

АДАПТИВНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Целью исследования является разработка системы передачи данных для ячеистой сети на базе радиомодулей nRF24, функционирующей в диапазоне 2.4 ГГц, с адаптивным регулированием скорости передачи данных. Задачи включают выбор и настройку аппаратных компонентов (платформы Arduino и Raspberry Pi Pico), разработку программного обеспечения с использованием Arduino IDE и тестирование системы в различных условиях эксплуатации. Результаты показали, что адаптивное изменение скорости передачи данных и длины пакетов значительно улучшает производительность и устойчивость сети в условиях загруженного спектра. Радиомодули EBYTE E01-2G4M27D продемонстрировали высокую эффективность и стабильность. Таким образом, предложенная система является перспективным решением для создания надежных и экономически эффективных ячеистых сетей в области Интернета вещей, обеспечивая оптимальный баланс между производительностью и надежностью.

Адаптивное регулирование скорости передачи данных, ячеистая сеть, производительность сети, устойчивость сети, nRF24L01, EBYTE E01-2G4M27D, Arduino, Raspberry Pi Pico.

Zhilin Sergey Viktorovich, Archipenko Vladimir Vladimirovich,
Basan Elena Sergeevna

ADAPTIVE DATA RATE CONTROL

The aim of the research is to develop a data transmission system for a mesh network based on nRF24 radio modules, operating in the 2.4 GHz band, with adaptive data rate control. The tasks include selection and configuration of hardware components (Arduino and Raspberry Pi Pico platforms), software development using Arduino IDE and testing the system under different operating conditions. The results showed that adaptive variation of data rate and packet length significantly improves network performance and resilience in busy spectrum conditions. The EBYTE E01-2G4M27D radio modules demonstrated high efficiency and stability. Thus, the proposed system is a promising solution for building reliable and cost-effective mesh networks in the field of Internet of Things, providing an optimal balance between performance and reliability.

Adaptive data rate control, mesh network, network performance, network stability, nRF24L01, EBYTE E01-2G4M27D, Arduino, Raspberry Pi Pico.

Введение. С развитием Интернета вещей (IoT) количество подключенных устройств увеличивается, создавая высокие требования к использованию частотного спектра. Поскольку произвольный выбор частот невозможен из-за жесткого регулирования и лицензирования [1], наиболее используемым безлицензионным диапазоном остается 2.4 ГГц. Диапазон занят множеством устройств, таких как Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee и другие [2], что приводит к увеличению загруженности и зашумленности спектра, снижая дальность работы, ухудшая качество связи и увеличивая вероятность коллизий.

Для минимизации этих негативных факторов и обеспечения надежной связи разрабатываются новые стандарты и технологии, способные эффективно работать в условиях высокой загруженности спектра. Одним из перспективных направлений является использование ячеистой сети, обеспечивающей высокую стабильность и качество работы при достаточном количестве узлов.

Для реализации данного решения используются популярные и доступные компоненты. В качестве микроконтроллера выбрана платформа Arduino, известная своей универсальностью и доступностью, что способствовало демократизации технологий [3] и позволило исследователям и энтузиастам экспериментировать в различных областях, включая связь [4]. В качестве радиомодуля выбраны nRF24L01 в диапазоне 2.4ГГц. Эти модули обеспечивают высокую пропускную способность, значительную дальность и множество настраиваемых режимов работы. Хотя в базовой комплектации они не поддерживают ячеистую сеть, их функционал можно расширить, что открывает новые возможности для создания сетевых решений.

Ячеистая сеть обладает рядом преимуществ, объединяя простые и доступные модули в сеть, что значительно повышает устойчивость и масштабируемость. В условиях перегруженности спектра использование динамических маршрутов передачи данных и адаптивных методов управления частотами улучшает производительность сети и снижает зашумленность.

Описание экспериментальной установки и аппаратных средств.

Для реализации установки использовались доступные и недорогие компоненты, что снизило затраты и упростило воспроизводимость эксперимента.

Изначально использовался МК Arduino Nano на базе Atmel MEGA328PB, однако его производительность и объем памяти оказались недостаточными для базовой ноды. Поэтому его заменили на более мощную платформу Raspberry Pi Pico с чипом RP2040, который обеспечил необходимую производительность и гибкость. Для дочерних нод производительности Arduino Nano достаточно.

Для беспроводной связи использовались радиомодули с усилителем мощности сигнала и низкошумящим усилителем: nRF24L01+PA+LNA и E01 2G4M27D от компании EBYTE. Все радиомодули подключались через SPI адаптер, обеспечивая надежное соединение и эффективную передачу данных.

Использовались стандартные антенны с усилением 2dBi и антенны компании EBYTE с усилением 3dBi, 4dBi и 5dBi для улучшения качества связи и дальности передачи данных. Это позволило провести сравнительный анализ эффективности различных антенн.

