

UNIVERSAL INSIGHTS CONFERENCE ON SCIENCE AND SOCIETY

international scientific conference

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИМИТАЦИЯ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА РАДИОСИГНАЛА В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ WI-FI И ZIGBEE

Абдуллаев Азизбек Азамат угли,

Хатамов Артур Пулатович

Ташкентский университет информационных технологий
имени Мухаммада ал-Хорезмий

e-mail: azik.3azizbek@gmail.com, a.xatamov@tuit.uz

***Аннотация.** В данной работе рассматривается актуальная задача обеспечения стабильности связи в беспроводных сенсорных сетях (WSN) в условиях динамической деградации радиоканала. Основным инструментом исследования выбрана среда имитационного моделирования OMNeT++ 6.3.0 с использованием фреймворка INET 4.6. В статье проведено сравнительное моделирование двух протоколов передачи данных: высокоскоростного IEEE 802.11 (Wi-Fi) и энергоэффективного IEEE 802.15.4 (Zigbee). В ходе экспериментов реализован механизм адаптивного контроля, реагирующий на изменение отношения сигнал/шум (SNIR) и уровня принимаемой мощности. Полученные результаты демонстрируют эффективность динамического изменения параметров MAC-уровня для предотвращения обрывов связи при перемещении узлов.*

***Ключевые слова:** OMNeT++, INET, Zigbee, Wi-Fi, Имитационное моделирование, Адаптивный контроль, радиосигнал.*

***Annotatsiya.** Ushbu ishda radiokanalning dinamik degradatsiyasi sharoitida simsiz sensor tarmoqlarida (WSN) aloqa barqarorligini ta'minlashning dolzarb masalasi ko'rib chiqiladi. Tadqiqotning asosiy vositasi*

UNIVERSAL INSIGHTS CONFERENCE ON SCIENCE AND SOCIETY international scientific conference

sifatida INET 4.6 freymvorkidan foydalangan holda OMNeT++ 6.3.0 taqlidiy modellashtirish muhiti tanlangan. Maqolada ikkita ma'lumot uzatish protokoli: yuqori tezlikdagi IEEE 802.11 (Wi-Fi) va energiya tejamkor IEEE 802.15.4 (Zigbee) qiyosiy modellashtirildi. Tajribalar davomida signal/shovqin nisbati (SNIR) va qabul qilinadigan quvvat darajasi o'zgarishiga munosabat bildiruvchi moslashuvchan nazorat mexanizmi amalga oshirildi. Olingan natijalar tugunlar harakatlenganda aloqa uzilishining oldini olish uchun MAC-darajadagi parametrlarni dinamik o'zgartirish samaradorligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: OMNeT++, INET, Zigbee, Wi-Fi, Imitatsion modellashtirish, Moslashuvchan boshqarish, radiosignal.

Abstract. This paper addresses the pressing issue of ensuring communication stability in wireless sensor networks (WSNs) under conditions of dynamic radio channel degradation. The OMNeT++ 6.3.0 simulation environment, utilising the INET 4.6 framework, was selected as the primary research tool. The paper presents a comparative simulation of two data transmission protocols: the high-speed IEEE 802.11 (Wi-Fi) and the energy-efficient IEEE 802.15.4 (Zigbee). During the experiments, an adaptive control mechanism was implemented that responds to changes in the signal-to-interference-plus-noise ratio (SNIR) and received power level. The results demonstrate the effectiveness of dynamically adjusting MAC-layer parameters to prevent communication dropouts when nodes move.

Keywords: OMNeT++, INET, Zigbee, Wi-Fi, Simulation modelling, Adaptive control, Radio signal.

Введение: Интенсивное развитие технологий промышленной автоматизации и Интернета вещей (IoT) стимулировало широкое распространение беспроводных сенсорных сетей (БСС).

UNIVERSAL INSIGHTS CONFERENCE ON SCIENCE AND SOCIETY international scientific conference

Функционирование таких сетей в агрессивной радиосреде, подверженной влиянию помех, многолучевости и динамических изменений топологии, делает задачу поддержания стабильного соединения критически важной. Деградация качества радиосигнала напрямую сказывается на целостности данных, энергоэффективности узлов и общей надежности систем управления.

