

Прогнозирование намерений. Исследование свойств локальных моделей при пространственном декодировании сигналов головного мозга.*

Болоболова Н. А., Мокропуло Ю. И., Самохина А. М., Шиянов В. А.,

В данной работе исследуются механизмы регуляции движения конечностей нейронами головного мозга. Проверяется гипотеза о влиянии перемещения зон активности нейронов на траекторию движения конечности. Высокая размерность признакового пространства сигналов приводит к неустойчивости модели машинного обучения. Сигнал высокой размерности предлагается аппроксимировать локальной моделью, что существенно уменьшает размерность пространства параметров. Пространство параметров локальной модели используется как признаковое пространство. Таким образом, результирующая модель становится проще и устойчивее. В задаче используются данные электрокортикограмм, собранные на основе исследований активности нейронов головного мозга обезьян.

Ключевые слова: *Brain-Computer Interface (BCI), feature engineering.*

1 Введение

Нейрокомпьютерный интерфейс (Brain Computer Interface) [1] позволяет восстановить мобильность людей с нарушениями двигательных функций. Алгоритм BCI транслирует сигналы нейронов головного мозга в команды для исполняющей системы [1]. Это дает возможность регулировать движение роботизированной конечности в соответствии с механизмами нервной регуляции. [2].

Активность нейронов представляет собой временные всплески сигналов различной интенсивности, их суперпозицию и распространение. Каждый канал имеет доступ к сигналам

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №00-00-00000. Научный руководитель: Стрижов В. В. Задачу поставил: Стрижов В. В. Консультант: Исаченко Р. О.

некоторого количества нейронов, находящихся в небольшой области пространства. Каждый нейрон соединен с помощью множества отростков с приблизительно 20 тысячами других нейронов. Именно эти сигналы представляют собой активность мозга.

В последнее время большое количество работ посвящено методам считывания мозговой активности и декодирования информации [1,3–8]. В этой работе используются данные сигналов, полученных инвазивным методом электрокортикографии (ECoG) [9]. Сложность задачи заключается в избыточной размерности сигнала. Модель прогнозирования намерений является неустойчивой. Для построения устойчивой модели необходимо построить удобное признаковое пространство.

Исследование состоит в восстановлении зависимостей между сигналами ECoG и движениями конечностей. Для точного предсказания траектории движения в трехмерном пространстве требуется снизить размерность признакового пространства.

Стандартные подходы состоят в извлечении информативных признаков из пространственных, частотных и временных характеристик сигнала [1,10]. Большинство методов в смежных работах исследуют частотные характеристики [5, 11, 12]. В работах [6, 13] рассматриваются все признаки вне зависимости от их природы. Наиболее распространёнными моделями являются алгоритмы PLS [6, 14], PCA [4, 15]. В работе [16] используются алгоритмы, построенные на скрытых марковских моделях. В работах [4, 5] авторы рассматривают различные участки сигнала в виде слов. В работе [13] исследован метод отбора признаков с помощью квадратичного программирования (Quadratic Programming Feature Selection [17]).

В данной работе для моделирования фронта распределения сигнала предлагается использовать локальную структуру сигнала. Нейроны и связи между ними образуют граф, описывающий возможные пути распространения сигналов. Точно учесть локальную структуру графа при описании сигнала невозможно, так как это потребует большого количества вычислительных ресурсов. В связи с этим предлагается модель локальной аппроксимации формы и перемещения фронта. На [рис.1] можно заметить, что фронт перемещается по сети в большинстве случаев как единое целое, при этом интенсивность сигнала макси-

