

◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆ **КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ** ◆◆◆◆◆◆◆◆◆◆

УДК 57.087.1, 004.42

Об опыте разработки мобильного комплекса для регистрации электрической активности головного мозга на базе технологии сухих электродов

Юрьев Г.А.*

Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>
e-mail: g.a.yuryev@gmail.com

Куравский Л.С.**

Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-8446>
e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

Юрьева Н.Е.***

Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-876X>
e-mail: yurieva.ne@gmail.com

Рассмотрена технология создания мобильного комплекса для регистрации электрической активности головного мозга, регистрации электроэнцефалографического сигнала с одним каналом. Ранее технологические проблемы, связанные с недостаточной чувствительностью и избирательностью в отношении отношения сигнал/шум, не позволяли использовать в практических приложениях системы регистрации электроэнцефалографической активности на основе так называемых сухих электродов. В то же время даже при небольшом количестве отведений такие сигналы при регистрации, например, от зрительной коры, локализованной в затылочной области головного мозга, могут быть чрезвычайно информативны в контексте анализа операторской деятельности и других видов человеческой деятельности, в которой существенную роль играет произвольное управление вниманием. В данной работе рассмотрен опыт создания мобильного автономного комплекса регистрации таких сигналов для задач мониторинга характеристик операторской деятельности в научных приложениях. Описаны конструктивные особенности такого устройства, созданного на основе технологии Node MCU, которая получает широкое распространение во встроенных системах, собственных узкополосных



усилителях электрического сигнала и сухих электродах, созданных промышленностью в последнее десятилетие. Приведены некоторые примеры практического применения такого комплекса. Обсуждаются наиболее перспективные направления развития техники.

Ключевые слова: человеко-машинные интерфейсы, электроэнцефалография, сухие электроды, Node MCU.

Для цитаты:

Юрьев Г.А., Куравский Л.С., Юрьева Н.Е. Об опыте разработки мобильного комплекса для регистрации электрической активности головного мозга на базе технологии сухих электродов// Моделирование и анализ данных. 2022. Том 12. № 3. С. 40–48. DOI: <https://doi.org/10.17759/mda.2022120303>

***Юрьев Григорий Александрович**, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>, e-mail: g.a.yuryev@gmail.com

****Куравский Лев Семенович**, доктор технических наук, декан факультета информационных технологий, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-8446>, e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

*****Юрьева Наталья Евгеньевна**, кандидат технических наук, научный сотрудник, центра информационных технологий для психологических исследований факультета информационных технологий, Московский государственный психолого-педагогический университет (ФГБОУ ВО МГППУ), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-876X>, e-mail: yurieva.ne@gmail.com

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время научно-технический прогресс оказал значимое влияние на развитие всех сфер медицинских технологий в целом и в частности на электроэнцефалографию. Сейчас ЭЭГ диагностика переживает качественные изменения.

Еще несколько десятилетий назад электроэнцефалографические исследования производили на массивных вычислительных компьютерах, для которых требовалось множество проводов, электроды нуждались в специализированном геле, который улучшал электрическую проводимость сигнала, и точность исследования напрямую зависела от оборудования и поведения испытуемого.

Сейчас же начинают появляться комплексы для мобильной регистрации сигналов ЭЭГ, которые можно модернизировать и которые не требуют громоздких конструкций и кучи проводов. Появились сухие электроды, которые достаточно закрепить плотно прилегающими к голове. Они готовы к использованию без дополнительных манипуляций таких, как усиливающий электрическую проводимость гель. Так же и модули усиления сигнала не обошли стороной. В настоящее время, для электроэнцефалографии разработали и производят компактные усилители электрических сигналов, работающие даже эффективнее прежних, и которые являются более экономичными.



Появилась принципиальная возможность вывести полевые ЭЭГ исследования на новый уровень. Благодаря компактному мобильному комплексу регистрации и записи ЭЭГ сигналов стало возможным исследовать электрическую активность головного мозга пилотов самолётов. Данные исследования могут помочь выяснить какие процессы происходят в мозгу пилотов и как именно они выражены, а также как влияет стресс на когнитивные функции мозга.