Для визуализации применялся OLED дисплей с разрешением 128x64 на базе контроллера SSD1306, обеспечивая удобный вывод информации. Полный лог данных передавался через COM-порт на ноутбук для анализа и хранения.

Эксперименты проводились в лаборатории и на открытой местности. В лаборатории тестировалась интерференция и стабильность связи, а на открытой местности оценивались дальность связи и адаптивность скорости передачи данных в условиях отсутствия значительных помех.

Этот подход обеспечил гибкость и надежность системы, позволив провести комплексное исследование возможностей сети на базе доступных компонентов.

Принцип работы системы передачи данных в ячеистой сети на базе радиомодулей nRF24 заключается в динамическом изменении скорости передачи и длины пакетов для максимальной надежности и эффективности связи. Система использует адаптивный алгоритм, учитывающий текущие условия сети и качество сигнала для оптимизации параметров передачи.

Инициализация соединения начинается с настройки радиомодулей на максимальную скорость передачи данных (по умолчанию 2 Mbps), канал связи и мощность сигнала. Если соединение не удается установить, алгоритм последовательно снижает скорость до 1 Mbps и далее до 250 kbps, увеличивая дальность и устойчивость связи. Если на минимальной скорости соединение не установлено, алгоритм начинает уменьшать длину пакетов с 32 байт до 16 и 8 байт. Этот процесс продолжается до успешного установления соединения или достижения минимально возможной длины пакета.

При успешном соединении алгоритм оценивает качество передачи данных по количеству потерянных пакетов, используя верхний и нижний пороги. Если количество потерянных пакетов ниже верхнего порога, алгоритм пытается повысить скорость передачи данных. Если превышает нижний порог, скорость снижается для обеспечения стабильности и уменьшения ошибок передачи.

Так как радиомодули nRF24 не имеют функции измерения уровня сигнала (RSSI), контроль качества соединения осуществляется по количеству потерянных пакетов. Этот метод эффективно оценивает состояние сети и принимает меры для обеспечения стабильной и надежной связи.

Адаптивный алгоритм обеспечивает гибкость и эффективность управления передачей данных, автоматически снижая скорость при ухудшении качества сигнала и повышая её при улучшении. Это позволяет системе динамически адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать надежное функционирование сети в различных сценариях.

В итоге, система на базе радиомодулей nRF24 демонстрирует высокую адаптивность и эффективность, значительно улучшая характеристики связи

в ячеистой сети. Адаптивное изменение скорости передачи данных и длины пакетов обеспечивает максимальную надежность и производительность сети, делая систему пригодной для различных областей и условий эксплуатации.

Модель затухание сигнала. Потери в тракте рассчитывались по уравнению (1) с учетом передаваемой (излучаемой) мощности P_t , принимаемой мощности P_r , коэффициента усиления передающей антенны G_t , а также коэффициента усиления приемной антенны G_r . Уравнение потерь в тракте (все параметры в дБ) имеет следующий вид, рассчитанный в [5]:

$$P_L = P_t - P_r + G_r + G_t \quad (1)$$

Существует обобщенная классификация моделей распространения сигналов, которые минимизируют детализацию местности или пути, учитывая помехи и препятствия как составляющие потерь, зависящих от расстояния. В то же время модели, учитывающие особенности местности, оценивают потери от каждой помехи отдельно, интегрируя измеренные переменные в общую систему. В основном используются четыре основные модели потерь при распространении сигналов: две одночастотные и две многочастотные. [6, 7, 8].

Моделирование потерь в каналах связи полезно для расчета ослабления сигнала при его прохождении от передатчика к приемнику с учетом расстояния и других факторов. Модели различаются по методам: одни используют топографический профиль для анализа сигнала, другие основываются только на несущей частоте и расстоянии [9, 10].

Рассмотрим модель прогнозирования потерь в свободном пространстве. Основным элементом этой модели является потеря в свободном пространстве (FSPL), которая зависит от частоты несущего сигнала (f в ГГц). Важными факторами также являются расстояние между передатчиком и приемником (d в метрах) и выбранное опорное расстояние (d_0). Модель характеризуется коэффициентом экспоненциального затухания (PLE, n). Уравнение модели отражает зависимости [11, 12, 13], показано в (2). Опорное расстояние для данной модели составляет 1 м, как указано в [12]:

$$P_L(d)[dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi f d_0}{c} \right)^2 + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (2)$$

Тестирование, анализ и результаты. Для оценки максимальной дальности передачи проводилось тестирование с использованием разных антенн, а также с настройками мощности передатчика на различных уровнях. При тестировании измерялись как теоретические, так и фактические значения.