Проблема усугубляется фундаментальными различиями между ключевыми стандартами беспроводной связи. Протокол IEEE 802.11 (Wi-Fi) обеспечивает высокую скорость передачи, но его производительность снижается при увеличении расстояния и появлении замираний. В то же время, протокол IEEE 802.15.4 (Zigbee), созданный для низкоэнергетических и низкоскоростных приложений, чрезвычайно чувствителен к точности мониторинга физических параметров канала. Статические настройки передатчиков в таких условиях оказываются неоптимальными, приводя либо к неоправданному расходу ресурсов, либо к полной потере связи.

Для преодоления этих ограничений необходимы адаптивные системы контроля, способные в реальном времени оценивать состояние канала по таким показателям, как индикатор уровня принимаемой мощности (RSSI) и отношение сигнал/шум (SNIR). Однако практическая реализация и тестирование подобных систем в реальных условиях затруднены из-за высокой стоимости оборудования и невозможности точного воспроизведения экспериментальных сценариев. Это обуславливает высокую актуальность применения инструментов имитационного моделирования для анализа и оптимизации БСС.

В рамках данного исследования предлагается имитационная модель, реализованная на платформе OMNeT++ 6.3.0 с библиотеками INET 4.6. Выбор этого инструментария продиктован его способностью



UNIVERSAL INSIGHTS CONFERENCE ON SCIENCE AND SOCIETY

international scientific conference

детально моделировать физические аспекты распространения радиоволн. Модель позволяет исследовать поведение адаптивных алгоритмов, таких как AARF для Wi-Fi и механизмы контроля мощности для Zigbee. Целью работы является количественный анализ влияния качества радиосигнала на пропускную способность и задержки в сетях, что является необходимым шагом для создания более совершенных и интеллектуальных систем управления беспроводной связью.

Основная часть: Методология и программная реализация в OMNeT++. Основой для проведения исследований послужила среда дискретно-событийного моделирования OMNeT++ 6.3.0 с фреймворком INET 4.6. Для реализации адаптивной системы контроля была спроектирована базовая топология (рис. 1), состоящая из стационарного передатчика (hostA), мобильного приемника (hostB) и глобального модуля радиоэфира (radioMedium) [1].

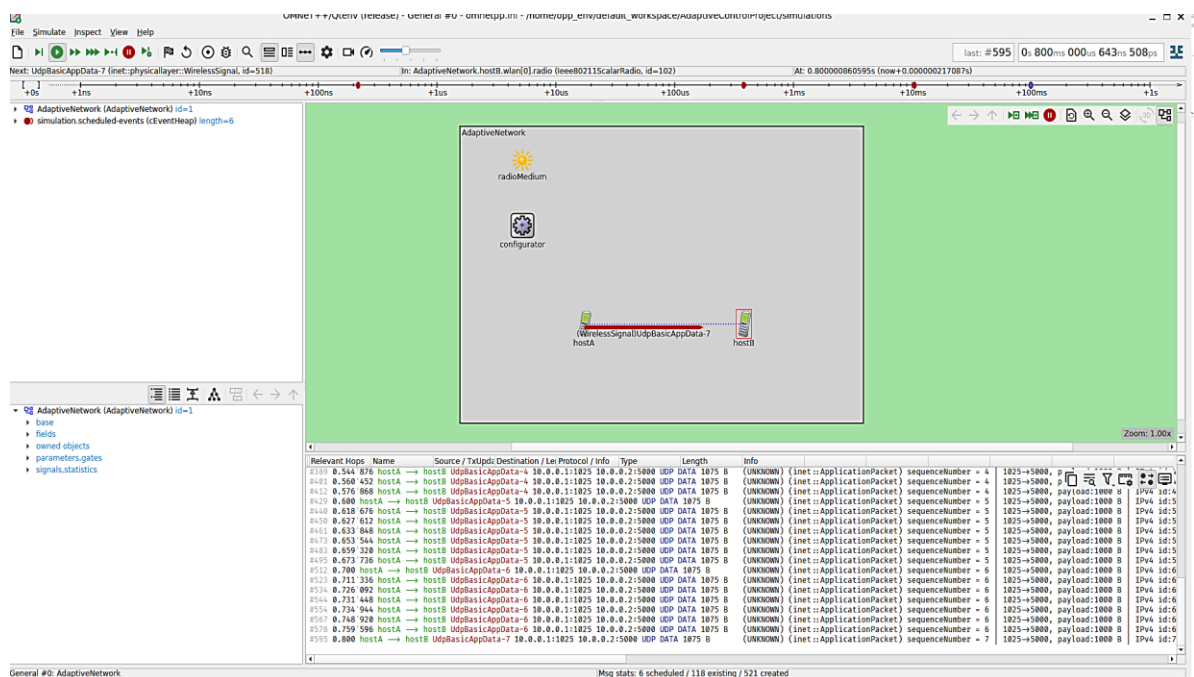


Рис. 1. Визуализация процесса передачи радиосигнала между узлами в графической оболочке Qtenv

