

УДК 621.395.721.5

**БЕСПРОВОДНАЯ АУДИОПЛАТФОРМА С СИНХРОНИЗАЦИЕЙ RTP
НА ОСНОВЕ ESP32-S3 И ESP32-PICO-MINI**

Топорков Н.М., студент гр. ПМ33, III курс

Научный руководитель: Прутский А.С., преподаватель кафедры информаци-
онных технологий КубГУ

ФБГОУ ВО «Кубанский государственный университет»

г. Краснодар

Динамичное развитие технологий Интернета вещей (IoT) и беспроводной связи стимулирует появление новых решений в области потребительской электроники, в частности, в сегменте аудиотехники. Традиционные проводные многоканальные системы уступают место беспроводным, предлагающим гибкость конфигурации, простоту установки и мобильность. Коммерческие мультитрум-системы (например, Sonos, Yamaha MusicCast) часто отличаются высокой стоимостью и замкнутой экосистемой, что ограничивает их доступность и возможности кастомизации [1, 3]. В этой связи разработка открытых, модульных и экономичных решений на базе популярных микроконтроллеров представляет значительный научно-практический интерес.

Одной из базовых технических задач при построении распределенных аудиосистем является обеспечение точной временной синхронизации между независимыми воспроизводящими устройствами [2]. Рассинхронизация даже на уровне десятков микросекунд приводит к фазовым искажениям и ухудшению восприятия звука, делая невозможным создание целостного стерео- или объемного звукового поля. Целью данной работы является исследование и практическая реализация архитектуры беспроводной аудиосистемы на платформе ESP32, решающей задачу синхронного воспроизведения за счет применения протокола точного времени RTP и оптимизированной схемы передачи данных.

В рамках исследования был проведен сравнительный анализ микроконтроллеров ESP32-S3-WROOM и ESP32-PICO-MINI [5]. ESP32-S3 был выбран в качестве основного вычислительного узла благодаря двухъядерному процессору Xtensa LX7, повышенному объему памяти (512 КБ SRAM, 8 МБ PSRAM) и поддержке USB OTG [4]. Это важно для задач буферизации и обработки сетевого трафика. ESP32-PICO-MINI, отличающийся сверхкомпактными габаритами и низким энергопотреблением, был интегрирован для выделенной обработки Bluetooth-трафика по профилю A2DP. За счет этого можно разгрузить основной процессор и повысить стабильность приема аудиопотока с внешних источников (смартфонов, компьютеров). Для качественного преобразования цифрового аудиосигнала в аналоговый выбран усилитель класса D TAS2563, обладающий высокой эффективностью, встроенным DSP для обработки сигналов и возможностью работы в режиме TDM (Time Division

Multiplexing). Эти характеристики необходимы для потенциального расширения системы до многоканальных конфигураций.

Основным механизмом, обеспечивающим синхронность работы, является реализация протокола Precision Time Protocol (PTP). В отличие от Network Time Protocol (NTP), PTP предназначен для локальных сетей и позволяет компенсировать задержки передачи пакетов, достигая точности синхронизации до субмикросекунд (рисунок 1). В разработанной архитектуре мастер-устройство (активная колонка) выполняет роль PTP Grandmaster. Обмен служебными пакетами (Sync, Follow_Up, Delay_Req, Delay_Resp) по отдельным unicast-каналам позволяет каждому ведомому (slave) устройству рассчитать сетевую задержку и смещение своих внутренних часов относительно мастера. Полученные коррекции применяются к моменту начала воспроизведения аудиофреймов, что гарантирует их одновременное звучание на всех колонках системы.

