

АЛГОРИТМИЧЕСКАЯ И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКЗОСКЕЛЕТА

Голубев Э.В.^{1,2}, Варлашин В.В.¹, Мухина А.А.^{1,3}, Шилова М.А.^{1,2}

¹*Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт
робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург;*

²*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург;*

³*Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург*

Ключевые слова: активный экзоскелет, информационно-измерительная система, поверхностная электромиография, реальное время, распределенные вычисления, микроконтроллер.

Аннотация. Рассмотрена программно-алгоритмическая реализация распределенной информационно-измерительной системы активного экзоскелета на базе микроконтроллеров STM32H7. Применение принципов Edge Computing, низкоуровневой оптимизации и библиотек обеспечило синхронный опрос 64 каналов пЭМГ на частоте 16 кГц и расчет вектора мышечных признаков. Интеграция модифицированного фильтра Маджвика позволила точно определять ориентацию звеньев. Применение сетевого стека LwIP на основе протокола UDP обеспечило высокоскоростную трансляцию телеметрии со строгой фазовой синхронностью для непрерывного нейросетевого управления активным экзоскелетом.

ALGORITHMIC AND SOFTWARE SUPPORT FOR A DISTRIBUTED INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM OF AN ACTIVE EXOSKELETON

Golubev E.V.^{1,2}, Varlashin V.V.¹, Mukhina A.A.^{1,3}, Shilova M.A.^{1,2}

¹*Central Research and Development Institute of Robotics and Technical Cybernetics,
Saint-Petersburg;*

²*Baltic State Technical University "VOENMEH" n.a. D.F. Ustinov, Saint-Petersburg;*

³*Saint-Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg*

Keywords: active exoskeleton, information and measurement system, surface electromyography, real-time, edge computing, microcontroller.

Abstract. The paper discusses the software and algorithmic implementation of a distributed information and measurement system for an active exoskeleton based on STM32H7 microcontrollers. The application of Edge Computing principles, low-level peripheral optimization, and specialized libraries enabled synchronous acquisition from 64 sEMG channels at a 16 kHz sampling rate with subsequent muscle feature vector calculation. The integration of a modified Madgwick filter allowed for accurate determination of link orientation. The use of the LwIP network stack based on the UDP protocol ensured high-speed telemetry translation with strict phase synchronicity for continuous neural network-based control of the active exoskeleton.

1. Введение

Эффективность функционирования активных экзоскелетных комплексов напрямую зависит от информационно-измерительной системы (ИИС),

обеспечивающей минимальную задержку, помехозащищенность и фазовую синхронность данных. На сегодняшний день поверхностная электромиография (пЭМГ) признана наиболее эффективным источником данных [1, 2], так как позволяет регистрировать моторные намерения пользователя до начала физического движения. Однако применение традиционных систем вне лабораторий ограничено: они требуют прецизионной установки датчиков в конкретные анатомические точки, что может выполнить только квалифицированный медицинский персонал.

Новизна и уникальность разработанной в рамках НИР [3] ИИС заключается в использовании распределенной архитектуры, реализованной в виде многоканальных растяжимых бандажей. Такой подход позволяет регистрировать сигналы с большой площади конечностей, нивелируя ошибки позиционирования и делая систему доступной для повседневного использования. Предлагаемая алгоритмическая и программная реализация обеспечивает высокоскоростной сбор, калибровку, фильтрацию, вычисление признаков распределенной иерархической системы и базируется на принципах периферийных вычислений (Edge Computing), где обработка сигналов осуществляется непосредственно во встраиваемом ПО микроконтроллеров.

2. Аппаратное устройство ИИС

Функциональная схема аппаратной архитектуры активного экзоскелета приведена на рисунке 1.