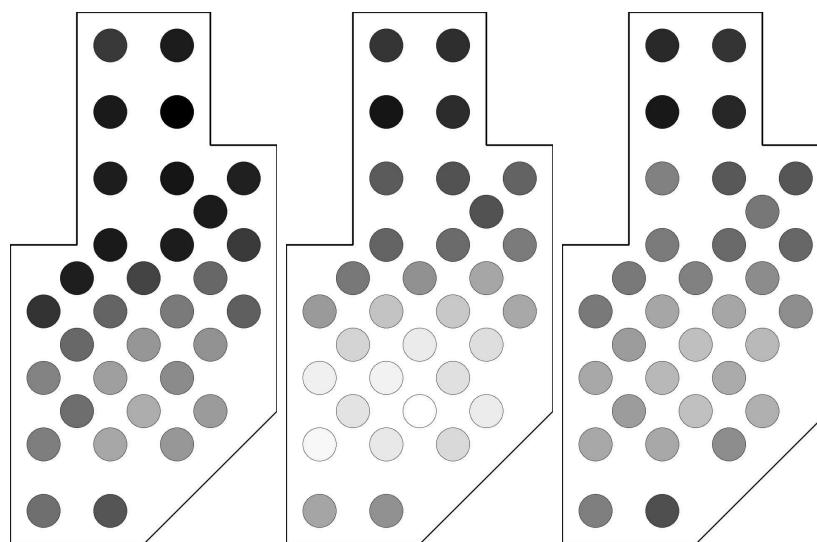


Рис. 1 Изменения значений напряжения на всех каналах

52 мальна в центре множества активных узлов и убывает к периферии. У такой структуры
 53 сигнала есть возможное объяснение, основанное на устройстве нейронной сети. Нейрон
 54 имеет большое количество небольших отростков - дендритов, основной функцией которых
 55 является передача возбуждения к телу нейрона извне, и обычно один аксон, служащий
 56 для передачи импульса от тела другим нейронам или мышечной ткани. Получается, что
 57 импульсы собираются от периферии к центру каждого нейрона, после чего суммарный
 58 импульс, если он достаточно велик, передается по аксону дальше. Таким образом, движе-
 59 ние фронта возбуждения приближается с помощью локальной модели прогнозирования
 60 движений. В качестве признакового описания объектов используются параметры постро-
 61 енной локальной модели. Полученный метод значительно снижает размерность данных,
 62 использует пространственную информацию и сохраняет свойства распространения сиг-
 63 нала. Как следствие, количество параметров конечной модели значительно уменьшается.
 64 Получается более простая аппроксимация сигнала высокой размерности и более устойчи-
 65 вая прогностическая модель.
 66 В эксперименте используются данные с сайта neurotycho.org. Сбор данных производился
 67 с использованием методики Multi-Dimensional Recording. Запись сигналов ECoG и траек-
 68 тории движения руки проводилась одновременно. Каждый из экспериментов длился 15
 69 минут, первые 8 минут производилась запись обучающей выборки, оставшиеся 7 минут –
 70 запись тестовой выборки.

71 2 Постановка задачи

72 Исходные данные - отрезки многомерных временных рядов электрокортикограммы.
 73 Пространство исходных данных имеет размерность $T \times N \times F$, где N – число каналов, T
 74 – количество отсчетов времени, F – дискретный спектр наблюдаемых частот. Используем
 75 двумерное представление данных: построим матрицу значений напряжения $\mathbf{X} \in \mathbb{R}^{T \times (N \cdot F)}$.
 76 Пусть $\mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{T \times 3}$ – массив ответов. Необходимо построить информативное признаковое
 77 пространство для предсказания траектории движения конечности.

Исходные данные представлены в виде массивов:

$$\mathbf{X} = \{x_{ti}\}_{\substack{t=1,\dots,T, \\ i=1,\dots,N \circ F}}; \quad (1)$$

$$\mathbf{Y} = \{y_{ti}\}_{\substack{t=1,\dots,T, \\ i=1,2,3}}; \quad (2)$$

где \mathbf{Y} – массив ответов. Объектом будем называть вектор $\mathbf{x}_t \in \mathbb{R}^{N \circ F}$ с измерениями в каждый отрезок времени, $i = 1, \dots, T$. Вектор состоит из $N \circ F$ элементов, каждый из которых соответствует каналу и частоте. Значение y_{ti} отвечает i -й координате траектории движения конечности.