UNIVERSAL INSIGHTS CONFERENCE ON SCIENCE AND SOCIETY international scientific conference

Для реализации адаптивной системы контроля качества радиосигнала была спроектирована базовая топология, состоящая из двух взаимодействующих узлов: стационарного передатчика (HostA) и мобильного приемника (HostB). Интеграция модуля Ipv4NetworkConfigurator позволила автоматизировать процесс маршрутизации и статической адресации, что исключило излишние задержки на обмен служебными ARP-запросами и позволило сфокусироваться исключительно на физических параметрах радиоканала. За расчет затухания радиоволн в свободном пространстве, а также учет интерференции и фонового теплового шума (-110 дБм) отвечал глобальный модуль RadioMedium [2]. Визуальное представление процесса моделирования в графической оболочке Qtenv представлено на рисунке 1.

Для сравнительного анализа система была реализована в двух вариантах: для широкополосной сети Wi-Fi (IEEE 802.11) и энергоэффективной сенсорной сети ZigBee (IEEE 802.15.4). С учетом выявленных ограничений, фокус исследования был смещен в сторону энергоэффективных сенсорных сетей (БСС) на базе стандарта IEEE 802.15.4 (технология ZigBee). В отличие от Wi-Fi, сети ZigBee предназначены для устройств Интернета вещей (IoT), где ключевым фактором является не скорость, а экономия заряда батареи и гарантированная доставка телеметрии [3].

Среда моделирования была переконфигурирована: радиомодуль заменен на Ieee802154NarrowbandScalarRadioMedium, а узлы переведены на использование Ieee802154Mac. Поскольку датчики генерируют малый объем данных, размер пакета был уменьшен до 50 байт, а интервал отправки увеличен до 0.5 с. Учитывая специфику IoT-устройств, скорость движения узла HostB была снижена до 2 м/с (скорость пешехода), а

UNIVERSAL INSIGHTS CONFERENCE ON SCIENCE AND SOCIETY international scientific conference

стартовая мощность передатчика установлена на минимальном уровне — 1 мВт [4].

Конфигурация сети Wi-Fi (IEEE 802.11). В первом сценарии моделировалась передача тяжелого UDP-трафика (пакеты по 1000 байт). Для исследования пределов дальности мощность передатчика была ограничена до 10 мВт. Для реализации адаптивности был активирован алгоритм AARF (Adaptive Auto Rate Fallback), динамически меняющий скорость передачи. В сетях стандарта 802.15.4 адаптация скорости (подобная AARF в Wi-Fi) применяется редко из-за узкой полосы пропускания. Основным методом контроля качества здесь выступает адаптивное управление мощностью (ATPC) [5]. Система постоянно отслеживает уровень принимаемого сигнала (RSSI) и значение SNIR.

Конфигурация сети ZigBee (IEEE 802.15.4). Во втором сценарии сеть была переконфигурирована под стандарты интернета вещей (IoT). Размер пакета уменьшен до 50 байт, скорость движения снижена до 2 м/с (имитация пешехода/робота), а мощность установлена на экстремально низком уровне — 1 мВт.

Результаты моделирования и анализ данных. В ходе симуляции мобильный узел удалялся от передатчика. Законы физики накладывают ограничения на дальность передачи: на рисунке 2 зафиксирован физический предел канала при мощности 10 мВт.

Как видно из графика, пропускная способность стабильна до 20-й секунды, после чего происходит резкий обрыв связи. Однако внутренний анализ MAC-уровня доказывает, что адаптивная система пыталась предотвратить потерю данных. Однако стоит учесть, что устройство было в движении и отдалялось от передатчика.

