CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-93-100

УДК 004.738

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СБОРА ЭНЕРГИИ WI-FI В УСТРОЙСТВАХ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Н. И. ЛИСТОПАД, А. О. АНДРЕЙЧУК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Бурный рост экосистемы интернета вещей упирается в жесткое ограничение по обеспечению энергией рассредоточенных сенсорных модулей. Как показали некоторые научные работы, попытки использовать штатный Wi-Fi-трафик для харвестинга наталкиваются на малую скважность полезного сигнала из-за механизмов случайного доступа к среде, заложенных в протокол. В качестве решения в статье рассмотрен двухэтапный подход. Первый элемент подхода – специализированный передатчик с программной перенастройкой режимов, построенный на платформе ESP32-S3, который формирует непрерывное излучение в диапазоне 2,4 ГГц (ISM), оптимальное для задач энергопередачи. Второй – конструкция многоканальной приемной антенны с выпрямителем (ректенны), оснащенной управляемой диаграммой направленности: переключение лучей осуществляется с помощью RF-коммутатора ADG902, а две патч-антенны размещены с ортогональной поляризацией. Эффективность предложенных решений подтверждена экспериментальными данными.

Ключевые слова: интернет вещей, IoT-устройства, беспроводная передача энергии, энергетическая эффективность, беспроводное питание.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Листопад, Н. И. Методы повышения эффективности сбора энергии Wi-Fi в устройствах интернета вещей / Н. И. Листопад, А. О. Андрейчук // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 5. С. 93–100. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-93-100.

METHODS FOR IMPROVING WI-FI ENERGY HARVESTING EFFICIENCY IN INTERNET OF THINGS DEVICES

NIKOLAY LISTOPAD, ALIAKSANDR ANDREICHUK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The rapid growth of the internet of things ecosystem is constrained by the challenge of powering distributed sensor modules. Research has shown that attempts to harvest energy from standard Wi-Fi traffic are hindered by the low duty cycle of the useful signal, a consequence of the protocol's random medium access mechanisms. To address this, the article proposes a two-stage approach. The first component is a software-reconfigurable transmitter based on the ESP32-S3 platform, designed to generate continuous-wave emission in the 2.4 GHz (ISM) band – an optimal choice for wireless power transfer. The second component is a multi-channel rectifying antenna (rectenna) featuring a controllable radiation pattern; beam switching is achieved using an ADG902 RF switch, while two patch antennas are arranged with orthogonal polarization. Experimental data confirm the effectiveness of the proposed solutions.

Keywords: internet of things, IoT devices, wireless power transmission, energy efficiency, wireless power.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Listopad N., Andreichuk A. (2026) Methods for Improving Wi-Fi Energy Harvesting Efficiency in Internet of Things Devices. *Doklady BGUIR*. 24 (5), 93–100. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-93-100 (in Russian).

Введение

Сбор электромагнитной энергии от Wi-Fi-точек доступа сегодня рассматривается как многообещающий способ обеспечения энергией маломощных датчиков интернета вещей, особенно когда они установлены в местах, где замена батарей затруднена. Однако, как показали эксперименты [1], здесь существует серьезное противоречие: для стабильного питания нужна непрерывная подача энергии, а трафик в Wi-Fi-сетях, подчиняясь протоколу CSMA/CA, носит ярко выраженный пакетный характер. Между пакетами возникают паузы длительностью до десятков миллисекунд, за которые накопительный конденсатор в приемном устройстве успевает разрядиться через токи утечки и нагрузку, и напряжение не достигает порога включения DC-DC-преобразователя. Спектральный анализ показывает, что даже при интенсивной работе канала скважность (коэффициент заполнения) редко превышает 40 %, а мощность сигнала от мобильных клиентов на порядок уступает мощности точки доступа. Поэтому основной вклад дает нисходящий трафик, но его одного все равно недостаточно. Выход авторы видят в переходе от паразитного сбора к гибридным сетям, где рядом с обычными точками доступа работают специализированные передатчики, оптимизированные именно для задач энергопередачи. Дополнительную проблему создает интерференция прямой и отраженных волн в помещении, из-за которой возникают пространственные зоны с глубокими замираниями, где уровень сигнала падает на 20–30 дБ относительно среднего.

