
Декодирования сигналов головного мозга в аудиоданные

Набиев Мухаммадшариф
Кафедра интеллектуальных систем
МФТИ
nabiev.mf@phystech.edu

Севериков Павел
Кафедра интеллектуальных систем
МФТИ
pseverilov@gmail.com

Аннотация

В данной работе исследуется проблема декодирования сигналов головного мозга в аудиосигналы с использованием физически-информированных методов получения эмбедингов сигналов. Предлагается решить задачу классификации стимулов по соответствующим сегментам аудиоданных. Под стимулом понимается аудиосигнал, который вызвал активность мозга, соответствующая ЭЭГ-сигналу. Данные для задачи представляют собой 668 пар вида аудиофрагмент и мозговая активность в виде ЭЭГ, который он вызвал. Общая продолжительность стимулов 9431 минута. В качестве метрики для выбора оптимальной модели используется средняя доля правильных ответов. Предлагается исследовать методы получения скрытых представлений, которые учитывают физические принципы, с целью улучшения качества обработки аудиосигналов и повышения точности их декодирования. Полученные результаты имеют важное значение для развития интерфейсов мозг-компьютер и понимания принципов обработки аудиосигналов человеческим мозгом.

Keywords auditory EEG decoding · natural speech processing · EEG

1 Введение

Слух, одно из наиболее важных человеческих чувств, играет решающую роль в нашем повседневном взаимодействии с окружающим миром. Однако многие люди со всего мира сталкиваются с проблемами слуха, которые могут серьезно ограничить их способность воспринимать звуки окружающей среды. В свете этих проблем возникает интерес к исследованию взаимосвязи между звуком и мозговыми сигналами.² В данной области выделена задача декодирования мозговых сигналов в аудиоданные.

Задачу декодирования можно поставить двумя способами:³ классификация и регрессия. В данной работе мы сконцентрируемся на задаче классификации. Требуется решить задачу мультиклассовой классификации, когда на вход подается ЭЭГ сигнал и K стимулов, из которых только один соответствует сигналу. Под стимулом подразумевается сегмент аудио, который стимулировал сигнал в мозгу субъекта.

Существует базовое решение этой задачи, использующее расширенную сверточную нейросеть [1]. Оно состоит из трех главных блоков: блок для пространственного преобразования ЭЭГ, энкодер для ЭЭГ и энкодер для стимула. Энкодеры ЭЭГ и стимула получают эмбединги путем свертки со расширенными ядрами. Далее считается близость представлений и определяется стимул.

Известна модификация базового решения с использованием многомерного внимания (Multi-head attention) и управляемого рекуррентного блока (Gated Recurrent Unit) [5]. Также авторы генерируют spectrogram для получения дополнительных признаков, как, например, частота. Spectrogram проходит через управляемый рекуррентный блок, а уже потом подаются на вход в энкодер стимула. После получения скрытых представлений, аналогично базовому решению, считается близость.

В постановке классификации наиболее успешные были работы, которые учитывали пол говорящего и особенности речи, такие как фундаментальная частота. В работе [11] авторы показали высокую чувствительность ЭЭГ-сигнала от фундаментальной частоты, заменив стимул на его фундаментальную

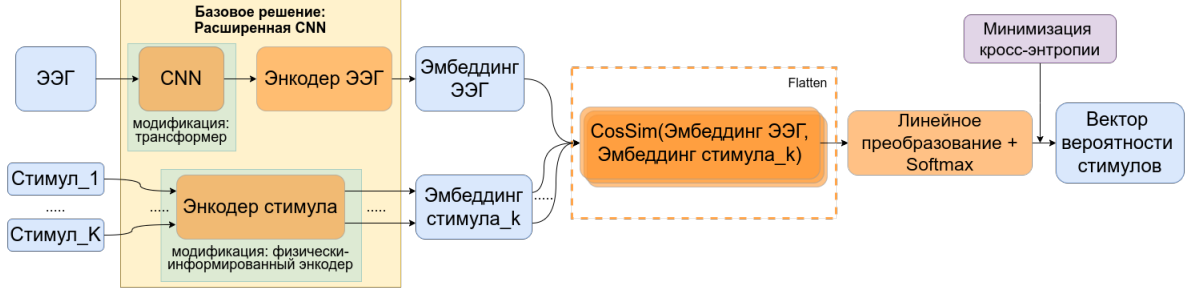


Рис. 1: Архитектура модели. Базовое решение представляет собой расширенную сверточную нейросеть в качестве энкодера ЭЭГ-сигнала и стимулов, а также обычную сверточную нейросеть для пространственного преобразования ЭЭГ-сигнала. Получая скрытые представления ЭЭГ-сигнала и стимулов считается их близость и находится истинный стимул. Предлагается использовать трансформера-кодировщика, чтобы уменьшить число каналов ЭЭГ-сигнала до подачи в расширенную сверточную нейросеть и физико-информированные энкодеры для получения эмбедингов стимулов. После получения эмбедингов стимулов аналогично определятся истинный стимул, как наиболее близкий к эмбедингу ЭЭГ-сигнала.