Теперь достаточно поместить на голову испытуемого небольшой прибор схожий с полноразмерными наушниками и можно производить запись и анализ данных электрической активности коры головного мозга. Все данные могут передаваться через UDP или же Wi-Fi соединение и обрабатываться, непосредственно, на персональном компьютере, и визуализироваться с использованием клиент-серверных технологий.

2. ТЕХНИЧЕСКАЯ АРХИТЕКТУРА МОБИЛЬНОГО КОМПЛЕКСА РЕГИСТРАЦИИ ЭЭГ

Был разработан мобильный комплекс регистрации электрической активности коры головного мозга, позволяющий записывать и проводить первичную обработку ЭЭГ сигнала и его визуализацию.

Структурно комплекс можно разделить на два блока – первый отвечает за регистрацию сигнала и его передачу устройству приёмнику, второй авторизует соединения с передатчиками и осуществляет разделение сигналов, поступающих с нескольких каналов регистрации. На рис. 1 представлена схема взаимодействий внутри комплекса.

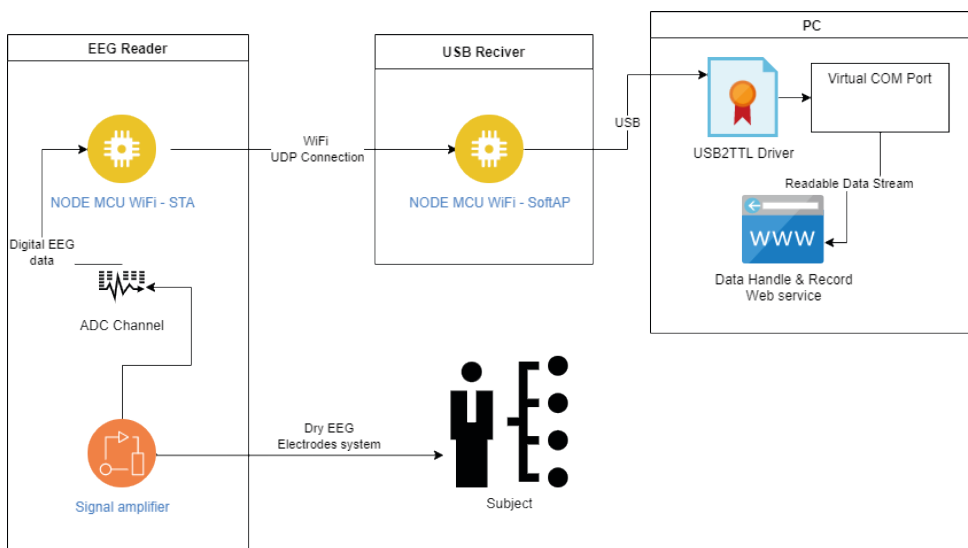


Рис. 1 Архитектура мобильного комплекса регистрации электрической активности мозга.

Устройства разработаны на базе платформы NodeMCU. Это open-source проект, способный выполнять скрипты на языке Lua. Модули, разработанные на базе таких платформ, используются для создания систем с удаленным управлением.

В роли приёмника сигнала выступает плата ESP8266 NodeMCU V3, представленная на рис. 2.

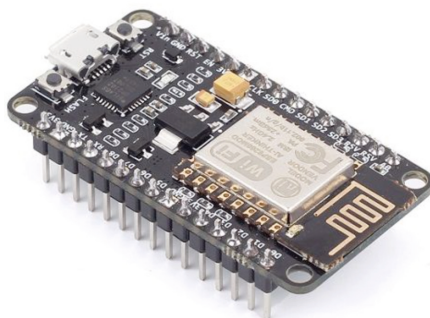


Рис. 2 плата ESP8266 NodeMCU V3.

В роли передатчика сигнала модуль WeMos D1 ESP8266 NodeMCU, со встроенной системой питания и заряда аккумулятора формата 18650, представленный на рис. 3.

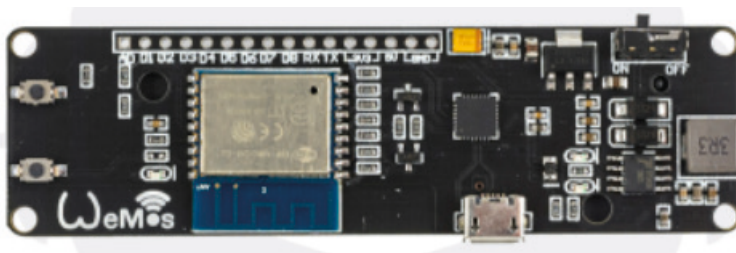


Рис. 3 модуль ESP8266 WeMos D1 NodeMCU.

