выделенному периодическому классу $y \in \mathbb{Y}$ (ходьба, бег, шаги вверх и
 32 вниз по лестнице и т.п.).

33 Декомпозиция временного ряда методом главных компонент. Пусть временной ряд (1)
 34 представлен в виде разложения, каждое слагаемое которого с высокой точностью аппрок-
 35 симируется комбинацией главных компонент траекторной матрицы

$$36 \quad \mathbf{H} = \begin{pmatrix} x(1) & \dots & x(k) \\ x(2) & \dots & x(k+1) \\ \dots & \dots & \dots \\ x(l) & \dots & x(m) \end{pmatrix}$$

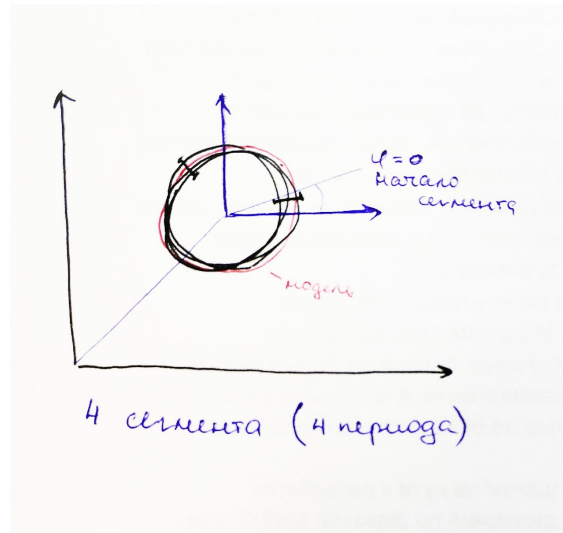
37 Для нахождения аппроксимации выполняется сингулярное разложение ковариационной
 38 матрицы \mathbf{H}

$$39 \quad \frac{1}{l} \mathbf{H}^T \mathbf{H} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T, \quad \mathbf{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_l)$$

40 после чего определяются главные компоненты $\mathbf{y}_k = \mathbf{H} \mathbf{v}_k$ для соответствующих собствен-
 41 ных значений $\mathbf{H}^T \mathbf{H}$.

42 В данной работе требуется построить модель $f \in \mathfrak{F}$, аппроксимирующую фазовую тра-
 43 екторию с помощью минимального числа главных компонент. Каждая модель аппрокси-
 44 мирует временной ряд заданного класса y . Критерием оптимальной размерности является
 45 отсутствие самопересечений фазовой траектории с точностью до стандартного отклонения

восстановленной траектории. Требуется разбить фазовую траекторию на столько сегментов, сколько периодов содержится во временном ряде (1).



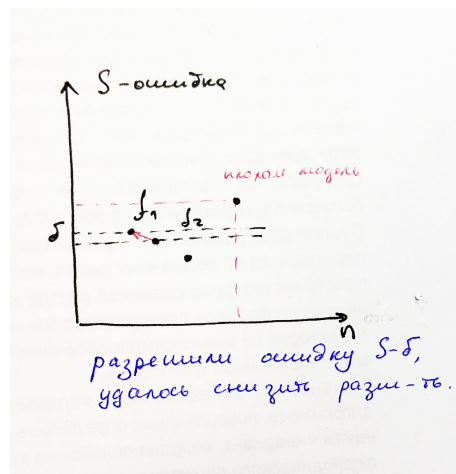
Критерий качества модели. Пусть $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_n$ – выбранные главные компоненты, аппроксимирующие фазовую траекторию. Тогда восстановленная часть траекторной матрицы \mathbf{H}

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

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.



3 Вычислительный эксперимент

В этом разделе исследуется зависимость средней абсолютной ошибки MAPE от размерности фазового пространства, из которого происходит восстановление временного ряда. После чего 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.

