

# Передача данных по беспроводному каналу связи мобильной ИИС для исследования кинематического портрета человека

И. А. Токарева<sup>1</sup>, А. В. Царёва<sup>2</sup>, Д. Б. Попов<sup>3</sup>

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

<sup>1</sup>ck\_tokareva3@mail.ru, <sup>2</sup>caanyuta@yandex.ru, <sup>3</sup>dmitrsort20000@mail.ru

**Аннотация.** На протяжении многих лет задача беспроводной передачи данных представляла значительную проблему для разработчиков датчиков, предназначенных в медицинских целях, где кабельные соединения приборов представляют большое неудобство как для врачей, так и для пациентов. В данной области исследований требуется использование современных технологий передачи данных для усовершенствования оборудования, позволяющего оценивать и измерять кинематические характеристики пациента. В докладе описана разработка программного обеспечения для реализации передачи данных с инерциальной измерительной системы на мобильное приложение для платформы iOS с помощью технологий Bluetooth и Wi-Fi, описана процедура калибровки датчика измерительной системы и определены основные метрологические характеристики.

**Ключевые слова:** программное обеспечение, измерительная система, инерциальные датчики, беспроводная передача данных, Bluetooth; Wi-Fi

## I. ВВЕДЕНИЕ

Стандартная методика проведения медицинских измерений предусматривает проводные соединения датчиков (зачастую пациента полностью опутывают кабелями). Наличие проводов в системе ограничивают движения пациента, а передаваемые сигналы изобилуют искажениями из-за перемещений кабелей и наличия электромагнитной интерференции. В настоящее время появляется все больше исследований, при которых кабельные соединения между датчиком и монитором отображения заменяются беспроводными технологиями передачи данных. Беспроводные медицинские датчики даже в домашнем мониторинге успешно работают в разных областях медицины, в том числе и в анализе кинематики движения [1–2]. Данная работа направлена на разработку программного обеспечения, реализующего передачу данных с разработанной измерительной системы на мобильное приложение для платформы iOS, где представляется возможность вносить информацию по пациенту, анализировать поступающие пространственные параметры и строить графические зависимости, а также передавать все это в базу данных.

В данном случае мобильный телефон выполняет роль принимающих станций. С этих принимающих станций

данные могут поступать на веб-сервер (например, базу данных), который осуществляет оценку измерений с возможной постановкой диагноза. Подобным образом реализуются медицинские порталы, позволяющие осуществлять интегрированное наблюдения за пациентами в рамках программ профилактики заболеваний [3].

## II. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

### A. Передача данных по Bluetooth

Стандарт Bluetooth сегодня является одним из самых известных и распространенных. Радиосвязь Bluetooth осуществляется в стандартном ISM-диапазоне (2,4–2,48 ГГц). Спектр сигнала формируется по методу частотных скачков FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) – несущая частота сигнала скачкообразно меняется 1600 раз в секунду (всего предусмотрено 79 рабочих частот) по псевдослучайному закону. Таким образом, если в одном и том же месте работают несколько устройств Bluetooth, то они не мешают друг другу. Передача цифровых данных происходит со скоростью 723,2 Кбит/с [4].

Bluetooth 4.0 включает в себя протоколы: классический Bluetooth, высокоскоростной Bluetooth и Bluetooth с низким энергопотреблением. Высокоскоростной Bluetooth основан на Wi-Fi, а классический Bluetooth состоит из протоколов предыдущих спецификаций Bluetooth. Протокол Bluetooth с низким энергопотреблением предназначен прежде всего для миниатюрных электронных датчиков (использующихся в спортивной обуви, тренажерах, миниатюрных сенсорах, размещаемых на теле пациентов, и т.д.). Низкое энергопотребление достигается за счет использования специального алгоритма работы. Передатчик включается только на время отправки данных, что обеспечивает возможность низкого энергопотребления.