Таблица 1

Теоретическая и фактическая дальность

Модуль	Антенны	Мощность передатчика	Скорость передачи данных								
			2МБps			1МБps			250КБps		
			Теор. дальность	Фактич. дальность	% рас- хожде- ния	Теор. даль- ность	Фак- тич. даль- ность	% рас- хожде- ния	Теор. даль- ность	Фак- тич. даль- ность	% рас- хожде- ния
nRF24L01+ PA4LNA	5dBm	0 dBm	670m	550m	17,90%	850m	720m	15,30%	1 737m	1 510m	13,07%
	4dBm	0 dBm	572m	485m	15,14%	725m	625m	13,82%	1 482m	1 320m	10,93%
	3dBm	0 dBm	488m	400m	17,97%	619m	530m	14,34%	1 264m	1 105m	12,60%
	2dBm	0 dBm	416m	320m	23,08%	528m	375m	28,96%	1 079m	890m	17,49%
	5dBm	-6 dBm	416m	310m	25,48%	528m	390m	26,12%	1 079m	860m	20,27%
	5dBm	-12 dBm	258m	201m	22,20%	328m	280m	14,59%	670m	580m	13,42%
	5dBm	-18 dBm	160m	115m	28,32%	204m	160m	21,41%	416m	310m	25,48%
EBYTE E01-2G4M27D	5dBm	0 dBm	1 694m	1 610m	4,98%	2 210m	2 090m	5,43%	4 904m	4 685m	4,46%
	4dBm	0 dBm	1 419m	1 390m	2,07%	1 851m	1 790m	3,31%	4 108m	3 990m	2,87%
	3dBm	0 dBm	1 189m	1 155m	2,85%	1 551m	1 501m	3,21%	3 441m	3 310m	3,81%
	2dBm	0 dBm	996m	930m	6,62%	1 299m	1 220m	6,08%	2 883m	2 710m	5,98%
	5dBm	-6 dBm	996m	940m	5,62%	1 299m	1 230m	5,31%	2 883m	2 725m	5,46%
	5dBm	-12 dBm	585m	550m	6,05%	764m	725m	5,05%	1 694m	1 605m	5,27%
	5dBm	-18 dBm	344m	310m	9,91%	449m	410m	8,65%	996m	890m	10,64%

На рис. 1 представлен график зависимости максимальной дальности передатчика от их максимальной выходной мощности. Из графика следует, что знание дальности и скорости передачи данных позволяет подобрать оптимальные значения мощности передатчика. Это способствует снижению зашумления эфира и экономии энергопотребления.

Результаты тестирования показали, что использование антенн с высоким коэффициентом усиления и оптимизация мощности передатчика значительно увеличивают дальность передачи данных. Как видно из табл. 1, процент расхождения между теоретическими и фактическими значениями варьируется в зависимости от мощности передатчика и типа антенны.

Радиомодуль EBYTE E01-2G4M27D показал наименьшее расхождение между теоретическими и фактическими значениями, что указывает на его высокую эффективность и стабильность в условиях тестирования.

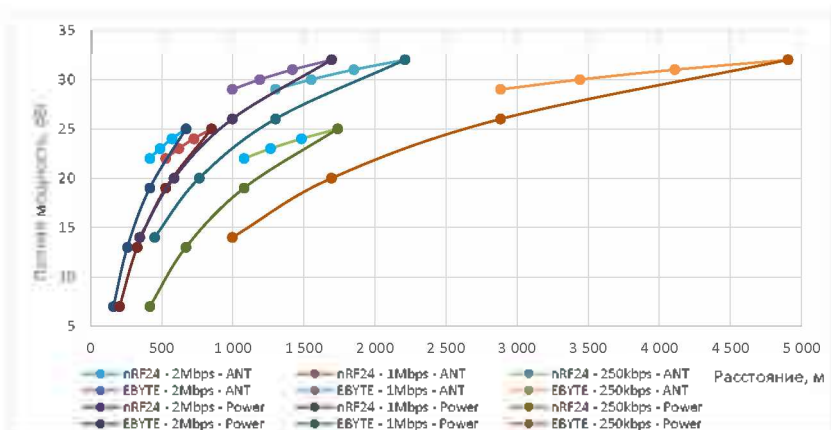


Рис. 1. Дальности передачи от полной мощности

Заключение. Адаптивное регулирование скорости передачи данных критично для надежной связи в загруженном спектре, что актуально в эпоху роста Интернета вещей. В статье описана система передачи данных на базе радиомодулей nRF24 в диапазоне 2.4 ГГц, используя платформы Arduino и Raspberry Pi Pico. Экспериментальная установка с различными антеннами и радиомодулями показала высокую гибкость и надежность. Программное обеспечение в среде Arduino IDE эффективно управляло параметрами соединения, улучшая качество связи и снижая зашумленность спектра.

