

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

УДК 504.064

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2021-24-3-98-108>

Разработка макета распределенной сенсорной системы экологического мониторинга

Е. А. Севрюкова¹, Е. А. Волкова¹, В. А. Дорошенко², А. В. Солодков¹✉

¹Национальный исследовательский университет "МИЭТ", Москва, Россия

²АО "ПКК Миландр", Москва, Россия

✉ solodkov_aw@mail.ru

Аннотация

Введение. Рассмотрены основные принципы осуществления экологического мониторинга; проанализированы возможности построения сенсорных систем для осуществления этой задачи. В качестве протокола беспроводной связи создаваемой системы экомониторинга предложено использование телекоммуникационного стандарта с низким энергопотреблением NB-IoT, обеспечивающего эффективное сетевое взаимодействие устройств сети. Проведено моделирование системы и макетирование алгоритмов приема и передачи сигналов.

Цель работы. Построить макет приемопередатчика по стандарту NB-IoT и провести его имитационное моделирование. Использовать маршрут создания системы с формированием ее цифрового двойника в MatLab.

Материалы и методы. Прототип построен с использованием отладочной платы Xilinx Zedboard и приемопередатчика на основе микросхемы AD9361, а имитационная модель – при помощи пакета программ MatLab 2010.

Результаты. Получены результаты имитационного моделирования в канале с аддитивным белым гауссовым шумом, определена мощность обнаруживаемых сигналов синхронизации стандарта NB-IoT. Приемник и передатчик стандарта NB-IoT реализованы на плате Xilinx Zedboard. Временные диаграммы, полученные в ходе тестирования макета, демонстрируют, что разработанная система готова к тестированию в реальной среде. Определены энергетические и ресурсные затраты разработанного макета узла беспроводной сенсорной сети.

Заключение. Полученные результаты моделирования показывают, что разработанная модель системы связи функционирует корректно и формируемый сигнал передатчика соответствует требованиям стандарта NB-IoT. Результаты разработки можно использовать для создания отечественной микросхемы узла сбора и передачи данных мониторинга окружающей среды.

Ключевые слова: системы мониторинга окружающей среды, сенсорные сети, быстрое прототипирование, ПЛИС, интернет вещей, NB-IoT

Для цитирования: Разработка макета распределенной сенсорной системы экологического мониторинга / Е. А. Севрюкова, Е. А. Волкова, В. А. Дорошенко, А. В. Солодков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 3. С. 98–108. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-98-108

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке центра НТИ "Сенсорика" в НОЦ РЦСС НИУ МИЭТ в рамках проекта "Создание автоматизированной системы мониторинга окружающей среды (АСМОС) для сбора, обработки, хранения и передачи метеорологической и экологической информации", рег. № НИОКТР: АААА-А20-1200130090100-3.

Статья поступила в редакцию 26.03.2021; принята к публикации после рецензирования 20.04.2021; опубликована онлайн 29.06.2021

Medical Devices and Devices for Control of the Environment, Substances,
Materials and Products

Original article

A Prototype Unit of a Distributed Sensor System for Ecological Monitoring

Elena A. Sevryukova¹, Elena A. Volkova¹,
Vladislav A. Doroshenko², Alexey V. Solodkov¹✉

¹National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia

²MILANDR GROUP, Moscow, Russia

✉solodkov_aw@mail.ru

Abstract

Introduction. In this article, the basic principles of ecological monitoring were considered, and the possibilities of constructing sensor systems were analysed. It was proposed to use the NB-IoT low-energy telecommunication standard as a basic wireless protocol for ecological system development, which ensures effective communication of network devices. A prototype of the system was constructed, and algorithms for receiving and transmitting signals were simulated.

Aim. To construct a prototype of a transceiver based on the NB-IoT standard and perform its simulation. To utilize digital twin in MatLab to create the proposed system.

Materials and methods. The prototype was constructed using the Xilinx Zedboard evaluation board and transceiver on AD9361 chip, and the simulation was performed using the MatLab 2010 software package.

Results. The results of the simulation in the channel with the additive white Gaussian noise (AWGN) were obtained, and the level of the detected synchronization signals of the NB-IoT standard was determined. The receiver and transmitter of the NB-IoT standard were implemented on the Xilinx Zedboard evaluation board. The timing simulation results show that the designed system can be tested in a real environment. The power consumption and resource utilization of the constructed wireless sensor network prototype unit were determined.

Conclusion. The results obtained via the simulation process show that the designed prototype of the communication system works correctly, and the produced signal meets all the requirements of the NB-IoT standard. The results can be used for creating a domestic manufactured, specialized integrated chip for data units of ecological monitoring systems.

Keywords: ecological monitoring system, sensor networks, rapid prototyping FPGA, IoT, NB-IoT

For citation: Sevryukova E. A., Volkova E. A., Doroshenko V. A., Solodkov A. V. A Prototype Unit of a Distributed Sensor System for Ecological Monitoring. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2021, vol. 24, no. 3, pp. 98–108. doi: 10.32603/1993-8985-2021-24-3-98-108

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of financing. The research was carried out with the financial support of the Center for Scientific and Technical Information "Sensorika" NIU MIET NOTS RTSSS within the project "Creation of an automated environmental monitoring system (ASMOS) for the collection, processing, storage and transmission of meteorological and environmental information", Project No. AAAA-A20-1200130090100-3.