Модель прогнозирования $f : \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y}$ предлагается искать классе суперпозиции двух моделей: $f = g \circ h : \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y}$. Локальная модель $g : \mathbf{X} \times \Theta \rightarrow \mathbf{X}$ использует локальную пространственную структуру сигнала для аппроксимации перемещения фронта возбуждения. Примером локальной модели является модель авторегрессии:

$$\begin{pmatrix} x_{t+1,i} \\ x_{t,i} \\ \dots \\ x_{T,i} \end{pmatrix} \begin{vmatrix} x_{t,i} & \dots & x_{t-d,i} \\ x_{t-1,i} & \dots & x_{t-d-1,i} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{vmatrix} \begin{pmatrix} \theta_1^i \\ \theta_2^i \\ \dots \\ \theta_d^i \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Модель $g(\mathbf{X}, \Theta)$ решает задачу оптимизации параметров Θ^i для одного временного ряда \mathbf{x}_i :

$$\Theta^i(\mathbf{X}) = \arg \min_{\Theta^i} L(g(\mathbf{x}_i, \Theta^i)) \quad (4)$$

Параметры модели $g(\mathbf{X}, \Theta^i)$, $i = 1, \dots, T$, используются как новое признаковое пространство $\Theta \in \mathbb{R}^{T \times d}$. Примером модели $h(\Theta, \mathbf{w}) : \Theta \rightarrow \mathbf{Y}$ является модель линейной регрессии с параметрами \mathbf{w} . На этапе применения модели $h(\Theta, \mathbf{w})$ построенное признаковое описание Θ используется для предсказания траекторий $\hat{\mathbf{Y}}$. Параметры \mathbf{w} модели $h(\Theta, \mathbf{w})$ находятся путем минимизации функции потерь $L(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{w}, g, h)$:

$$\mathbf{w}^* = \arg \min_{\mathbf{w}} L(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{w}, g, h). \quad (5)$$

В качестве функции потерь можно выбрать, например, квадратичную ошибку:

$$L(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{w}, g, h) = \|\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}\|_2^2. \quad (6)$$

Общая постановка задачи:

$$\mathbf{w}, \Theta = \arg \min_{\mathbf{w}, \Theta} L(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{w}, g, h). \quad (7)$$

Цель работы состоит в нахождении оптимальной локальной модели $g(\mathbf{X}, \Theta)$ для построения информативного признакового пространства.

3 Выбор локальной модели

В связи с перечисленными во введении предположениями выдвигаются гипотезы:

3.1 Гипотеза нормального распределения

Интенсивность сигнала подчиняется модели нормального распределения: $\mathbf{x}_t \in \mathcal{N}(\mathbf{m}(t), \Sigma(t))$. Математическое ожидание $\mathbf{m}(t)$ аппроксимирует положение пика интенсивности в момент времени t , а ковариационная матрица $\Sigma(t)$ описывает форму фронта.

3.2 Гипотеза гамма-распределения

Если предположить дополнительно, что на распределение интенсивности в пределах группы нейронов влияет направленное распространение сигнала внутри группы, можно выдвинуть гипотезу $x_{ti} \in \Gamma(k, \Theta)$, $i = 1, \dots, N$, так как гамма-распределение не является симметричным.

4 Базовый алгоритм

Базовым алгоритмом в данной задаче является PLS [?].

5 Базовый эксперимент

Для проведения эксперимента, из данных электрокортикограммы были выделены частоты сигналов. Выходные данные — трехмерные координаты движения руки обезьяны. Полученные данные были разделены на обучающую и контрольную выборки в отношении