Цель исследований – теоретически обосновать, разработать и экспериментально подтвердить два взаимодополняющих способа повышения КПД сбора: активное управление структурой излучения на стороне передатчика и пространственно-поляризационное разнесение на стороне приемной антенны.

Обоснование предлагаемых методов

Эффективность беспроводной передачи энергии в закрытых помещениях определяется двумя конкурирующими факторами: детерминированным затуханием мощности в свободном пространстве и стохастической интерференционной картиной, возникающей из-за многолучевого распространения.

В дальней зоне антенны (зона Фраунгофера), которая для частоты 2,4 ГГц начинается с расстояния нескольких длин волн, базовым соотношением для оценки принимаемой мощности является формула идеальной радиопередачи Фрииса [2]

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \tag{1}$$

где P_r, P_t – мощность на входе приемной антенны и передатчика соответственно; G_t, G_r – коэффициент усиления передающей и приемной антенн; λ – длина волны (для диапазона 2,4 ГГц $\lambda \approx 0{,}125$ м); R – расстояние между антеннами – от G_t до G_r.

Однако в условиях реального помещения (площадью 60 м^2 с наличием отражающих поверхностей) поле не может быть описано одной прямой волной. Суммарное поле в точке приема формируется в результате суперпозиции прямого луча и множества отраженных лучей. Согласно лучевой модели распространения, комплексная амплитуда напряженности электрического поля в точке приема может быть представлена согласно [3]

$$E_{total} = E_0 \left[\frac{e^{-jkR_0}}{R_0} + \sum_{n=1}^{N} \Gamma_n \frac{e^{-jkR_n}}{R_n} \right], \tag{2}$$

где E_0 – нормированная амплитуда; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; R_0, R_n – длина пути прямого и n-го отраженного лучей соответственно; Γ_n – комплексный коэффициент отражения Френеля для n-го луча, зависящий от поляризации волны и электрических свойств материала поверхности.

В точках, где фазы прямого и отраженного сигналов противоположны, возникает глубокое замирание (глубина до 30 дБ), что делает невозможным стабильный сбор энергии при использовании одиночной антенны. Ключевое ограничение – низкая скважность Wi-Fi из-за пауз CSMA/CA (ожидание, backoff, ACK), в которые накопленный заряд уходит в утечки.

Традиционные роутеры оптимизированы под пропускную способность, а не под питание. Для зарядки требуется иной режим: непрерывное излучение или сверхплотная упаковка пакетов с минимальными межкадровыми интервалами.

Программно-конфигурированный передатчик

Рассмотрим разработанное устройство (рис. 1), построенное на базе микроконтроллера с интегрированным Wi-Fi-контроллером, поддерживающим режим работы в качестве программной точки доступа (SoftAP) [4].