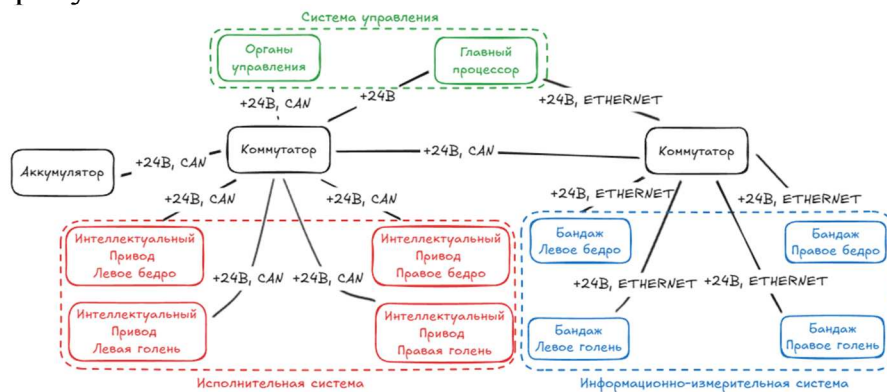


Рис. 1. Функциональная схема аппаратной архитектуры

ИИС состоит из четырех растяжимых бандажей, располагаемых на бедрах и голени оператора. Расположение бандажа на ноге оператора представлено на рисунке 2.

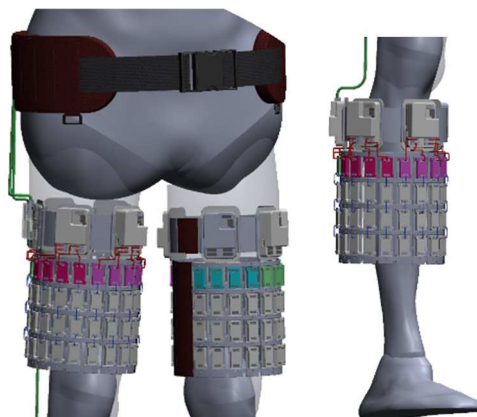


Рис. 2. 3D-модель расположения бандажей на ноге оператора

Функциональная схема ИИС бедра/голени активного экзоскелета представлена на рисунке 3.