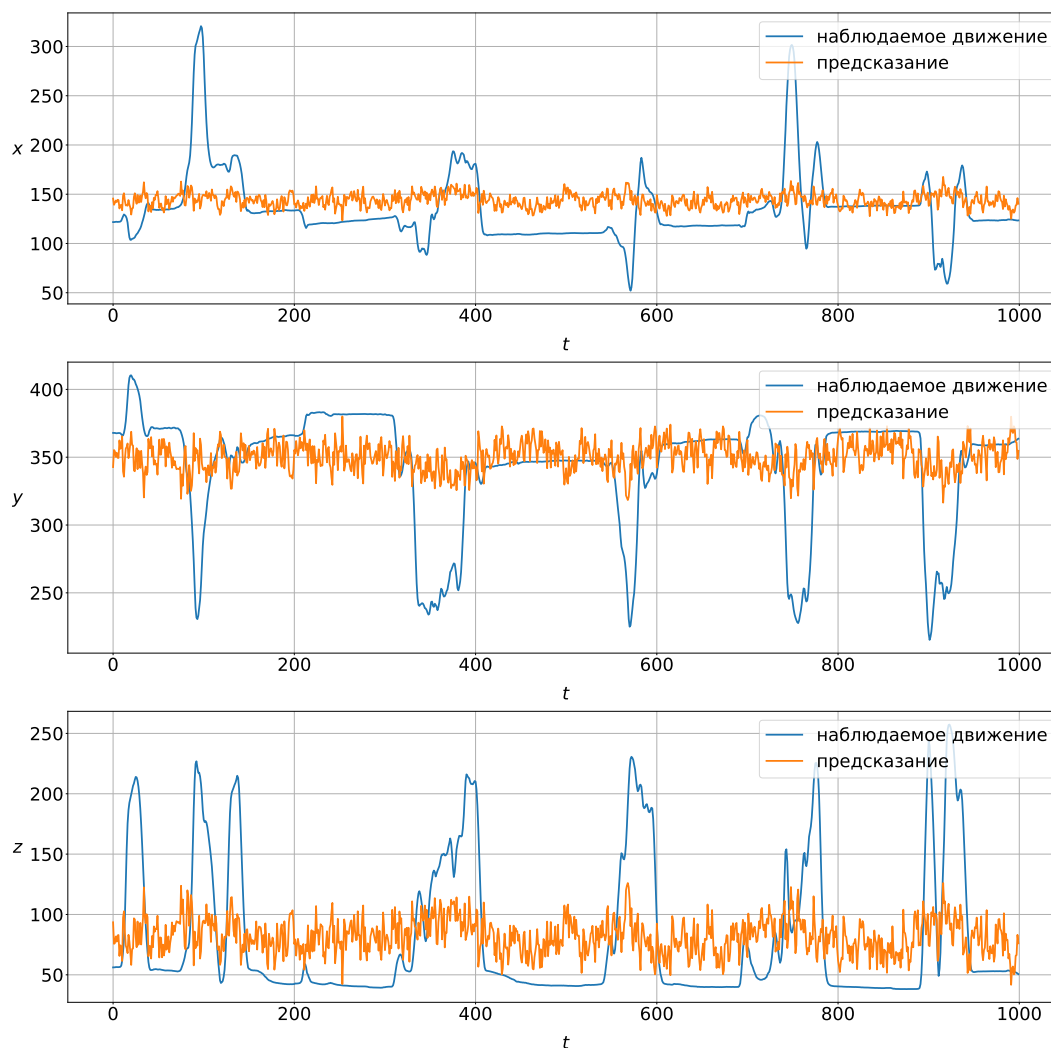


Рис. 2 Результаты эксперимента с базовым алгоритмом

123 два к одному. На полученной выборке был обучен двухкомпонентный PLS. Результаты экс-
124 перимента представлены на рисунке 2. На графике представлена зависимость координаты
125 конечности от времени. Как видно из рисунка, базовый алгоритм довольно плохо справля-
126 ется с поставленной задачей. Несмотря на то, что общий профиль пиков соблюдается, PLS
127 не предсказывает острые пики, а также предсказывает флуктуации координаты во вре-
128 мя, когда конечность почти не движется. В результате погрешность предсказания высока.

129 Для борьбы с этим предлагается уменьшать размерность задачи, а значит и связанность
 130 данных.