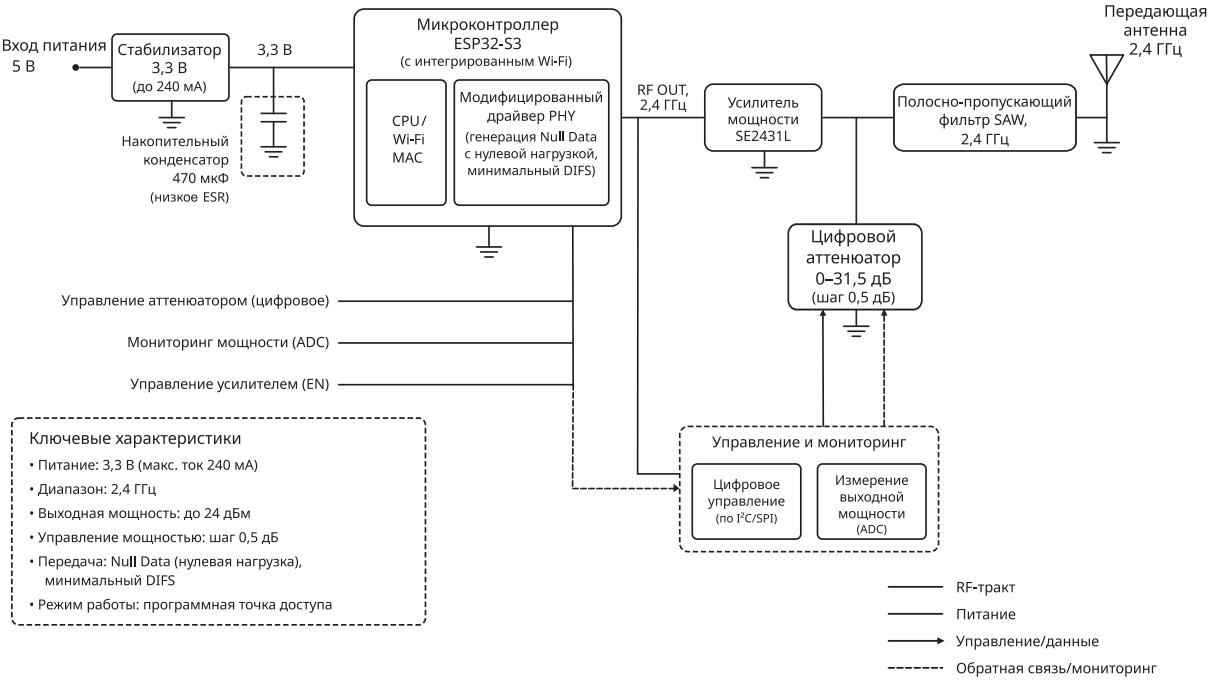


Рис. 1. Схема устройства
Fig. 1. Device diagram

Система питания устройства на рис. 1 построена по двухступенчатой схеме. На вход подается стабилизированное напряжение 5 В, которое с помощью линейного или импульсного стабилизатора преобразуется в основное питающее напряжение 3,3 В с максимальным током нагрузки до 240 мА. Для сглаживания пульсаций и обеспечения устойчивости при импульсных бросках потребления (характерных для работы Wi-Fi-радио) установлен накопительный электролитический конденсатор емкостью 470 мкФ с низким эквивалентным последовательным сопротивлением (equivalent series resistance, ESR). Низкое ESR минимизирует падение напряжения на внутреннем сопротивлении конденсатора в моменты пикового тока, что гарантирует стабильность питания цифровых и аналоговых узлов.

Микроконтроллер включает центральный процессорный модуль CPU (central processing unit) и подсистему Wi-Fi на MAC (medium access control), работающую от напряжения 3,3 В. Именно здесь реализована модифицированная версия драйвера PHY, которая обеспечивает формирование кадров Null Data с нулевой длиной полезной нагрузки. Благодаря сокращенному межкадровому интервалу DIFS (установленному в минимально допустимое значение, определяемое стандартом 802.11) устройство способно генерировать непрерывный поток коротких пакетов, что полезно, например, для оценки чувствительности приемников или создания управляемой помеховой обстановки.

Радиочастотный тракт начинается с выхода RF-части чипа (частота 2,4 ГГц). Сигнал поступает на усилитель мощности SE2431L – высокоэффективный усилитель, обеспечивающий выходную мощность до +24 дБм. Для подавления внеполосных гармоник и ослабления побочных излучений после усилителя включен полосно-пропускающий фильтр SAW на 2,4 ГГц. Фильтр имеет крутую амплитудно-частотную характеристику и низкие вносимые потери, что позволяет сохранить форму импульсов и снизить уровень шумов за пределами рабочего диапазона.

Для точной регулировки выходной мощности в тракт последовательно включены два цифровых аттенюатора с диапазоном ослабления 0–31,5 дБ каждый и шагом перестройки 0,5 дБ. Общее ослабление может варьироваться от 0 до 63 дБ с шагом 0,5 дБ, что дает гибкую возможность устанавливать любой уровень мощности от максимального (+24 дБм) до минимального (менее –39 дБм). Управление аттенюаторами осуществляется по цифровым интерфейсам (I^2C или SPI) от CPU, что позволяет динамически менять мощность в процессе работы без дополнительных аналоговых цепей.

Контур обратной связи и мониторинга включает встроенный аналого-цифровой преобразователь (analog-to-digital converter, ADC), который измеряет фактическую выходную мощность после аттенюаторов (или на выходе усилителя) и передает данные на CPU. Это дает возможность реализовать программную калибровку и компенсацию температурных и частотных дрейфов, а также обеспечивает точную установку заданного уровня мощности. Сигналы управления усилителем (включение/выключение – EN) и управления аттенюаторами также формируются цифровыми выводами микроконтроллера.