частоту и значительно улучшили качество за счет ансамблирования базового решения. Хотя и выделение фундаментальной частоты повысило качество в целом, было выяснено, что такой подход сильно зависит от пола говорящего [7]. На качество классификации также влияет частота дискретизации стимулов, как это показано в работе [10]. Чем больше частота дискретизации, тем сложнее установить зависимость, и как следствие, снижается качество.

Современные физико-информированные энкодеры аудиосигналов, учитывают разные детали речи, по типу фонов и информацию на уровне слов [12], поэтому решения использующие такие энкодеры показывают хорошие результаты [15]. Такие решения из аудиосигнала получают скрытое представления за счет физико-информированного энкодера, тем самым в латентном векторе инкапсулируется информация о речи.

Решению задачи декодирования в постановке регрессии посвящена статья [6]. Авторами была предложена модель под названием Pre-LLN FFT, основанная на модели прямого распространения с трансформером (Feed-Forward Transformer) из [9]. За счет модификации FFT и добавления информации о субъекте, в качестве внешнего признака [13] и нормализации подготовительного слоя [16], который идет перед FFT, авторы добились улучшения коэффициента корреляции Пирсона по сравнению с базовым решением использовавшим свертки и нормализации слоев [2].

Предлагается посмотреть влияние физико-информированных энкодеров, конкретно модели Wav2Vec2 и Whisper, для стимулов и их спектрограмм, и трансформера-кодировщика для пространственного преобразования ЭЭГ.

2 Постановка задачи

Каждый объект представляет собой кортеж $(\mathbf{X}^i, \mathbf{s}_1^i, \dots, \mathbf{s}_K^i)$, где $\mathbf{X}^i \in \mathbb{R}^{64 \times T}$ — ЭЭГ-сигнал с 64 каналами, $\mathbf{s}_1^i, \dots, \mathbf{s}_K^i \in \mathbb{R}^{1 \times T}$ стимулы, а K — количество стимулов и T — длина окна. В формальной постановке под стимулом понимается огибающая аудиосегмента длительностью T (рис. 2). Меткой данного объекта будет являться вектор $\mathbf{y}^i \in \{0, 1\}^K$. Метка имеет только одну координату равную единице, которая соответствует стимулу, спровоцировавшему ЭЭГ-сигнал. Требуется по имеющимся $\mathbf{X}^i, \mathbf{s}_1^i, \dots, \mathbf{s}_K^i$ получить распределение вероятностей стимулов $\mathbf{p}^i = [p_1^i, \dots, p_K^i]^T$. Пусть модель представляет собой следующее отображение $\mathbf{f} : \mathbb{R}^{64 \times T} \times (\mathbb{R}^{1 \times T})^K \rightarrow [0, 1]^K$. Задача сводится к минимизации Cross-Entropy Loss:

$$CE = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^K y_k^i \log ([\mathbf{f}(\mathbf{X}^i, \mathbf{S}^i)]_k),$$

где $\mathbf{S}^i = (\mathbf{s}_1^i, \dots, \mathbf{s}_K^i)$. То есть решается задача мультиклассовой классификации.

3 Описание модели

Архитектура модели представлена на рис. 1. Модель получает на вход ЭЭГ-сигнала \mathbf{X} и набор стимулов $\mathbf{s}_1, \dots, \mathbf{s}_K$. В начале снижается размерность ЭЭГ-сигнала от 64 до 8 и подается на вход энкодеру ЭЭГ. Также и стимулы проходят через энкодер и, получив представление ЭЭГ-сигнала \mathbf{E} и представления стимулов $\mathbf{Z}_1, \dots, \mathbf{Z}_K$ в латентном пространстве $\mathbb{R}^{16 \times T}$, считается их близость по формуле $\mathbf{C}_k = \text{CosSim}(\mathbf{E}, \mathbf{Z}_k) = \mathbf{E} \mathbf{Z}_k^T$ для $k \in \{1, \dots, K\}$. Далее для каждой матрицы производится линейное преобразование $c_k = \mathbf{w}^T \mathbf{r}_k + b$, где \mathbf{r}_k — матрица \mathbf{C}_k в виде вектора, $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^{256}$ — вектор коэффициентов и b — свободный член. Итоговое распределение вероятностей получается, как $\mathbf{p} = \text{SoftMax}([c_1, \dots, c_K]^T)$.