Тестирование показало, что адаптивное изменение скорости и длины пакетов значительно повышает производительность и устойчивость сети.

Таким образом, система на базе радиомодулей nRF24 и платформ Arduino и Raspberry Pi Pico представляет собой перспективное решение для создания надежных и экономически эффективных ячеистых сетей в области IoT, обеспечивая оптимальный баланс между производительностью и надежностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

11. Kortuem G., Kawsar F., Sundramoorthy V., and Fitton D. Smart objects as building blocks for the internet of things // IEEE Internet Computing, vol. 14, no. 1, pp. 44–51, Feb. 2010
12. Darroudi S. M., & Gomez C. (2017). Bluetooth Low Energy Mesh Networks: A Survey. // Sensors, 17(7), 1467

13. *Harris I.* The Arduino Platform and C Programming", // Online, дата обращения: 29.04.2024 - <https://www.coursera.org/learn/arduino-platform>
14. *Bergmann, N. W., Wallace, M., Calia, E.* Low Cost Prototyping System for Sensor Networks // Proc. 6th Int. Conf. on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Inform. Process. (ISSNIP), Brisbane QLD, pp. 19-24, 2010
15. *Elezumghi M.K., Afullo T.J.* An Efficient Approach of Improving Path Loss Models for Future Mobile Networks in En-closed Indoor Environments. // IEEE Access. 2021, 9, 110332–110345.
16. *Abwarafy A., Suhyma A.I., Alsanie A.* // Path-Loss Channel Models for Receiver Spatial Diversity Systems at 2.4 GHz. Int. J. Antennas Propag. 2017, 2017, 1–12.
17. *Howard, S.J.; Pahlavan, K.* Measurement and analysis of the indoor radio channel in the frequency domain. // IEEE Trans. Commun. 1990, 39, 751–755.
18. *Handayani, P.; Mubarakah, L.; Hendrantoro, G.* Path loss and Shadowing Characteristics in Indoor Environment at 2.4 GHz Band. // In Proceedings of the IEEE International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Surabaya, Indonesia, 20–21 May 2015
19. *Qamar, F.* Enhancing QOS Performance of the 5G Network by Characterizing mm-Wave Channel and Optimizing Interference Cancellation Scheme. // Ph.D. Thesis, University of Malaya, Kuala Lumpur, Malaya, March 2020.
20. *Thomas, T.A.; Rybakowski, M.; Sun, S.; Rappaport, T.S.; Nguyen, H.; Kovacs, I.Z.; Rodriguez, I.* A Prediction Study of Path Loss Models from 2-73.5 GHz in an Urban-Macro Environment. // In Proceedings of the 2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Nanjing, China, 15–18 May 2016; pp. 1–5.
21. *Sun, S.; Rappaport, T.S.; Thomas, T.A.; Ghosh, A.; Nguyen, H.C.; Kovacs, I.Z.; Rodriguez, I.; Koymen, O.; Partyka, A.* Investigation of Prediction Accuracy, Sensitivity, and Parameter Stability of Large-Scale Propagation Path Loss Models for 5G Wireless Communications. // IEEE Trans. Veh. Technol. 2016, 65, 2843–2860.
22. *Rappaport, T.S.; MacCartney, G.R.; Samimi, M.K.; Sun, S.* Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design. // IEEE Trans. Commun. 2015, 63, 3029–3056.
23. *Andersen, J.B.; Rappaport, T.S.; Yoshida, S.* Propagation measurements and models for wireless communications channels. // IEEE Commun. Mag. 1995, 33, 42–49.

Жилин Сергей Викторович – аспирант, кафедра безопасности информационных технологий Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; 347928; e-mail: szhilin@sfnedu.ru.

Архипенко Владимир Владимирович – аспирант, кафедра безопасности информационных технологий Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; 347928; e-mail: arkhipenko@sfnedu.ru.

Басан Елена Сергеевна – кандидат технических наук, доцент, кафедра безопасности информационных технологий Федерального государственного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет», Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; 347928; e-mail: ebasan@sfnedu.ru.

Zhilin Sergey Viktorovich – postgraduate student, the department of information technology security Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”; 347928, Russia, Taganrog, 44, Nekrasovskiy; e-mail: szhilin@sfnedu.ru.

Arkhipenko Vladimir V. – postgraduate student, the department of information technology security Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”; 347928, Russia, Taganrog, 44, Nekrasovskiy; e-mail: arkhipenko@sfnedu.ru.

Basan Elena Sergeevna – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), associate professor, the department of information technology security Federal State-Owned Educational Establishment of Higher Education “Southern Federal University”; 347928, Russia, Taganrog, 44, Nekrasovskiy; e-mail: ebasan@sfnedu.ru.