UNIVERSAL INSIGHTS CONFERENCE ON SCIENCE AND SOCIETY

international scientific conference

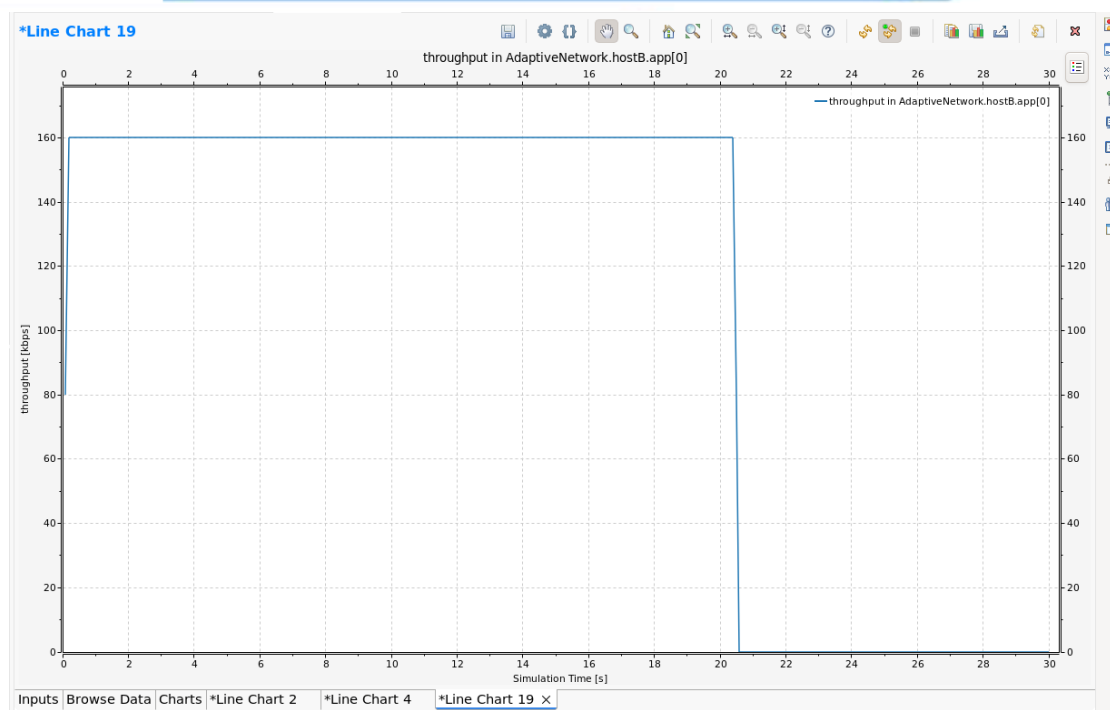


Рис. 2. Пропускная способность (Throughput) на приемнике IEEE 802.11

Следующим примером является анализ параметров качества в сенсорной сети ZigBee. Моделирование энергоэффективного протокола IEEE 802.15.4 показало иную картину передачи телеметрии (рис. 3).