3.1 Базовая модель

В базовом решении для пространственного преобразования ЭЭГ-сигнала используется сверточная нейронная сеть. Одномерная свертка с ядром 1×1 и 8 фильтрами объединяет информацию по всем 64 каналам и уменьшает размерность до 8.

Структура энкодеров ЭЭГ и стимулов одинаковая, но они имеют разные веса. Эти энкодеры состоят из n блоков расширенной сверточной нейросети. Блоки идентичные и каждый из них имеет 16 фильтров с ядрами 3×3 . В пределах одного блока, в каждом слое ядро имеет свой коэффициент расширения равное 3^{m-1} .

3.2 Предлагаемые решения

Предлагается заменить блок со сверточной нейросетью на трансформер-кодировщик [14], который за счет механизма внимания сможет улавливать долгосрочные зависимости в ЭЭГ-сигнале.

Модели автоматического распознавания речи (Automatic Speech Recognition) могут извлечь разные детали речи, по типу фонов и частот. В связи с этим было решено использовать современные модели ASR, такие как Wav2Vec2 [3] и Whisper [8], в качестве энкодера стимула.

4 Вычислительный эксперимент

4.1 Данные

Эксперимент будет проверяться на данных [4]. Они представляют собой выборку из 85 человек. Все участники прослушали 6, 7, 8 или 10 стимулов, каждая из которых имеет примерную продолжительность 15 мин. После прослушивания участников спрашивали про содержания аудиофрагмента. Это было с целью мотивировать участников обращать внимания во время прослушивания.

Стимулы были разделены на следующие категории:

- Справочные аудиокниги
- Аудиокниги для детей и взрослых. Если длина превышала 15 мин, то аудиокнига делилась на части
- Аудиокниги с шумом
- Подкасты про ответы на научные вопросы
- Подкасты с видео

Были использованы обработанные данные аудиофрагментов и ЭЭГ-сигналов, а также необработанные аудиофрагменты, с частотами дискретизации равными 64 Гц и 48000 Гц соответственно. Отметим также, что обработанные аудиофрагменты представляют собой огибающую сигнала (рис. 2).

4.2 Описание эксперимента

Для эксперимента была выделена подвыборка из 25 участников и аудиофрагменты, которые они слушали, а также соответствующие записи ЭЭГ-сигналов (рис. 3).

Так как исходные обработанные ЭЭГ-сигналы и аудиофрагменты слишком велики, они были разбиты на окна фиксированной длины. Для каждой пары окон (ЭЭГ-сигнал, истинный стимул) были сгенерированы

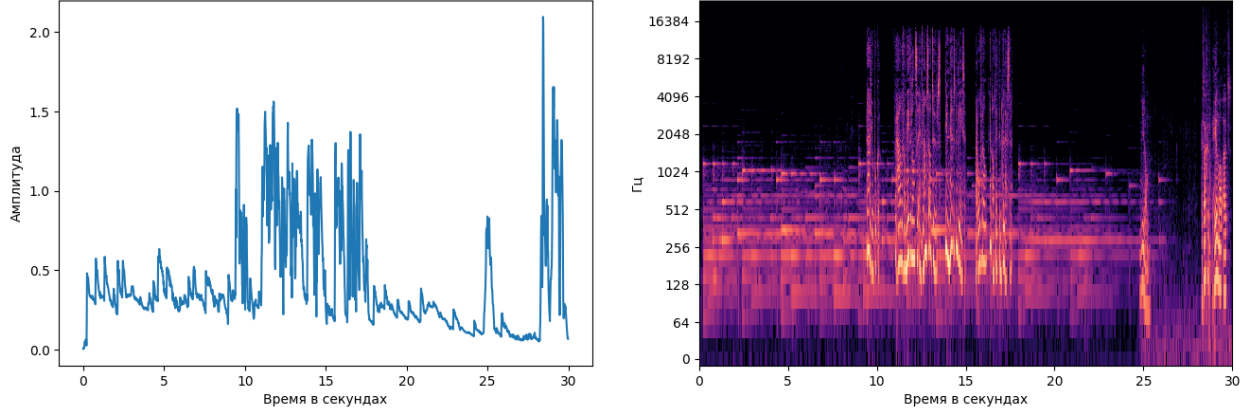


Рис. 2: Пример огибающей(слева) и спектрограммы(справа) одного и того же аудиофрагмента продолжительностью 30 секунд.