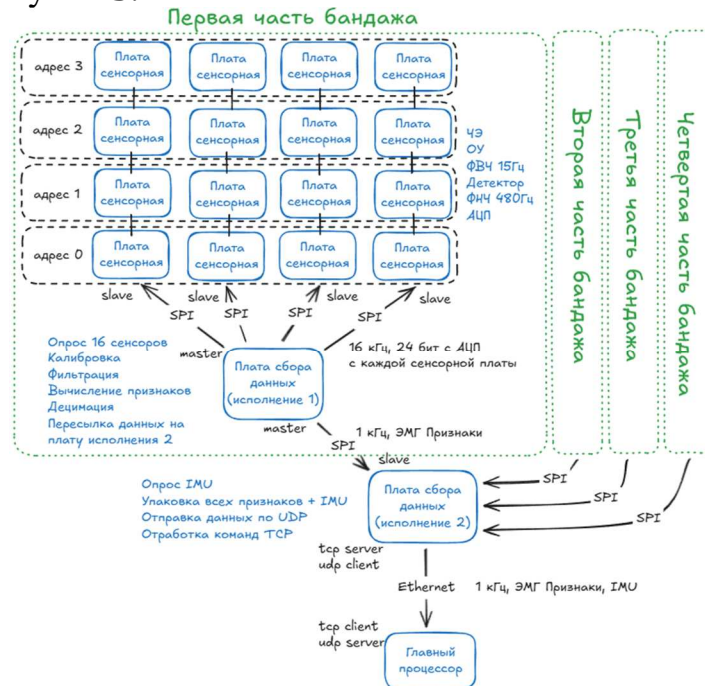


Рис. 3. Функциональная схема ИИС бедра/голени

ИИС одного бандажа имеет распределенную иерархическую архитектуру, разделенную на четыре функциональные части бандажа для многоканального съема пЭМГ и контроля пространственного положения. Первичный уровень системы формируется матрицами из 16 сенсорных плат, каждая из которых содержит чувствительные элементы, операционный усилитель, каскад последовательной фильтрации (ФВЧ 15 Гц и ФНЧ 480 Гц), диодный детектор и АЦП. Поток данных с этих плат с частотой дискретизации 16 кГц и транслируются по четырем шинам SPI на периферийную плату сбора данных (исполнение 1). Данный контроллер выступает в роли master-устройства, осуществляя калибровку, фильтрацию, децимацию и вычисление признаков пЭМГ. Сформированный вектор мышечных признаков с частотой 1 кГц передается по межплатному интерфейсу SPI на плату сбора данных (исполнение 2), которая агрегирует информацию с четырех аналогичных частей бандажа, опрашивает инерциальный измерительный модуль (IMU) и осуществляет финальную упаковку пакета данных. Далее данные передаются на процессор верхнего уровня по протоколу UDP, а прием управляющих команд по протоколу TCP.

3. Программно-алгоритмическое обеспечение ИИС

Центральным узлом системы является высокопроизводительный микроконтроллер семейства STM32H7. Для достижения высокой частоты дискретизации поверхностной электромиографии (пЭМГ) на канал программное обеспечение организовано с использованием механизмов прямого доступа к памяти (DMA), что освобождает процессор от операций пересылки данных. Экспериментальный анализ различных уровней абстракции драйверов показал, что переход от стандартных библиотек Hardware Abstraction Layer (HAL) к прямому управлению регистрами периферии позволяет сократить накладные

задержки на переключение адресов и перезапуск SPI и DMA внутри цикла опроса. Что позволило уложиться в период опроса 62,5 мкс (16 кГц). Циклограмма одного полного опроса по одной из линий SPI замеренная с помощью логического анализатора DSLogic приведена на рисунке 4.

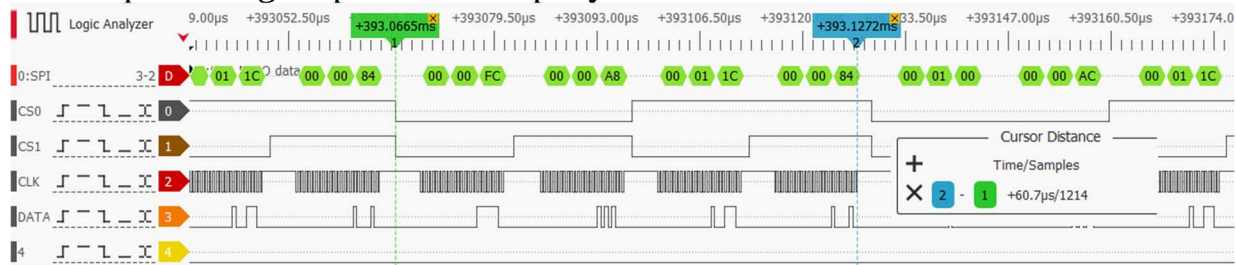


Рис. 4. Циклограмма одного полного опроса по одной из линий SPI

Калибровка обеспечивает идентичность данных со всех сенсоров и включает в себя применение коэффициентов смещения и усиления, определённых заранее и записанных в flash память микроконтроллера. Первичная фильтрация включает каскад Notch-фильтров для режекции сетевых наводок на частотах 50 и 100 Гц, а также программный детектор качества контакта, анализирующий интеграл разности между сырым и отфильтрованным потоками. Коэффициенты фильтров рассчитаны в MATLAB с использованием пакета расширения Signal Processing Toolbox. Выделение огибающей пЭМГ реализовано через цифровой фильтр Баттерворта четвертого порядка с частотой среза 20 Гц, что обеспечивает оптимальный баланс между гладкостью сигнала и групповым временем задержки, составляющим порядка 60 мс. На рисунке 5 изображена реакция системы (единицы АЦП 16 бит) до фильтрации (слева) и вычисленная огибающая (справа) на синусоидальный sweер сигнал, линейно изменяющийся в пределах от 5 до 480 Гц за 5 секунд.