### B. Передача данных по Wi-Fi

Wi-Fi остается одной из наиболее перспективных технологий беспроводной связи. Она стремительно развивается и принимает в себя новые беспроводные решения, позволяющие увеличить скорость передачи данных. Сегодня для Wi-Fi широко распространен стандарт IEEE 802.11n. Он рассчитан на два диапазона (2,4 ГГц и 5 ГГц), помимо этого он также поддерживает технологию MIMO, которая повышает скорость и пропускную способность Wi-Fi. Этот стандарт соответствует поколению Wi-Fi 4.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №22-29-20123 (50 % вклада)

Работа выполнена при финансовой поддержке грант Санкт-Петербургского научного фонда в соответствии с соглашением от 14.04.2022 № 14/2022 (50 % вклада)

В предлагаемом решении предлагается использовать диапазон 2.4 ГГц, так как он:

- охватывает большую территорию;
- имеет более низкую скорость и коэффициент затухания;
- распространяется дальше;
- имеет меньшее число каналов (13 вместо 17);
- в применяемой измерительной системе используется микроконтроллер ESP32, который не позволяет работать с диапазоном Wi-Fi в 5 ГГц.

### C. Алгоритм передачи

В связи с тем, что размер пакета передачи данных в Bluetooth с низким энергопотреблением составляет в среднем 20 байт (в зависимости от реализации аппаратной части), не имеет смысла передавать большие объемы данных с помощью этого способа. Поэтому для передачи данных с разработанной измерительной системы на базе МЭМС на мобильное приложение на iOS было принято решение использовать Wi-Fi. С помощью такой передачи данных не ограничивается скорость и объем передаваемых данных. Bluetooth будет использоваться для управления устройством, то есть для обеспечения запуска, остановки передачи данных, калибровки устройства, задания частоты дискретизации и получения данных о Wi-Fi точке, для того чтобы осуществить подключение и считать большие пакеты данных.

Алгоритм передачи данных можно представить следующим образом:

- мобильное устройство формирует пакет запроса данных от измерительной системы;
- производится отправка запроса на устройство по Bluetooth;
- в зависимости от типа запроса, устройство выполняет команду согласно разработанному протоколу обмена данными;
- устройство отвечает либо сообщением об успешной отправке, либо сообщением об ошибке.

### D. Среда разработки ESP-IDF

Официальной программной средой для разработки приложений ESP32 является платформа ESP-IDF (Espressif's IoT Development Framework). Она представляет собой самодостаточный набор средств для создания программного обеспечения с использованием языков программирования C и C++. ESP-IDF ориентирована на разработку, как общих приложений, так и IoT проектов. ESP-IDF поддерживает огромное количество программных компонентов, таких как RTOS, драйверы периферийных устройств, сетевой стек, различные протоколы и прочее [5]. С помощью данной среды разработки будет разрабатываться программное обеспечение.

### E. Логика работы программного обеспечения

Вся программа разделена на пять сервисов:

- первый сервис занимается исключительно Bluetooth (BLEService);

- второй сервис занимается исключительно Wi-Fi и передачей больших данных (FileTransferService);
- третий сервис отвечает за хранилище данных с датчика (StorageService);
- четвертый сервис занимается непосредственно самим датчиком и всем, что с ним связано (IMUService);
- пятый сервис – это сервис синхронизации, он синхронизирует между собой все вышеупомянутые сервисы (SyncService).

BLEService занимается исключительно приемом и отправкой сообщений по Bluetooth. У этого сервиса есть делегат, то есть BLEService может делегировать выполнение некоторых участков алгоритма программы другим сервисам.

FileTransferService – отвечает за создание точки доступа и веб-сервера для скачивания файла с экспериментальными данными. Аналогично у сервиса FileTransferService есть делегат, которому он делегирует выполнение отдельных участков алгоритма программы.

StorageService отвечает за запись и чтение файла с экспериментальными данными. Он инициализирует хранилище и создает (либо открывает) файл для записи или чтения данных, при этом не поддерживается одновременно считывание и запись данных. Доступ к сервису в один момент времени доступен только для одного сервиса, то есть к нему могут обращаться все сервисы, но он обслуживает только одного.

IMUService – сервис, отвечающий за работу датчика. В его обязанности входит: начальная конфигурация датчика, запись данных в хранилище, запуск и остановка сбора данных, задание частоты дискретизации (от 4 Гц до 1 кГц).