Приёмник после включения настраивает виртуальный последовательный порт, через который осуществляется взаимодействие с программным обеспечением для ПК. Затем модуль ESP находящийся на плате переводится в режим точки доступа.

Передатчик после включения, осуществляет непрерывный поиск точки доступа, в качестве которой выступает приёмник. После авторизации устанавливается UDP соединение, через которое передатчик получает управляющие команды и осуществляет трансляцию данных, поступающих с АЦП.

Передатчик имеет 1 канал АЦП, разрешающая способность которого 10 бит. Таким образом каждое измерение амплитуды сигнала, регистрируемое электродами, представляется как целое число в диапазоне 0–1023. АЦП подключен к усилителю ЭЭГ сигнала.

Система сухих электродов соединена с усилителем, экранированным трёх контактным аудио кабелем. Усилитель содержит регуляторы шумоподавления и уровня



усиления сигнала, что позволяет выполнить настройку модуля усилителя на рабочие характеристики, обеспечивающие оптимальный приём ЭЭГ сигнала с учётом индивидуальных параметров провода подключения и конкретной модели электродов.

По команде, поступающей с приёмника сигнала, передатчик осуществляет чтение значений из буфера АЦП и передачу оцифрованных значений через UDP соединение. Каждое значение маркируется номером канала, что позволяет использовать приёмник для агрегации значений с нескольких передающих устройств. Приёмник осуществляет разбор значений, поступающих через сетевое соединение и формирует поток данных которые записываются в виртуальный последовательный порт работающий поверх USB соединения.

Программное обеспечение для ПК обеспечивающее связывание с модулем приёма сигнала реализовано на базе платформы NodeJS. Оно осуществляет мониторинг сигнала, поступающего с виртуального последовательного порта или через UDP порт, в случае, когда выбрано прямое сетевое соединение с передатчиком. Поступающий сигнал записывается в сыром виде в файл данных, а также подвергается спектральному анализу в реальном масштабе времени (рис. 4).

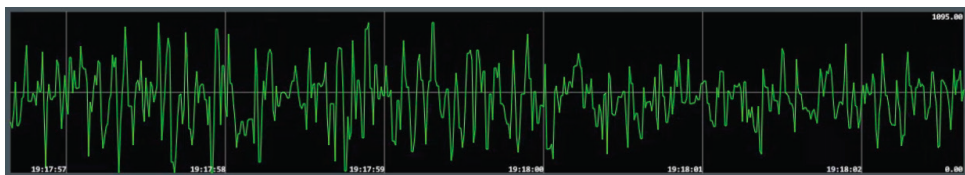


Рис. 4. визуализация ЭЭГ сырого сигнала до преобразованного методом быстрого преобразования Фурье.

Одновременно с спектральным анализом происходит отображение периодограммы (рис. 5) и расчёт мощности спектра по заданным частотным диапазонам ЭЭГ ритмов, показан на рис. 3, 6.

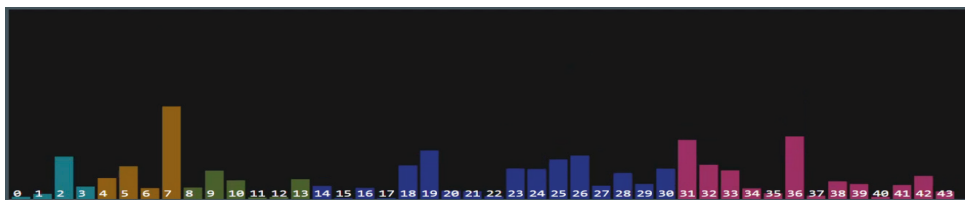


Рис. 5. Периодограмма обработанного ЭЭГ сигнала.