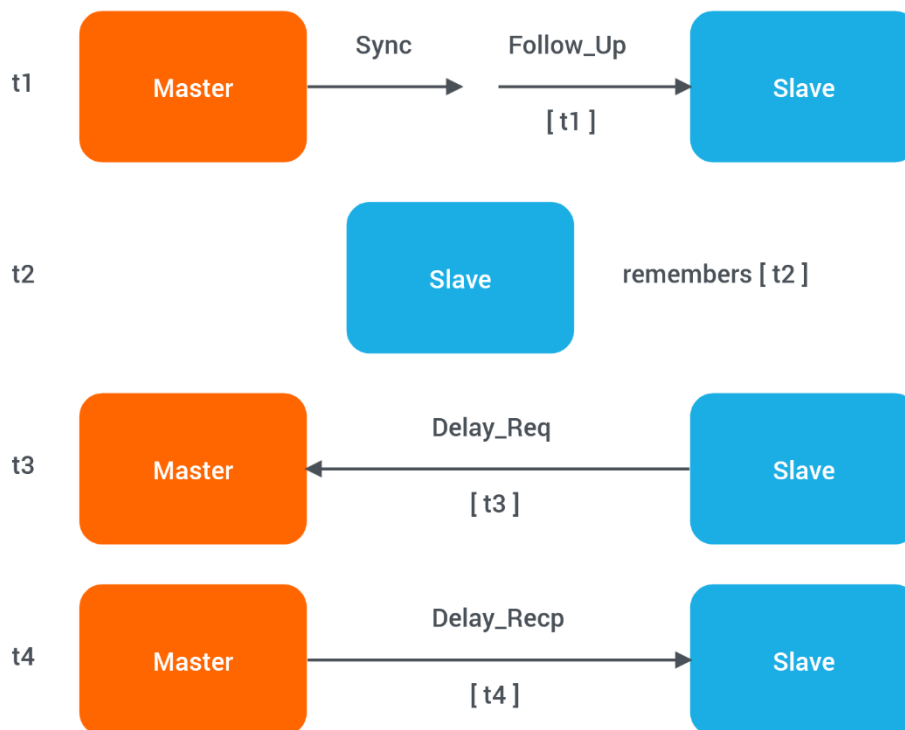


Рисунок 1. Работа PTP протокола

Система построена по архитектуре «мастер-ведомый» (master-slave). Мастер-устройство принимает аудиопоток от источника (например, смартфона) по Bluetooth A2DP. Принятые данные через интерфейс SPI передаются на основной микроконтроллер ESP32-S3, где происходит их буферизация (рисунок 2). Для эффективного управления потоком данных реализована схема «пинг-понг» буферов (кольцевые буферы). Такой подход исключает конфликты при одновременной записи и чтении. Подготовленный аудиопоток передается в сеть Wi-Fi.

В ходе исследования были проанализированы различные стратегии передачи. Использование UDP в режиме broadcast показало ограниченную

стабильность из-за потерь пакетов и необходимости реализации механизмов повторной отправки и упорядочивания. Наиболее устойчивой для передачи основного аудиотрафика оказалась стратегия на основе TCP, которая, несмотря на бóльшую служебную нагрузку, обеспечивает надежную доставку данных. Скорость передачи была оптимизирована за счет настройки физического уровня Wi-Fi (параметры MCS и SGI), что позволило достичь скорости, достаточной для аудиопотока высокого качества. Для обмена служебной информацией (команды управления, данные о состоянии батареи, IGMP-сообщения) используется легковесное моноветвление поверх UDP.