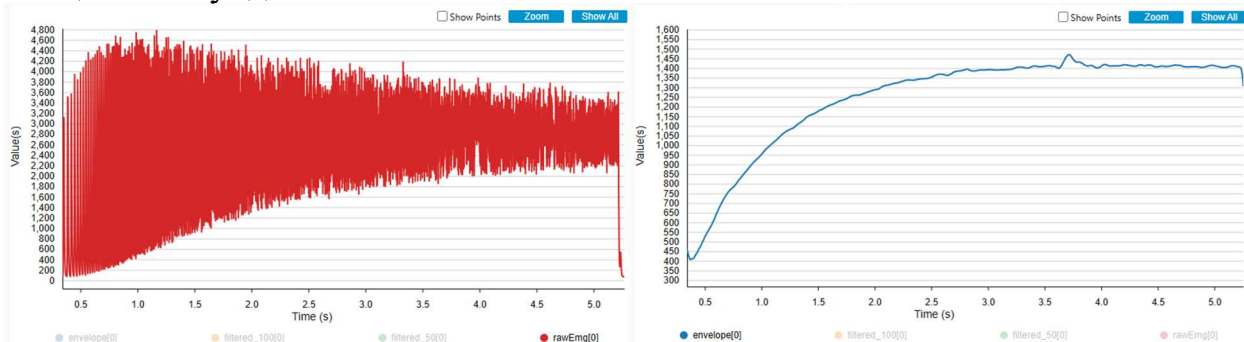


Рис. 5. Реакция система на синусоидальный sweер сигнал

На уровне микроконтроллера по скользящему временному окну рассчитывается вектор мышечных признаков (ВМП) Хаджинса, включающий среднее абсолютное значение (MAV), длину формы волны (WL), количество изменений знака наклона (SSC) и дисперсию (VAR). Это позволяет преобразовать высокочастотный поток в компактный набор из огибающей и ВМП, транслируемый с частотой 1 кГц, который содержит в себе эффективный набор данных для определения намерений оператора и распознавания фаз походки [4].

Параллельно с регистрацией пЭМГ сигналов программное обеспечение осуществляет опрос инерциального модуля LSM6DSO через аппаратный буфер FIFO. Реализована калибровка акселерометра по методу шести граней [5].

Алгоритм подготовки данных включает применение калибровочных параметров и преобразование локальных осей к системе координат бандажа. Далее сформированные векторы обрабатываются фильтром Маджвика [6]. Для исключения кумулятивной ошибки по углу рысканья (Yaw), обусловленной отсутствием магнитометра, расчет ориентации переведен на последовательность вращения ZXY. Подобный подход позволяет изолировать дрейф, переводя его во внутреннее вращение на первом этапе трансформации, что обеспечивает высокую точность определения углов крена и тангажа звеньев системы.

Сетевой стек реализован с использованием библиотеки LwIP. Передача потока признаков осуществляется по протоколу UDP, который за счет отсутствия подтверждения доставки минимизирует транспортные задержки. Полный размер сетевого кадра на физическом уровне составляет 1346 байт, что при частоте 1 кГц формирует трафик объемом 10,77 Мбит/с. Что укладывается в Fast Ethernet 100 Мбит/с для подключения четырех таких систем (для голени и бедра правой и левой ноги) к главному процессору. Для управляющих команд выбран протокол TCP, гарантирующий доставку пакетов. Внедренный механизм идентификации плат на основе уникального ID микроконтроллера позволяет автоматически конфигурировать IP- и MAC-адреса, обеспечивая бесконфликтную работу нескольких модулей в едином сетевом сегменте экзоскелета.

Благодаря сквозной детерминированной организации аппаратной и программной архитектуры распределенная система обеспечивает строгую фазовую синхронность сбора данных, при которой взаимный временной сдвиг между измерительными каналами не превышает одного периода дискретизации выходного потока и составляет менее 1 мс на частоте 1 кГц.