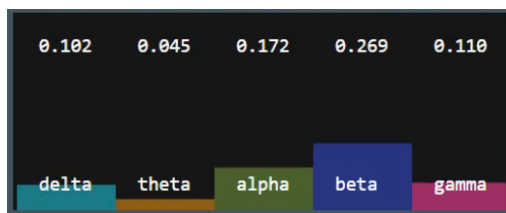


Рис. 6. Расчет мощности спектра по ритмам ЭЭГ.



3. ПРОГРАММНАЯ АРХИТЕКТУРА

Исходя из поставленной задачи, было решено разрабатывать архитектуру на мультипарадигмальном языке программирования JavaScript. Для удобства работы с серверной составляющей проекта была выбрана популярная серверная платформа Node.js.

Node.js как среда исполнения, обеспечивает для программ, написанных на JavaScript, доступ к недоступным из контекста браузера API и базовым функциям операционной системы, например:

- Взаимодействие с устройствами ввода-вывода через собственный API, написанный на языке C++
- Подключение сторонних библиотек, реализованных на разных языках программирования
- Разработка нативных приложений для разных операционных систем

Графический интерфейс пользователя реализован удобным и кроссплатформенным решением, представляющим HTML страницу, данные поступают на сторону клиента через WebSocket соединение. Для отправки данных определенных графиков используются сообщения определяющие какое именно окно графиков потребуется обновить и пересчитать, чтобы отправить на клиентский графический интерфейс в визуализированном виде требуемый график.

Технология WebSocket была выбрана по нескольким причинам: соединение происходит поверх TCP/IP, определяет API для установки соединения между браузером и сервером и при помощи него можно передавать любой объем данных, без появления дополнительной нагрузки на сервер.

Реализованная архитектура, подразумевает серверный скрипт постоянно слушающий канал на наличие сообщений и в зависимости от содержания сообщения решается какое именно действие производится:

- Включить запись данных в текстовый файл
- Закончить запись
- Сохранить в текстовый файл
- Отправить данные на обработку быстрым преобразованием Фурье
- Построить какой-либо из графиков

Реализован буфер данных для быстрого преобразования Фурье, в нем хранятся и накапливаются данные, поступающие с последовательного порта. Буфер может накапливать 256 значений с частотой дискретизации равной 100 Гц. Когда буфер собирает необходимое количество данных срабатывает функция, создающая новый буфер и отправляет накопленные данные и сообщение серверу для дальнейшей обработки и визуализации.

Было принято решение выполнять операции вычисления спектра через быстрое преобразование Фурье, мощности спектра и периодограмм, а также перерисовки графиков с накопительным интервалом в 10 новых значений.

Так же была реализована возможность отправлять посчитанные данные и графики на каждое открытое окно браузера, являющимся клиентом.



Разработана функция визуализации периодограммы, в которой автоматически выбирается размер окна и под него подстраиваются ширина и высота столбцов периодограммы, которые окрашиваются в заданный диапазоном цвет.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была спроектирована архитектура мобильного комплекса регистрации сигнала ЭЭГ, особенностями которого являются:

- Высокая мобильность и автономность, что достигается применением современной технологии регистрации сигналов, основанной на использовании сухих электродов.
- Сетевая архитектура комплекса, позволяющая проводить многоканальную регистрацию, с записью и отображением до нескольких десятков каналов сигнала ЭЭГ.
- Возможность визуализации необработанных данных ЭЭГ и отображения спектральных характеристик сигнала в режиме реального времени с настройкой характеристик анализа и наложением фильтров.

Литература

1. Brown, E. (2014). Web Development with Node and Express. Germany: O'Reilly.
2. Greshnikov I.I., Kuravsky L.S., Yuryev G.A. Principles of Developing a Software and Hardware Complex for Crew Intelligent Support and Training Level Assessment. Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis, 2021. Vol. 11, no. 2, pp. 5–30. DOI: <https://doi.org/10.17759/mda.2021110201> (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I., Greshnikov I.I., and Polyakov B.Y. An approach to diagnostics based on video oculography data analysis. – The British Institute of Non-Destructive Testing, 17th International Conference on Condition Monitoring and Asset Management, June 2021.
4. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I., Yuryeva N.E. Assessing the Aircraft Crew Actions with the Aid of a Human Factor Risk Model. Eksperimental'naya psikhologiya = Experimental Psychology (Russia), 2020. Vol. 13, no. 2, pp. 153–181. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2020130211>.
5. Niedermeyer E. Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields / Niedermeyer E., da Silva F.L. – Lippincott Williams & Wilkins, 2004.
6. Warner, R. M. (1998). Spectral analysis of time-series data. New York: Guilford Press.