Управление и мониторинг осуществляются через внешние цифровые интерфейсы (I^2C/SPI), что позволяет подключать устройство к внешней управляющей системе (например, к ПК или другому контроллеру) для задания режимов работы, установки уровня мощности, чтения текущих параметров и сбора статистики. Вся логика работы реализована в программном обеспечении микроконтроллера, что делает устройство полностью программируемым и легко адаптируемым под различные сценарии применения – от тестирования беспроводных устройств до создания управляемых источников помех.

Устройство на ESP32-S3 (3,3 В, 240 мА на передачу) дополнено внешним усилителем SE2431L, выдающим до 24 дБм в диапазоне 2,4 ГГц – это уровень стандартных роутеров (20–23 дБм), при этом сохраняется программная гибкость формирования сигнала. Выход согласован через ПАВ-фильтр (подавление гармоник и шумов), а мощность ступенчато регулируется цифровым аттенюатором с шагом 0,5 дБ под управлением микроконтроллера.

Перед запуском выполняются инициализация микроконтроллера, Wi-Fi-интерфейса в режиме программной точки доступа и начальная настройка регистров передатчика (частота, мощность, модуляция). Затем считываются конфигурационные параметры и выбирается один из трех режимов.

Режим непрерывной несущей – простейший: в регистр управления усилителем мощности записывается единица, и передатчик выдает немодулированный сигнал без пакетной структуры, что удобно для калибровки и настройки антенн. Импульсный режим генерирует периодическую последовательность Null Data-пакетов с заданной частотой следования и скважностью, что позволяет оценивать помехоустойчивость и работу системы автоматической регулировки усиления (АРУ). Адаптивный режим использует обратную связь от внешнего датчика (например, уровня заряда конденсатора через BLE) для динамического пересчета параметров излучения (частоты, скважности, мощности) с целью оптимизации энергопотребления удаленного узла.

В любом режиме после отправки пакета выдерживается пауза, рассчитанная по заданным параметрам, с обязательным соблюдением короткого межкадрового интервала (short interframe space, SIFS) SIFS = 67 мкс. По завершении каждого цикла проверяется наличие команды смены режима или остановки; при ее отсутствии алгоритм продолжает генерацию пакетов с текущими настройками, формируя непрерывный поток излучения для радиотехнических измерений и экспериментов. Алгоритм формирования излучения представлен на рис. 2.

Для оценки эффективности функционирования передатчика была разработана измерительная установка, подробно описанная в [1]. В качестве эталона взят Wi-Fi-роутер TP-Link Archer C7 (диапазон 2,4 ГГц, 6-й канал, 2437 МГц, выходная мощность 23 дБм). Его загружали потоковым видео 1080p на два клиента, поддерживая утилизацию канала на уровне 70–80 % (контроль через iperf3). Экспериментальные измерения проводились в стандартном офисе площадью 60 м^2 с обычной мебелью и техникой. Приемник на диэлектрической подставке располагался на высоте 1 м и перемещался от 1 до 10 м от передатчика (шаг 1 м). На каждой дистанции выполнялось не менее 10 циклов заряда/разряда конденсатора, измерялись время выхода на 3 В и устойчивость напряжения в стационарном режиме. Полученные данные демонстрируют качественное превосходство специализированного устройства над стандартной точкой доступа.