Для ускорения выполнения кода был использован флаг O2 компилятора ARM Compiler V6, который обеспечивает высокий уровень оптимизации. Использование кэш-памяти первого уровня (L1 I-Cache и D-Cache) нивелирует разницу в скоростях доступа между ядром и памятью. Буферы Ethernet и SPI расположены в секциях быстрой памяти AXI SRAM. Модуль контроля памяти (MPU) для буферов настроен с атрибутом Non-cacheable, что гарантирует когерентность данных при работе DMA. Программный конвейер цифровой обработки сигналов (DSP) базируется на аппаратной библиотеке ARM CMSIS-DSP, использующей инструкции математического сопроцессора FPU. Глубокий подход к оптимизации обеспечил высокую скорость опроса большой распределенной системы с калибровкой, фильтрацией и вычислением признаков (плата исполнение 1) и стабильность работы сетевого стека под высокой нагрузкой (плата исполнение 2).

На основе огибающей, ВМП и углах Эйлера на главном процессоре с применением нейронных систем происходит распознавание намерений пользователя и фаз походки и формируется управление интеллектуальными приводами бедра и голени.

4. Заключение

В результате работы успешно реализовано высокооптимизированное программно-алгоритмическое обеспечение распределенной информационно-измерительной системы активного экзоскелета, построенной на принципах

периферийных вычислений (Edge Computing). Применение низкоуровневых драйверов, механизмов DMA, управления памятью и кэшем на микроконтроллере STM32H7 позволило преодолеть ограничения стандартных библиотек HAL и обеспечить стабильный синхронный опрос матрицы сенсорных плат с частотой дискретизации 16 кГц на канал с последующей фильтрацией и расчетом признаков Хаджинса (MAV, WL, SSC, VAR). Интеграция фильтра Маджвика с модифицированной последовательностью вращения ZXY обеспечила точное определение углов ориентации звеньев, а сетевой стек LwIP на базе протокола UDP гарантировал высокоскоростную трансляцию объединенной телеметрии на верхний уровень.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации на 2026 год № 075-00558-26-00 от 12.01.2026, 1024061000023-7-2.2.2, «Разработка и исследование способов применения неинвазивных интерфейсов для повышения эффективности управления модульными активными приводными элементами экзоскелетов промышленного и медицинского назначения» (FNRG-2025-0023).

Список литературы

1. Varghese R.J., Turco M., Marras S., Gigli G., Patino-Guillman S.A., Formica D., Di Pino G., Scialama L., Viola F., Momi E.D., Shiman F., Manna L., Mattoli V. Design, fabrication and evaluation of a stretchable high-density electromyography array // *Sensors*. 2024, vol. 24, no. 6, p. 1810.
2. Lee H., Kim S., Ryu J., Cho M., Park J., Kim S., Park S., Cho H., Lee S., Choi C., Kim S.-W. Stretchable array electromyography sensor with graph neural network for static and dynamic gestures recognition system // *Flexible Electronics*. 2023, vol. 7, no. 1, p. 20.
3. Разработка и исследование способов применения неинвазивных интерфейсов для повышения эффективности управления модульными активными приводными элементами экзоскелетов промышленного и медицинского назначения: отчет о НИОКР (промежут.) / ЦНИИ РТК; рук. А.Ю. Седов; исполн. А.Ю. Тамм, В.В. Варлашин, А.А. Власенко, И.Р. Черемный и др. – Санкт-Петербург, 2025. – 255 с. – № ГР 125042405450-0.
4. Sid'El Moctar S. M., Rida I., Boudaoud S. Time-domain features for sEMG signal classification: A brief survey // *HAL Open Science*. 2023, pp. 1-15.
5. AN4508. Application note. Parameters and calibration of a low-g 3-axis accelerometer [Электронный ресурс] / STMicroelectronics. – 2014. – Режим доступа: https://www.st.com/resource/en/application_note/an4508-parameters-and-calibration-of-a-low-g-3axis-accelerometer-stmicroelectronics.pdf.
6. Madgwick S.O.H. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays // *University of Bristol, UK, Tech. Rep.* 2010, vol. 25, pp. 113-119.

Сведения об авторах:

Голубев Эмиль Владимирович – программист 2 категории;

Варлашин Виктор Витальевич – к.т.н., начальник отдела;

Мухина Арина Александровна – техник;

Шилова Марина Александровна – техник, студент.