SyncService синхронизирует все вышеупомянутые сервисы, следит за правильностью и очередностью выполнения всех команд. В случае нарушения очередности он уведомляет клиента (мобильное устройство) об ошибке. Данный сервис является делегатом для первого и второго сервиса.

## III. КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА И ЕГО МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

### A. Калибровка датчика

Для уменьшения неопределенности результата измерений следует откалибровать акселерометр и гироскоп. Калибровка акселерометра позволяет выставить “ноль” для вектора силы тяжести, а калибровка гироскопа уменьшает его “дрифт”, то есть статическое отклонение в режиме покоя. Идеально откалиброванный и лежащий горизонтально датчик должен показывать ускорение 1 g по оси Z и нули по всем остальным осям ускорения и угловой скорости [6].

Согласно [6] калибровку следует проводить следующим образом: калибровка по запросу (в разрабатываемом мобильном приложении есть кнопка в блоке управления передачей данных), после чего запись калибровочных значений в энергонезависимую память. При запуске устройства происходит чтение и настройка смещений нуля. Чаще всего при калибровке измеряют

значения по всем 6 осям в покое, сохраняют их в переменные, а затем вычитают из новых прочитанных данных в процессе работы. В применяемой измерительной системе используется датчик ICM-20948. Для максимально точного определения углов поворота платы такой вариант, к сожалению, не подходит: калибровать нужно рекурсивно. Поэтому в работе используется калибровка с помощью готовых библиотек. Производитель микросхем Invensense для своих устройств предоставляет бинарный файл микропрограммы для обработки данных датчика с высокой точностью, вплоть до учета температуры [7]. Программа называется DMP – digital motion processor.

### В. Метрологические характеристики

Согласно технической документации [8] метрологические характеристики датчика ICM-20948 имеют следующие значения (табл. 1).

ТАБЛИЦА I ХАРАКТЕРИСТИКИ ДАТЧИКА ICM-20948

№	Параметры	Гироскоп	Акселерометр
1	Температурная погрешность	±3%	±0.03%
2	Погрешность нелинейности	±0.1%	±0.5%
3	Погрешность чувствительности поперечной оси	±2%	±2%
4	Погрешность начального допуска калибровки	-	±0.5%
5	Погрешность чувствительности к линейному ускорению	±1.5%	-

МХ в относительных единицах для гироскопа  $\gamma_{gyro}$  и акселерометра  $\gamma_{aksel}$  определяются по формулам (1) и (2):

$$\gamma_{gyro} = \sqrt{\gamma_T^2 + \gamma_n^2 + \gamma_n^2 + \gamma_l^2} \quad (1)$$

$$\gamma_{aksel} = \sqrt{\gamma_T^2 + \gamma_n^2 + \gamma_n^2 + \gamma_k^2} \quad (2)$$

где  $\gamma_l$  – температурная погрешность;  $\gamma_n$  – погрешность нелинейности;  $\gamma_n$  – погрешность чувствительности поперечной оси;  $\gamma_l$  – погрешность чувствительности к линейному ускорению;  $\gamma_k$  – погрешность начального допуска калибровки.

Для нахождения общей погрешности результата измерения используется геометрическое суммирование погрешностей, то есть сложение погрешностей как для независимых величин. Тогда (формула 3, 4):

$$\gamma_{общ.gyro} = \gamma_{gyro} = \sqrt{3^2 + 0.1^2 + 2^2 + 1.5^2} = 3.9\%, \quad (3)$$

$$\gamma_{общ.aksel} = \gamma_{aksel} = \sqrt{0.03^2 + 0.5^2 + 2^2 + 0.5^2} = 2.1\%, \quad (4)$$

где  $\gamma_{общ.gyro}$ ,  $\gamma_{общ.aksel}$  – погрешности результата измерения для гироскопа и акселерометра.

Погрешность квантования 16-разрядного АЦП датчика ICM-20948 будет определяться по формуле (5):

$$\gamma_{квант} = (1 / 65536) * 100\% = 0.000015\%. \quad (5)$$

Погрешность квантования появляется вследствие замены мгновенного значения преобразуемого аналогового сигнала ближайшим разрешенным. В силу ее малости ею можно пренебречь.