$K - 1$ ложных стимулов той же длины, что и длина окна. Далее для обеспечения сбалансированности классов были созданы $K - 1$ копий каждого объекта, со смещением истинного стимула.

Для экспериментов с ASR моделями необработанные аудиофрагменты переводились в подходящий вид. Для каждого аудио с помощью модели создавался эмбединг, который потом выравнивался, по уже готовым данным.

В эксперименте ширина окна была взята равной 5 секунд с шагом 1 секунда. Количество стимулов $K = 5$, то есть один истинный стимул и четыре ложных. Для этих параметров получили 612500 объектов. Эксперимент проводился в 2 эпохи, а размер батча составлял 64 объектов. В качестве метрики взята среднее по участникам долей правильных ответов.

Обозначим множество классов, как $\{0, \dots, K - 1\}$. Учитывая это, метрика качества вычисляется по формуле

$$Score = \frac{1}{22} \sum_{i=1}^{22} \frac{1}{l_i} \sum_{j=1}^{l_i} [y_j^i = \overset{10}{pred_j^i}],$$

где $y_j^i \in \{0, \dots, K - 1\}$ — метка объекта, l_i — количество пар ЭЭГ-стимул для i -го участника, а $pred_j^i$ — предсказание модели на объекте j .

4.3 Результаты эксперимента

Результаты экспериментов приведены в таблице ниже. Лучше всего себя показала модель с трансформер-кодировщиком. Дальше хорошие оценки были получены с использованием эмбедингов полученных от Wav2Vec.

Model	Score (%)
Baseline	99.08 ± 0.27
Transformer Encoder	99.95 ± 0.04
Wav2Vec2	99.43 ± 0.39
Whisper-small	83.31 ± 4.37
Transformer Encoder + Wav2Vec2	99.78 ± 0.16
Transformer Encoder + Whisper-small	95.44 ± 2.50

Таблица 1: Оценка качества на использованных моделях.

	participant_id	age	sex	native_language	handedness
0	sub-001	21 to 23	F	Dutch, Flemish	right
4	sub-005	18 to 20	F	Dutch, Flemish	right
10	sub-011	21 to 23	F	Dutch, Flemish	right
12	sub-013	21 to 23	F	Dutch, Flemish	right
13	sub-014	21 to 23	M	Dutch, Flemish	right
16	sub-017	18 to 20	M	Dutch, Flemish	left
20	sub-021	18 to 20	M	Dutch, Flemish	right
21	sub-022	21 to 23	F	Dutch, Flemish	right
23	sub-024	18 to 20	M	Dutch, Flemish	right
28	sub-029	18 to 20	M	Dutch, Flemish	ambidexter
29	sub-030	21 to 23	M	Dutch, Flemish	right
32	sub-033	21 to 23	M	Dutch, Flemish	right
35	sub-036	24 to 26	F	Dutch, Flemish	right
41	sub-042	18 to 20	F	Dutch, Flemish	right
61	sub-062	21 to 23	M	Dutch, Flemish	right
63	sub-064	21 to 23	F	Dutch, Flemish	right
71	sub-072	21 to 23	F	Dutch, Flemish	right
72	sub-073	21 to 23	M	Dutch, Flemish	right
74	sub-075	24 to 26	M	Dutch, Flemish	right
75	sub-076	24 to 26	F	Dutch, Flemish	left
77	sub-078	18 to 20	M	Dutch, Flemish	right
84	sub-085	21 to 23	F	Dutch, Flemish	right

Рис. 3: Данные для проведения эксперимента. 11

5 Заключение

В данной работе проверялось влияние трансформеров и физико-информированных энкодеров на качество классификации 12

Список литературы

- [1] Bernd Accou, Mohammad Jalilpour-Monesi, Jair Montoya-Martínez, Hugo Van hamme, and Tom Francart. Modeling the relationship between acoustic stimulus and eeg with a dilated convolutional neural network. 2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pages 1175–1179, 2021.
- [2] Bernd Accou, Jonas Vanthornhout, Hugo Van hamme, and Tom Francart. Decoding of the speech envelope from eeg using the vlaai deep neural network, 09 2022.
- [3] Alexei Baevski, Henry Zhou, Abdelrahman Mohamed, and Michael Auli. wav2vec 2.0: A framework for self-supervised learning of speech representations, 2020.
- [4] Lies Bollens, Bernd Accou, Hugo Van hamme, and Tom Francart. SparrKULee: A Speech-evoked Auditory Response Repository of the KU Leuven, containing EEG of 85 participants, 2023.
- [5] Marvin Borsdorf, Saurav Pahuja, Gabriel Ivucic, Siqi Cai, Haizhou Li, and Tanja Schultz. Multi-head attention and gru for improved match-mismatch classification of speech stimulus and eeg response. pages 1–2, 06 2023.
- [6] Zhenyu Piao, Miseul Kim, Hyungchan Yoon, and Hong-Goo Kang. Happyquokka system for icassp 2023 auditory eeg challenge, 2023.