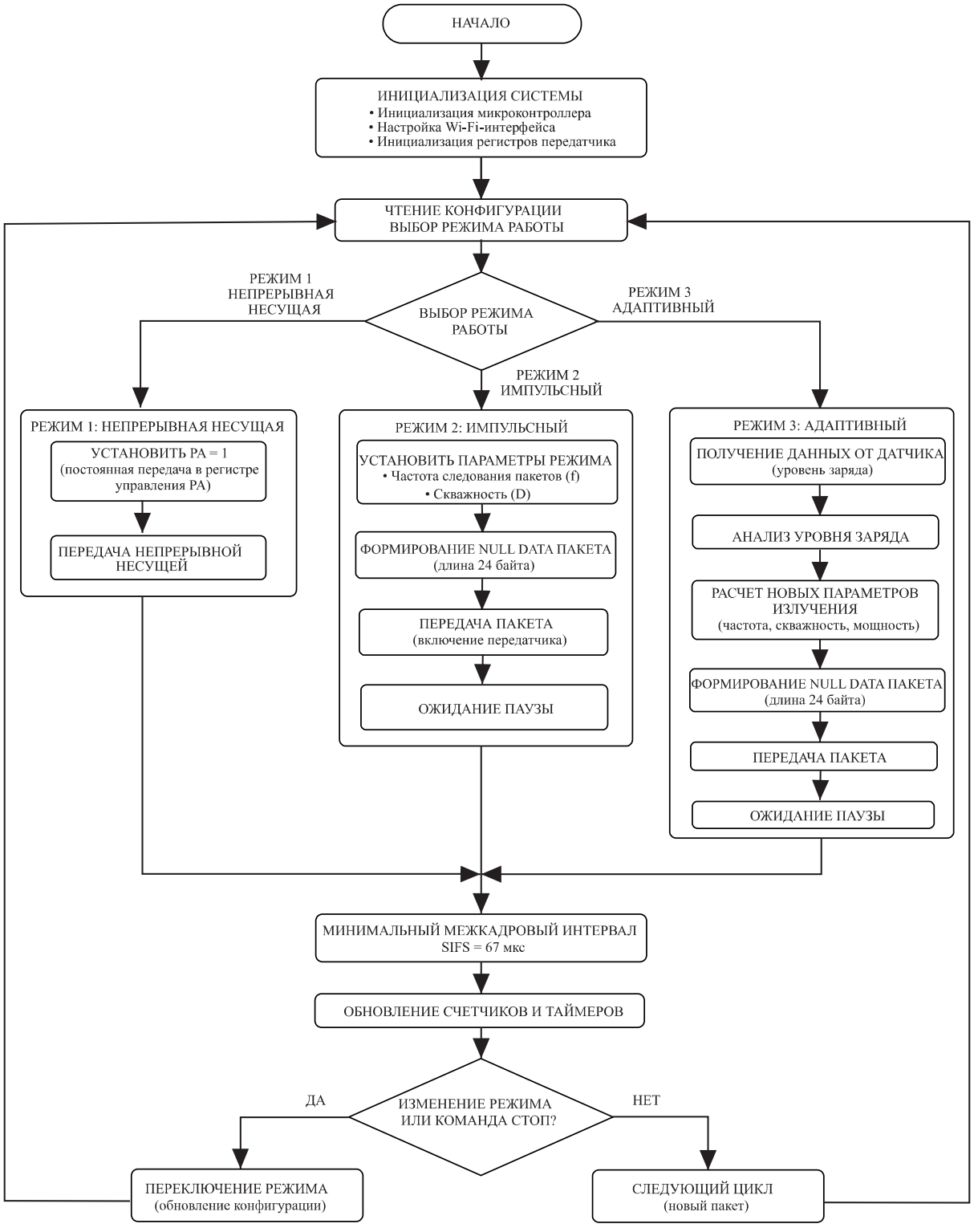


Рис. 2. Алгоритм формирования излучения
Fig. 2. Radiation generation algorithm

Адаптивная переключаемая поляризационно-разнесенная антенная система

Архитектура адаптивной приемной антенной системы, осуществляющей автоматический выбор оптимального канала приема из двух пространственно разнесенных и поляризационно-ортогональных антенн, подробно представлена в [4]. Для лучшего понимания результатов исследования приведем описание антенной системы [4, с. 261], которая включает две печатные инвертиро-

ванные F-антенны, ориентированные во взаимно перпендикулярных плоскостях. Первая антенна рассчитана на прием вертикально поляризованной составляющей поля, вторая – горизонтально поляризованной. Коэффициент усиления каждой антенны составляет 2,2 дБи, коэффициент стоячей волны в полосе частот 2400–2485 МГц не превышает 1,8. Выбор между антеннами осуществляется высокочастотным SPDT-переключателем ADG902 производства Analog Devices. Данный компонент характеризуется временем переключения менее 30 нс, вносимыми потерями 0,8 дБ и изоляцией разомкнутого канала 32 дБ на частоте 2,45 ГГц. Управление переключателем осуществляется цифровым сигналом от микроконтроллера ESP32-C3, выступающего в роли центрального процессора системы сбора энергии [4].

Алгоритм работы адаптивной антенной системы, реализующий метод энергетического сканирования, изображен на рис. 3.