On the Experience of Developing a Mobile Complex for Recording the Brain Electrical Activity on the Meringue of Dry Electrode Technology

Grigory A. Yuryev*

Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE), Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>
e-mail: g.a.yuryev@gmail.com

Lev S. Kuravsky**

Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE), Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-8446>
e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

Nataliya E. Yuryeva***

Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE), Moscow, Russia
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-876X>
e-mail: yurieva.ne@gmail.com

The technology of creating a mobile complex for registration of the brain electrical activity, for recording an electroencephalographic signal with one channel, is considered. Previously, technological problems associated with insufficient sensitivity and selectivity in the sense of signal-to-noise ratio did not allow the use of electroencephalographic activity recording systems based on the so-called dry electrodes in practical applications. At the same time, even with a small number of leads, such signals, when recorded, for example, from the visual cortex localized in the occipital region of the brain can be extremely informative in the context of the operator activity analysis and other types of human activity, in which arbitrary control of attention plays an essential role. This paper considers the experience of creating a mobile autonomous complex for recording such signals for the tasks of monitoring the characteristics of the operator's activities in scientific applications. The design features of such a device, created based on Node MCU technology, which is gaining wide distribution in embedded systems, proprietary narrowband amplifiers of the electric signal and dry electrodes created by industry in the last decade, are described. Some examples of practical application of such a complex are given. The most promising directions for the development of technology are discussed.

Keywords: human-machine interfaces, electroencephalography, dry electrodes, Node MCU.

For citation:

Yuryev G.A., Kuravsky L.S., Yuryeva N.E. On the Experience of Developing a Mobile Complex for Recording the Brain Electrical Activity on the Meringue of Dry Electrode Technology. *Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis*, 2022. Vol. 12, no. 3, pp. 40–48. DOI: <https://doi.org/10.17759/mda.2022120303> (In Russ., abstr. in Engl.).



***Grigory A. Yuryev**, PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, head of department, Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE), Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2960-6562>, e-mail: g.a.yuryev@gmail.com

****Lev S. Kuravsky**, Doctor of Engineering, professor, Dean of the Computer Science Faculty, Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE), Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3375-8446>, e-mail: l.s.kuravsky@gmail.com

*****Nataliya E. Yuryeva**, PhD in Engineering, Research Fellow, Information Technology Center for Psychological-Ecological Studies of the Faculty Newsletter-Technologies, Research Associate, Moscow State University of Psychology and Education (MSUPE), Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1419-876X>, e-mail: yurieva.ne@gmail.com

References

1. Brown, E. (2014). Web Development with Node and Express. Germany: O'Reilly.
2. Greshnikov I.I., Kuravsky L.S., Yuryev G.A. Principles of Developing a Software and Hardware Complex for Crew Intelligent Support and Training Level Assessment. Modelirovanie i analiz dannykh = Modelling and Data Analysis, 2021. Vol. 11, no. 2, pp. 5–30. DOI: <https://doi.org/10.17759/mda.2021110201> (In Russ., abstr. in Engl.).
3. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I., Greshnikov I.I., and Polyakov B.Y. An approach to diagnostics based on video oculography data analysis. – The British Institute of Non-Destructive Testing, 17th International Conference on Condition Monitoring and Asset Management, June 2021.
4. Kuravsky L.S., Yuryev G.A., Zlatomrezhev V.I., Yuryeva N.E. Assessing the Aircraft Crew Actions with the Aid of a Human Factor Risk Model. Eksperimental'naya psikhologiya = Experimental Psychology (Russia), 2020. Vol. 13, no. 2, pp. 153–181. DOI: <https://doi.org/10.17759/exppsy.2020130211>.
5. Niedermeyer E. Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields / Niedermeyer E., da Silva F.L. – Lippincott Williams & Wilkins, 2004.
6. Warner, R.M. (1998). Spectral analysis of time-series data. New York: Guilford Press.

Получена 12.07.2022

Принята в печать 21.09.2022

Received 12.07.2022

Accepted 21.09.2022