- [7] Corentin Puffay, Jana Van Canneyt, Jonas Vanthornhout, Hugo Van hamme, and Tom Francart. Relating the fundamental frequency of speech with eeg using a dilated convolutional network. In Interspeech, 2022.
- [8] Alec Radford, Jong Wook Kim, Tao Xu, Greg Brockman, Christine McLeavey, and Ilya Sutskever. Robust speech recognition via large-scale weak supervision, 2022.
- [9] Yi Ren, Yangjun Ruan, Xu Tan, Tao Qin, Sheng Zhao, Zhou Zhao, and Tie-Yan Liu. Fastspeech: Fast, robust and controllable text to speech, 2019.
- [10] Mike Thornton, Jonas Auernheimer, Constantin Jehn, Danilo Mandic, and Tobias Reichenbach. Detecting gamma-band responses to the speech envelope for the icassp 2024 auditory eeg decoding signal processing grand challenge. ArXiv, abs/2401.17380, 2024.
- [11] Mike Thornton, Danilo P. Mandic, and Tobias Reichenbach. Relating eeg recordings to speech using envelope tracking and the speech-ffr. ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), pages 1–2, 2023.
- [12] Aditya R. Vaidya, Shailee Jain, and Alexander G. Huth. Self-supervised models of audio effectively explain human cortical responses to speech, 2022.
- [13] Aäron van den Oord, Sander Dieleman, Heiga Zen, Karen Simonyan, Oriol Vinyals, Alex Graves, Nal Kalchbrenner, Andrew Senior, and Koray Kavukcuoglu. WaveNet: A Generative Model for Raw Audio. In Proc. 9th ISCA Workshop on Speech Synthesis Workshop (SSW 9), page 125, 2016.
- [14] Ashish Vaswani, Noam Shazeer, Niki Parmar, Jakob Uszkoreit, Llion Jones, Aidan N. Gomez, Lukasz Kaiser, and Illia Polosukhin. Attention is all you need, 2023.
- [15] Bo Wang, Xiran Xu, Zechen Zhang, Haolin Zhu, Yujie Yan, Xihong Wu, and Jing Chen. Self-supervised speech representation and contextual text embedding for match-mismatch classification with eeg recording. ArXiv, abs/2401.04964, 2024.
- [16] Ruibin Xiong, Yunchang Yang, Di He, Kai Zheng, Shuxin Zheng, Chen Xing, Huishuai Zhang, Yanyan Lan, Liwei Wang, and Tie-Yan Liu. On layer normalization in the transformer architecture, 2020.

1. Метрика - не очень хороший термин, т.к. совпадает с метрикой в строго-математическом плане (как функция, задающая метрическое пространство). Лучше - критерий качества
2. Тут хорошо бы дать ссылку на литературу, какой-нибудь обзор актуальных исследований по ЭЭГ
3. тут части предложения несогласованы. Может "двумя способами: с помощью классификации и регрессии"?
4. посмотреть - проанализировать?
5. Деепричастие "получая" несогласовано с "считается". Лучше тогда "получаются ..., считается их близость"
6. Тут нужна матрица $1 \times T$? Может лучше просто вектор R^T ?
7. Стараются не делать секции с подсекциями без текста. Перед подсекцией можно написать абзац про цели проведения эксперимента
8. Это нужно переписать в настоящее время (или прошлое, такой вариант для эксперимента допустим)
9. Нужно пояснить как отбирались 25 человек из выборки
10. pred лучше писать как pred . Иначе формулу pred можно спутать с перемножением коэффициентов $p * r * e * d$
11. Если эта таблица нужна, то нужно ее переписать в латех-формат, такие картинки лучше не вставлять
12. Очень коротко. Нужно пояснить какую задачу рассмотрели, что предложили, что показали эксперименты, опционально - про планы на будущее ("В дальнейшем планируется доработать предложенный метод с применением `<blablabla>`."