Основной погрешностью акселерометра является смещение нуля. Смещение нуля возможно определить в статике датчика с регистрацией максимального и минимального значений по оси чувствительности. Согласно документации датчика ICM-20948 значением смещения для акселерометра является 25 mg для осей X и Y и 50 mg для оси Z. Смещение нуля вычисляется по формуле (6):

$$X_{смещ} = ((X_{max} + X_{min}) / 2) - X_0, \quad (6)$$

где  $X_{max}$ ,  $X_{min}$  – соответственно максимальное и минимальное зарегистрированное значение по оси чувствительности,  $X_0$  – значение смещение нуля датчика согласно документации.

Вывив значения смещения нуля по осям X, Y, Z в ходе эксперимента. Расположив измерительный модуль горизонтально, запустим сбор данных несколько раз и зарегистрируем максимальные и минимальные значения смещения нуля, полученные экспериментально (табл. 2).

ТАБЛИЦА II РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ ЗНАЧЕНИЙ СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ

	Ось X, mg	Ось Y, mg	Ось Z, mg
Максимально полученное значение смещения нуля	18	0	10
Минимально полученное значение смещения нуля	0	-5	6

Тогда смещение нуля по каждой оси будет определяться согласно формуле (6). Расчет представлен ниже (формула 7, 8, 9).

Для оси X:

$$X_{смещ} = ((18 + 0) / 2) - 25 = |16mg|, \quad (7)$$

Для оси Y:

$$Y_{смещ} = ((0 - 5) / 2) - 25 = |27.5mg|, \quad (8)$$

Для оси Z:

$$Z_{смещ} = ((10 - 6) / 2) - 50 = |48mg|, \quad (9)$$

Результаты расчета смещения нуля акселерометра по всем осям представлены в табл. 3.

ТАБЛИЦА III СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ АКСЕЛЕРОМЕТРА ПО ОСЯМ X, Y, Z

	Ось X, mg	Ось Y, mg	Ось Z, mg
Смещения нуля	16	27.5	48

## IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы разработан алгоритм передачи данных и программное обеспечение, осуществляющее передачу информативных параметров степени восстановления навыка ходьбы пациентов в мобильное приложение. Данные передаются по Wi-Fi по 6 осям (X, Y, Z для акселерометра и гироскопа), также для данной передачи разработан собственный протокол

обмена данными. Описаны методы и логика работы программного обеспечения. Реализована калибровка датчика, описаны основные метрологические характеристики.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Власенко В.П. Технология “Motion Capture”. Периферийные устройства. Запорожье; 2007. URL: <http://www.bestreferat.ru/referat-401678.html>.
- [2] Борзиков В.В., Рукина Н.Н., Воробьева О.В., Кузнецов А.Н., Белова А.Н. Видеоанализ движений человека в клинической практике (обзор) 2015; 7: 5.
- [3] Кладиус Мур, Игорь Чудовский. Упрощение процессов медицинских измерений с использованием беспроводных датчиков. URL: [https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/2006\\_2\\_53.pdf](https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/2006_2_53.pdf)
- [4] Калачев, Лапин, Пелихов: Основы работы с технологией Bluetooth Low Energy: Учебное пособие. 2020: 128–130.
- [5] ESP-IDF Programming guide – официальная документация. URL: [ESP-IDF Programming Guide – ESP32 — ESP-IDF Programming Guide latest documentation \(espressif.com\)](https://www.espressif.com/en_US/rn/esp-idf/programming-guide).
- [6] Болотин Ю.В., Вязьмин В.С. Калибровка инерциального измерительного блока: Учебное пособие: 78–79.
- [7] Krishnan C., Washabaugh E.P., Seetharaman Y. A low cost real-time motion tracking approach using webcam technology // J Biomech 2015; 48(3): 544–548, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.11.048>.
- [8] Документация на датчик: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2016/06/DS-000189-ICM-20948-v1.3.pdf>