131 Литература

- 132 [1] Soichiro Morishita, Keita Sato, Hidenori Watanabe, Yukio Nishimura, Tadashi Isa, Ryu Kato,
 133 Tatsuhiro Nakamura, and Hiroshi Yokoi. Brain-machine interface to control a prosthetic arm
 134 with monkey ECoGs during periodic movements. *Frontiers in Neuroscience*, 8, dec 2014.
- 135 [2] John P. Donoghue. Bridging the brain to the world: A perspective on neural interface systems.
 136 *Neuron*, 60(3):511–521, nov 2008.
- 137 [3] Kejia Hu, Mohsen Jamali, Ziv B. Moses, Carlos A. Ortega, Gabriel N. Friedman, Wendong Xu,
 138 and Ziv M. Williams. Decoding unconstrained arm movements in primates using high-density
 139 electrocorticography signals for brain-machine interface use. *Scientific Reports*, 8(1), jul 2018.
- 140 [4] Yilin Song, Yao Wang, and Jonathan Viventi. Unsupervised learning of spike patterns for seizure
 141 detection and wavefront estimation of high resolution micro electrocorticographic (μ ECoG)
 142 data. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 16(6):418–427, sep 2017.
- 143 [5] Carlos A. Loza and Jose C. Principe. Unsupervised robust detection of behavioral correlates in
 144 ECoG. In *2017 8th International IEEE/EMBS Conference on Neural Engineering (NER)*. IEEE,
 145 may 2017.
- 146 [6] Andrey Eliseyev and Tetiana Aksenova. Penalized multi-way partial least squares for smooth
 147 trajectory decoding from electrocorticographic (ECoG) recording. *PLOS ONE*, 11(5):e0154878,
 148 may 2016.
- 149 [7] Anna Gaglianese, Ben M. Harvey, Mariska J. Vansteensel, Serge O. Dumoulin, Nick F. Ramsey,
 150 and Natalia Petridou. Separate spatial and temporal frequency tuning to visual motion in human
 151 MT measured with ECoG. *Human Brain Mapping*, 38(1):293–307, sep 2016.
- 152 [8] David T Bundy, Mrinal Pahwa, Nicholas Szrama, and Eric C Leuthardt. Decoding three-
 153 dimensional reaching movements using electrocorticographic signals in humans. *Journal of Neural*
 154 *Engineering*, 13(2):026021, feb 2016.
- 155 [9] J.I. Sirven. Electrocorticogram (ECOG). In *Encyclopedia of the Neurological Sciences*, pages
 156 1080–1083. Elsevier, 2014.

-
- [10] David M. Alexander, Peter Jurica, Chris Trengove, Andrey R. Nikolaev, Sergei Gepshtein, Mikhail Zvyagintsev, Klaus Mathiak, Andreas Schulze-Bonhage, Johanna Ruescher, Tonio Ball, and Cees van Leeuwen. Traveling waves and trial averaging: The nature of single-trial and averaged brain responses in large-scale cortical signals. *NeuroImage*, 73:95–112, jun 2013.
- [11] César Márquez Chin, Milos R Popovic, Adam Thrasher, Tracy Cameron, Andres Lozano, and Robert Chen. Identification of arm movements using correlation of electrocorticographic spectral components and kinematic recordings. *Journal of Neural Engineering*, 4(2):146–158, apr 2007.
- [12] Andrey Eliseyev and Tatiana Aksenova. Stable and artifact-resistant decoding of 3d hand trajectories from ECoG signals using the generalized additive model. *Journal of Neural Engineering*, 11(6):066005, oct 2014.
- [13] Anastasia Motrenko and Vadim Strijov. Multi-way feature selection for ECoG-based brain-computer interface. *Expert Systems with Applications*, 114:402–413, dec 2018.
- [14] Roman Rosipal and Nicole Krämer. Overview and recent advances in partial least squares. In *Subspace, Latent Structure and Feature Selection*, pages 34–51. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [15] Hai bin Zhao, Chun yang Yu, Chong Liu, and Hong Wang. ECoG-based brain-computer interface using relative wavelet energy and probabilistic neural network. In *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*. IEEE, oct 2010.
- [16] Rui Zhao, Gerwin Schalk, and Qiang Ji. Coupled hidden markov model for electrocorticographic signal classification. In *2014 22nd International Conference on Pattern Recognition*. IEEE, aug 2014.
- [17] I Rodriguez-Lujan, R Huerta, C Elkan, and C Santa Cruz. Quadratic programming feature selection. *Journal of Machine Learning Research*, 2010.