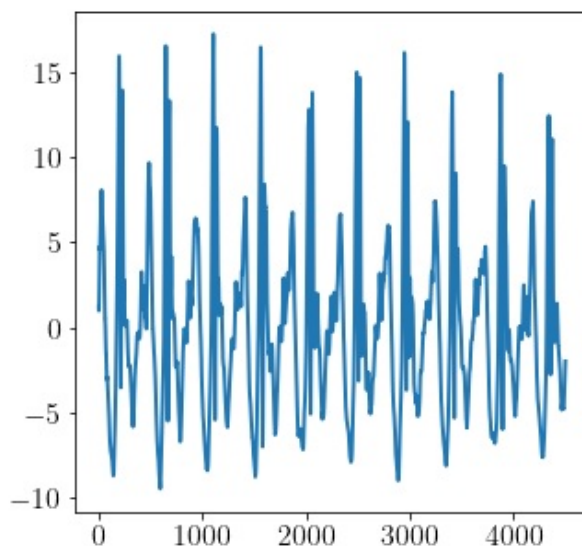


Рис. 1 Исследуемый временной ряд.

Разложение временного ряда с помощью метода главных компонент и его восстановление описано в работе [1]. 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 ярко выраженных самопересечений. Процесс сегментирования фазовой траектории в пространстве меньшей размерности так же описан в [1].

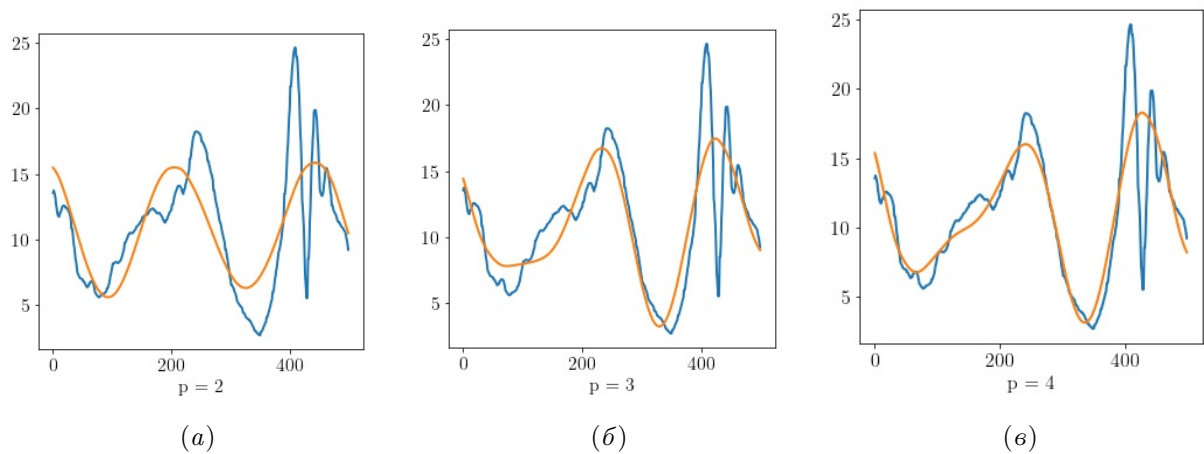


Рис. 2 Исходный временной ряд и его разложение для различных размерностей фазового пространства.

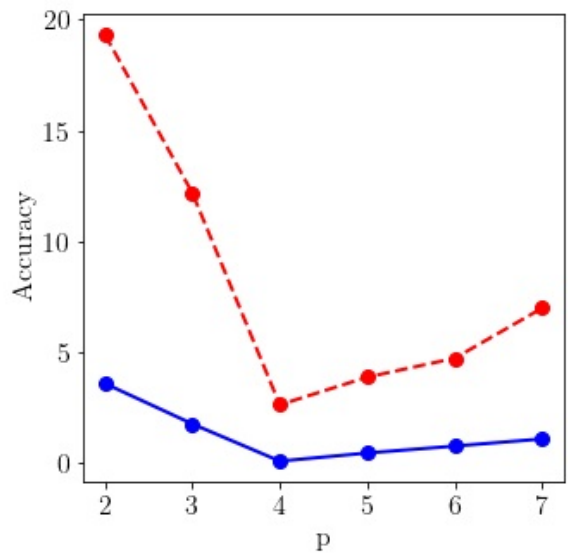


Рис. 3 График зависимости точности аппроксимации фазовой траектории от размерности фазового пространства.