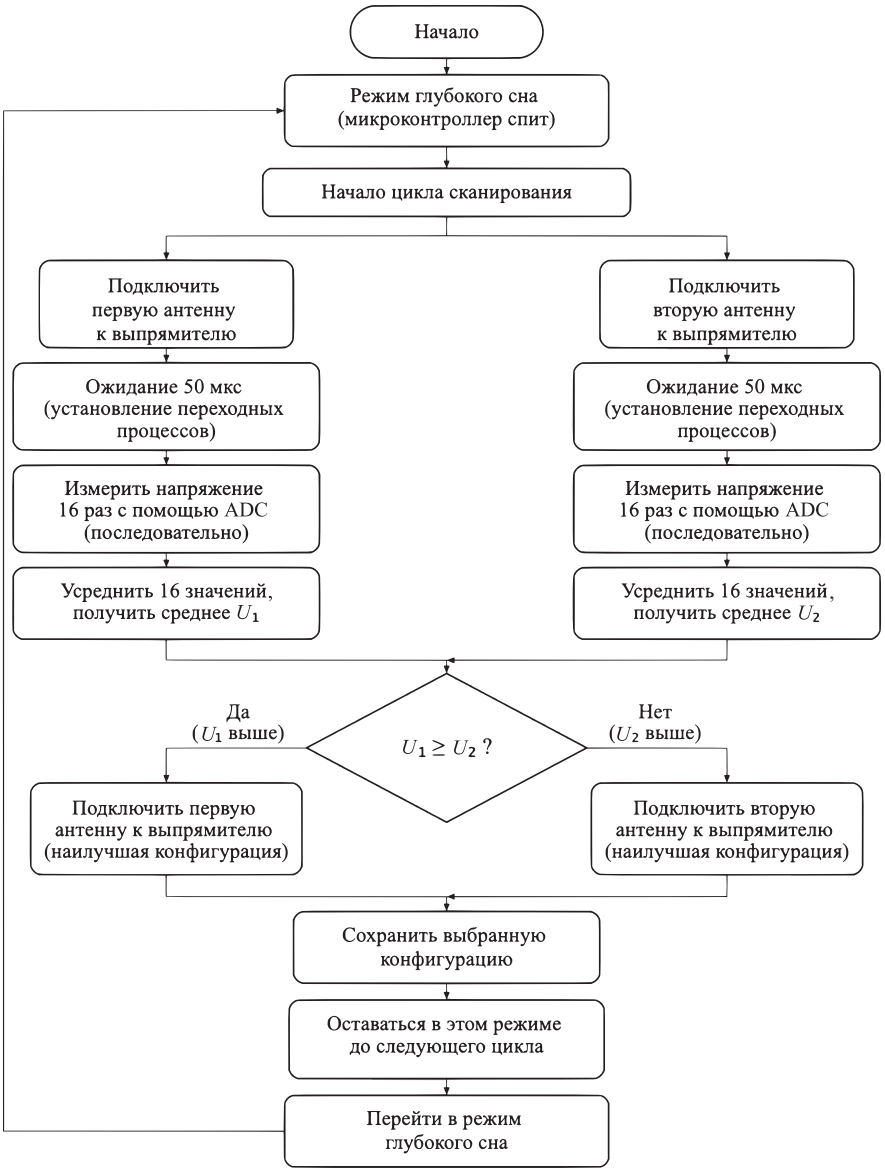


Рис. 3. Алгоритм работы адаптивной антенной системы
Fig. 3. Algorithm of operation of the adaptive antenna system

Микроконтроллер выводит систему из глубокого сна каждые 5 с, подключает первую антенну к выпрямителю и через 50 мкс (время установления переходов) делает 16 измерений ADC, усредняя их для снижения шумов. Затем повторяет то же для второй антенны. Сравнив средние напряжения, микроконтроллер фиксирует антенну с бóльшим значением и сохраняет этот выбор до следующего цикла сканирования.

Исследовали временную стабильность работы адаптивной системы в условиях динамически изменяющейся окружающей обстановки. Приемный модуль размещался в точке с исходно низким уровнем сигнала. В процессе эксперимента человек перемещался вблизи трассы распространения радиоволн, создавая эффект затенения и переотражения. Система с фиксированной антенной демонстрировала глубокие и продолжительные провалы напряжения, приводящие к сбросу микроконтроллера. Адаптивная система в течение 200–300 мс обнаруживала ухудшение качества текущего канала и переключалась на альтернативную антенну, что позволяло сохранить работоспособность устройства. Осциллограммы процесса переключения приведены в [4, с. 262].