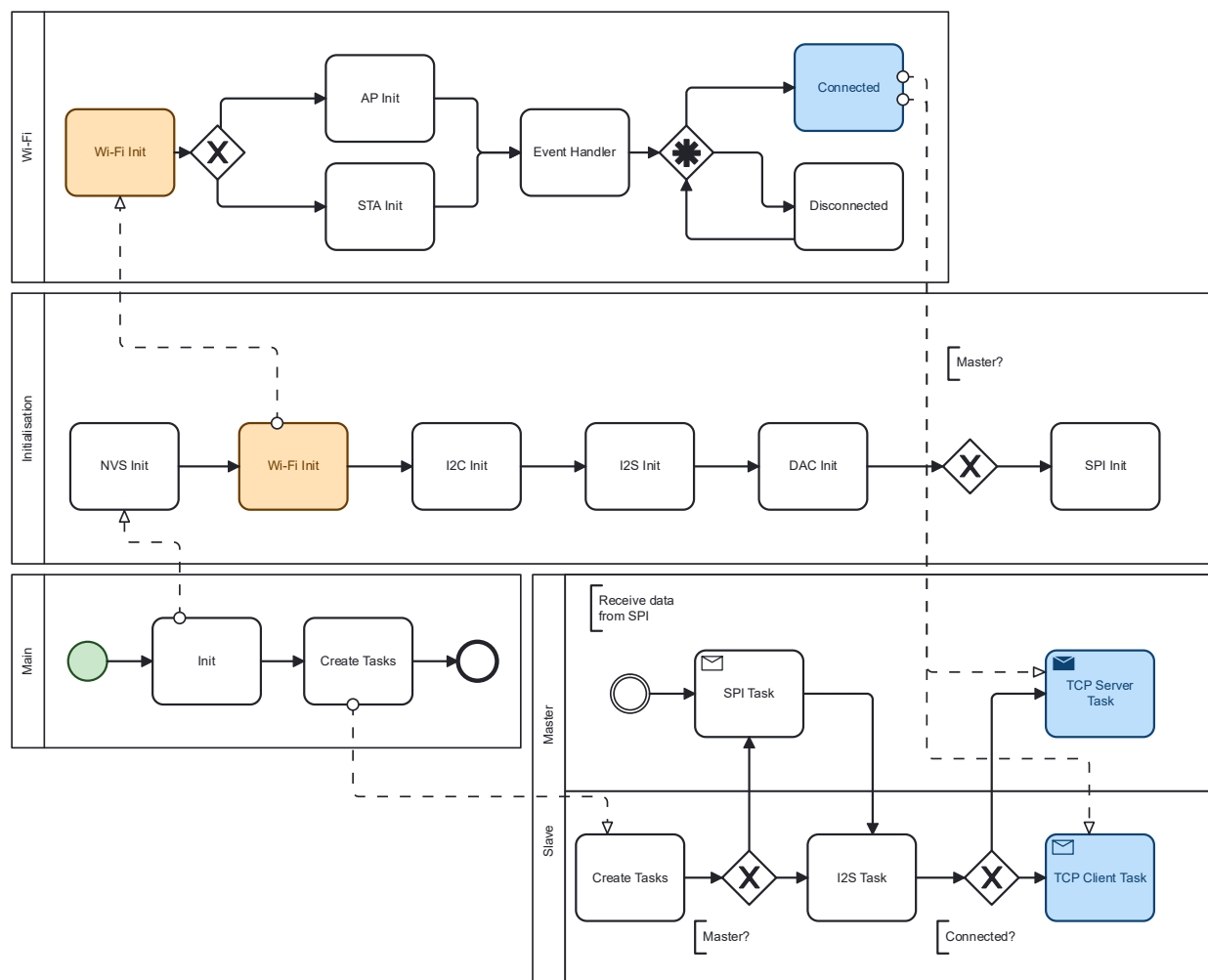


Рисунок 2. Диаграмма модуля обработки микроконтроллера ESP32-S3

Ведомые устройства (slaves) подключаются к Wi-Fi-сети, созданной мастером, устанавливают TCP-соединение для приема аудиоданных и отдельные UDP-соединения для синхронизации по RTP и обмена служебными данными. Принятые аудиофреймы помещаются в буфер, а момент их вывода на ЦАП определяется на основе временных меток, полученных в процессе RTP-синхронизации. Это позволяет всем динамикам в системе воспроизводить один и тот же звуковой фрагмент синхронно, с точностью, определяемой точностью протокола RTP.

Важным аспектом реализации стала низкоуровневая настройка ЦАП TAS2563 через интерфейс I²C. Были сконфигурированы регистры устройства для работы в режиме TDM с заданной частотой дискретизации (44.1/48 кГц), настроено микширование каналов и цифровое усиление. Для вывода звука используется интерфейс I²S, сконфигурированный для работы с TDM-слотами.

Учитывая портативный характер устройства, была проведена работа по оптимизации энергопотребления. Основным механизмом стало использование энергосберегающих режимов микроконтроллеров, в частности, Light-Sleep. В этом режиме ядро процессора приостанавливается, а состояние RAM сохраняется, что позволяет снизить ток потребления ведомых устройств в состоянии ожидания до ~10 мА. Для мастер-устройства реализована логика перехода в режим глубокого сна при длительном бездействии с возможностью пробуждения по внешнему событию. Расчеты, проведенные для литий-ионного аккумулятора емкостью 3000 мАч, показали, что система способна работать до 4 часов в режиме непрерывного воспроизведения на средней громкости и до 12–13 суток в режиме ожидания (для ведомых устройств), что подтверждает эффективность выбранных решений.

В результате проведенного исследования разработан и реализован функциональный прототип беспроводной распределенной аудиосистемы на базе микроконтроллеров ESP32. Доказана практическая возможность использования связки ESP32-S3 и ESP32-PICO-MINI для разделения задач обработки Wi-Fi и Bluetooth трафика, что повышает общую стабильность системы. Реализация синхронизации на основе протокола RTP подтвердила свою эффективность для задачи одновременного воспроизведения аудио на нескольких независимых устройствах. Предложенная архитектура передачи данных, сочетающая TCP для основного аудиопотока и UDP для служебных сообщений и синхронизации, обеспечила необходимую надежность и минимальную задержку. Проведенная оптимизация энергопотребления позволила достичь показателей автономности, сопоставимых с коммерческими портативными решениями.

Перспективы дальнейшего развития системы видятся в следующих направлениях: реализация сети Wi-Fi для улучшения масштабируемости и охвата; интеграция микрофонных массивов на ведомых устройствах для автоматического определения их пространственного положения и назначения ролей (левый/правый канал, сателлиты); внедрение алгоритмов обработки звука для создания эффекта объемного звучания (Dolby Atmos, DTS:X); разработка специализированного мобильного приложения для расширенного управления и настройки системы; а также усовершенствование акустического оформления корпусов для улучшения качества звучания.

Разработанное решение представляет собой открытую, модульную и масштабируемую платформу, которая может служить основой как для исследовательских проектов в области распределенных систем реального времени, так и для создания коммерческих продуктов в сегменте умного дома и портативной аудиотехники.

Список литературы:

1. Абдуллаев У.М. Методы и алгоритмы обработки звуковых сигналов // Бюллетень науки и практики. 2020. №6. С. 25–30.
2. Абрамов В.А., Попов О.Б., Рихтер С.Г. Аудиопроцессорная обработка сигналов цифрового вещания и ее последствия // Т-Comm. 2016. №6. С. 17–20.
3. Исаков Ю.И. Цифровая обработка звуковых сигналов в музыкальной акустике. Электроакустическая система активного управления звуковым полем // Вестник музыкальной науки. 2016. №2(12). С. 60–74.
4. Rezabek F. et al. PTP Security Measures and their Impact on Synchronization Accuracy // 2022 18th International Conference on Network and Service Management (CNSM). 2022. P. 109–117.
5. Espressif Systems. Официальная документация по ESP32-S3 и ESP32-PICO-MINI. URL: <https://docs.espressif.com> (дата обращения: 15.02.2026).