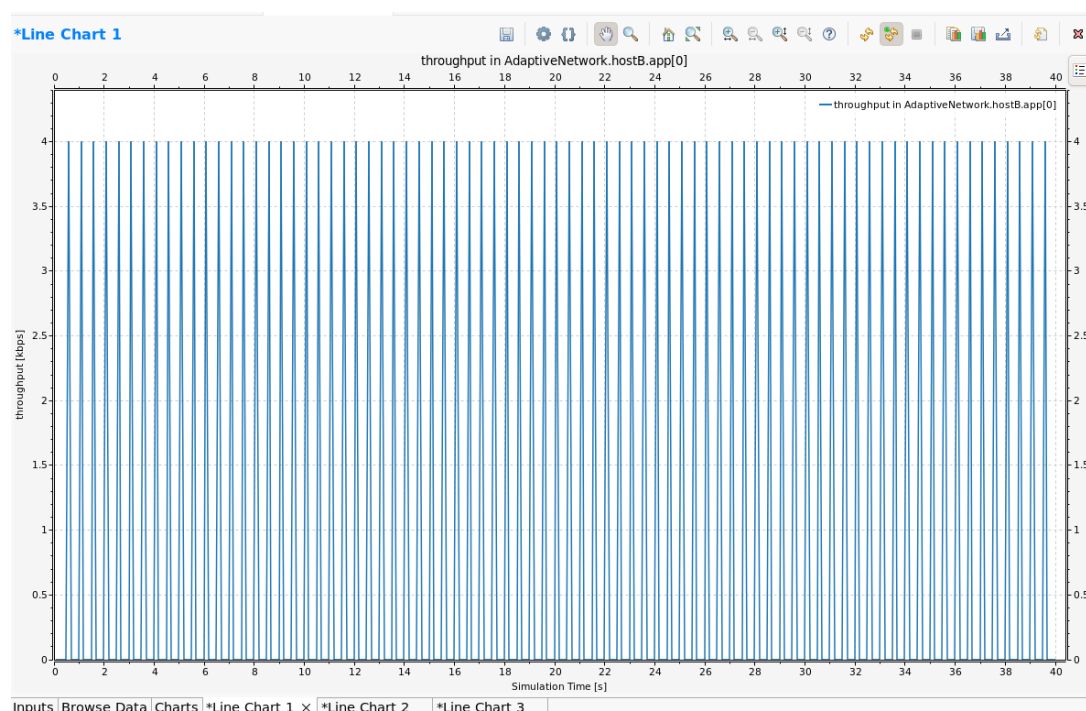


Рис. 3. Дискретная пропускная способность датчика ZigBee

UNIVERSAL INSIGHTS CONFERENCE ON SCIENCE AND SOCIETY

international scientific conference

В отличие от сплошной линии Wi-Fi, график ZigBee представляет собой «частокол» из дискретных всплесков. Каждая линия — это один принятый пакет (50 байт). Данный график подтверждает, что при скорости 2 м/с и мощности 1 мВт канал связи остается стабильным на протяжении всего времени моделирования. Несмотря на то, что, устройства отдалялось друг от друга.

Анализ сквозной задержки (End-to-End Delay) передачи пакетов позволил выявить следующие закономерности:

1. Стабилизация задержки: Основная часть значений времени доставки данных концентрируется на стабильной отметке около 4 мс, что является оптимальным показателем для сетей данного класса.

2. Инициализационные издержки: Зафиксированный на начальном этапе моделирования кратковременный всплеск задержки (до 9 мс) обусловлен процессами построения маршрутов и служебным обменом данными модуля конфигулятора (Ipv4NetworkConfigurator).

3. Эталонное значение для мониторинга: Сохранение стабильной задержки в 4 мс на протяжении всего сеанса связи свидетельствует об отсутствии коллизий в радиоэфире. Это позволяет адаптивной системе контроля использовать данный показатель в качестве базового (эталонного) критерия. Любое последующее отклонение от этой величины может служить триггером для алгоритмов компенсации деградации радиоканала.

В целом, моделирование и имитация системы контроля качества радиосигнала в беспроводных сенсорных сетях Wi-Fi и ZigBee показали, что использование статических параметров передачи крайне неэффективно в условиях мобильности узлов. Среда OMNeT++ с фреймворком INET доказала свою применимость для глубокого анализа физического и MAC-уровней.

UNIVERSAL INSIGHTS CONFERENCE ON SCIENCE AND SOCIETY international scientific conference

Сравнение двух стандартов выявило фундаментальные различия в подходах к адаптации. Для широкополосного Wi-Fi (IEEE 802.11) критически важным является использование алгоритмов динамического снижения скорости (таких как AARF) для удержания связи на предельных расстояниях. В то же время, для энергоэффективных сетей ZigBee (IEEE 802.15.4) ключевую роль играет адаптивное управление мощностью передатчика (ATPC), позволяющее сохранять стабильность канала при жестких ограничениях на энергопотребление.

Полученные в ходе имитационного моделирования результаты и отработанные механизмы адаптивного контроля могут быть успешно применены при проектировании реальных систем промышленного Интернета вещей (IIoT) и "Умного города", где требуется обеспечение высокой надежности передачи телеметрических данных при агрессивном воздействии радиопомех.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Varga A. OMNeT++ // Modeling and Tools for Network Simulation. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. – С. 35-59.
2. INET Framework for OMNeT++. [Электронный ресурс]. URL: <https://inet.omnetpp.org/> (дата обращения: 20.05.2024).
3. Farahani S. ZigBee Wireless Networks and MAC Specification. – Newnes, 2011. – 352 p.
4. Rappaport T. S. Wireless communications: principles and practice. – 2nd ed. – Prentice Hall PTR, 2002.
5. Lin S., Zhang J., Zhou G., Gu L., Stankovic J. A., He T. ATPC: Adaptive Transmission Power Control for Wireless Sensor Networks // Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '06). – 2006. – С. 223-236.