Таким образом, традиционные Wi-Fi-сети, оптимизированные исключительно для задач коммуникации, являются неэффективным источником энергии для IoT-устройств. Переход к специализированным излучателям, работающим в том же частотном диапазоне, но использующим иные принципы формирования сигнала, открывает путь к практическому внедрению технологии беспроводного питания. Разработанное устройство на базе ESP32-S3 демонстрирует энергоэффективность, вдвое превосходящую стандартное сетевое оборудование при четырехкратном выигрыше в скорости заряда накопления.

Заключение

1. Предложены два решения для повышения эффективности беспроводной передачи энергии в сетях IoT. Первое – это передатчик с программной настройкой параметров, который формирует сигнал, специально адаптированный для задач энергосбора. Эксперименты показали, что на дистанции 4 м он заряжает накопительный конденсатор в 2,2 раза быстрее обычного роутера, а на расстоянии 5 м (до порога 3 В при емкости 1000 мкФ) – в 4,2 раза. Второе решение – адаптивный приемный модуль с возможностью смены поляризации, который повышает усредненное выпрямленное напряжение на 62 % и значительно уменьшает риск сигнальных сбоев.

2. Испытания подтвердили, что синергия двух предлагаемых решений обеспечивает стабильное функционирование IoT-сенсора на дистанции 8 м без каких-либо батарей. Это открывает перспективы для проектирования беспроводных систем питания распределенных датчиков.

Список литературы

1. Андрейчук, А. О. Методы повышения энергетической эффективности граничных устройств в сети IoT / А. О. Андрейчук // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 1. С. 83–90. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-83-90.
2. Формула передачи Фрииса [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://intellect.icu/formula-peredachi-friisa-12439. Дата доступа: 21.08.2026.
3. Сазонов, Д. М. Антенны и устройства СВЧ / Д. М. Сазонов. М.: Высш. шк., 1988.
4. Андрейчук, А. О. Программно-конфигурируемое устройство и переключаемая поляризационно-разнесенная антенная система для повышения эффективности сбора энергии Wi-Fi в устройствах интернета вещей / А. О. Андрейчук // Информационные радиосистемы и радиотехнологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 9–10 июня 2026 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлектрон., 2026. С. 258–263.

Поступила 02.09.2026 Принята в печать 24.09.2026

References

1. Andreichuk A. O. (2026) Methods for Increasing the Energy Efficiency of Edge Devices in IoT Networks. *Doklady BGUIR*. 24 (1), 83–90. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-1-83-90 (in Russian).
2. *Friis Transmission Formula*. Available: https://intellect.icu/formula-peredachi-friisa-12439 (Accessed 21 August 2026) (in Russian).
3. Sazonov D. M. (1988) *Antennas and Microwave Devices*. Moscow, Vysshaya Shkola (in Russian).
4. Andreichuk A. O. (2026) Software-Configurable Device and Switchable Polarization-Diversity Antenna System for Enhancing Wi-Fi Energy Harvesting Efficiency in IoT Devices. *Information Radio Systems and Radio Technologies, Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, Minsk, June 9–10, 2026*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 258–263 (in Russian).

Received: 9 September 2026 Accepted: 24 September 2026

Вклад авторов

Листопад Н. И. выполнил обоснование методов, участвовал в проведении и анализе экспериментальных исследований.

Андрейчук А. О. разработал алгоритмы формирования излучения и работы адаптивной поляризационно-разнесенной антенной системы, выполнил экспериментальные исследования.

Authors' contribution

Listopad N. validated the methods and participated in conducting and analyzing the experimental studies.

Andreichuk A. developed algorithms for radiation generation and the operation of an adaptive polarization-diversity antenna system, and conducted experimental studies.

Сведения об авторах

Листопад Н. И., д-р техн. наук, проф., зав. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Андрейчук А. О., асп. каф. информационных радиотехнологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 33 340-12-20
E-mail: and.sasha@mail.ru
Андрейчук Александр Олегович

Information about the authors

Listopad N., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Information Radio Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Andreichuk A., Postgraduate of the Department of Information Radio Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 33 340-12-20
E-mail: and.sasha@mail.ru
Andreichuk Aliaksandr