Submitted 26.03.2021; accepted 20.04.2021; published online 29.06.2021

Введение. В настоящее время стремительно развиваются информационно-коммуникационные технологии. Это связано, прежде всего, с повышением востребованности услуг по обмену и обработке различных видов информации. Одной из наиболее перспективных областей в сфере сбора, анализа, обработки, хранения и передачи данных являются беспроводные сенсорные сети (БСС), общее видение которых обычно связано с единой

концепцией интернета вещей (Internet of Things – IoT). Актуальность IoT обусловлена интеллектуализацией таких объектов, как дом, офис, производственное помещение, а также автоматизацией производств посредством внедрения технологий сбора данных.

В настоящий момент имеется большое количество сенсорных систем, интегрирующих в себе как сенсорные технологии, так и обработку сигналов,

хранение данных и сетевые возможности. В условиях, когда вследствие стремительного промышленного развития приобретают первостепенное значение вопросы охраны окружающей среды, а также рационального использования природных ресурсов, критически важным параметром для построения сенсорных сетей, развернутых, в частности, для метео- и экомониторинга, является энергоэффективность составляющих их устройств.

Поскольку ключевой функциональной возможностью БСС является осуществление эффективного сетевого взаимодействия, актуальна задача создания систем контроля и наблюдения за параметрами окружающей среды с применением современных телекоммуникационных решений, позволяющих достичь минимального энергопотребления устройств на их основе.

В настоящей статье рассмотрена реализация системы информационного взаимодействия для обеспечения централизованного сбора, обработки и передачи информации в сенсорной системе с использованием стандарта связи с низким энергопотреблением.

Анализ экологических систем мониторинга параметров окружающей среды. Природная среда представляет собой сложную систему, состояние которой подвержено непрерывным изменениям. Эти изменения различны по своей направленности и величине, неравномерно распределены во времени и в пространстве. Вместе с тем, воздействие человека на окружающую среду вследствие стремительного технологического развития требует лучшего понимания процессов и взаимосвязей между элементами внутри этой среды. Ключ к такому пониманию – использование систем мониторинга окружающей среды, основными функциями которых являются наблюдение за экологической системой конкретного региона во времени и пространстве, отслеживание качества экологической среды по изменению основных параметров, оценка и прогнозирование влияния деятельности человека на экологическую систему.

Цели создания и развития систем экологического мониторинга – максимально полная информационная поддержка управленческих решений в сфере охраны и оздоровления окружающей среды, интеграция экологической информации, получаемой различными ведомствами, и внедрение современных расчетно-аналитических методов для комплексной оценки состояния окружающей среды [1].

Область применения экологических систем мониторинга обширна [2, 3]. На сегодняшний день

наиболее важными являются прогнозирование погодных условий [4, 5], контроль загрязнений воздуха и выбросов в атмосферу токсичных веществ в городской среде и промышленных зонах [6, 7], а также улучшение систем сельскохозяйственного производства [8–10].

Загрязнение воздуха – серьезная экологическая проблема для большинства крупных городов мира. Выбросы токсичных веществ промышленных предприятий и мусорных полигонов оказывают существенное негативное воздействие на природную среду, а также на здоровье и качество жизни людей. Увеличение числа подобных промышленных объектов ведет к росту вероятности аварийных случаев загрязнения окружающей среды, в особенности загрязнения воздуха. В течение определенного периода времени после происшествия вследствие метеорологических и географических условий загрязнение воздуха может сохранять свою интенсивность, что приводит к большому экологическому ущербу. В таких случаях особенно важно использовать системы мониторинга параметров воздушной среды, работающие в режиме реального времени.

Общая система мониторинга и контроля за промышленными предприятиями и полигонами для захоронения отходов необходима для обеспечения эффективного технического обслуживания и принятия профилактических мер против утечки загрязняющих веществ в окружающую среду.

Быстрое развитие и миниатюризация сенсорных устройств, а также последние достижения в области беспроводной связи и сетевых технологий позволили создавать сети небольших датчиков, которые можно использовать для постоянного мониторинга состояния и стабильности окружающей среды. Структура типовой БСС изображена на рис. 1. Область покрытия подобной сети может составлять от нескольких метров до нескольких километров за счет возможности ретрансляции сообщений от одного узла к другому [12].

Вследствие большой удаленности сенсорных узлов, стремительного роста стоимости обслуживания сети из-за недолговечности аккумуляторных элементов узлов и невозможности их подзарядки существующие системы не подходят для эффективной реализации задачи экомониторинга [13, 14], что приводит к необходимости рассмотрения подкласса систем с очень низким потреблением, в частности, стандарта NB-IoT (Narrowband IoT, узкополосный IoT).

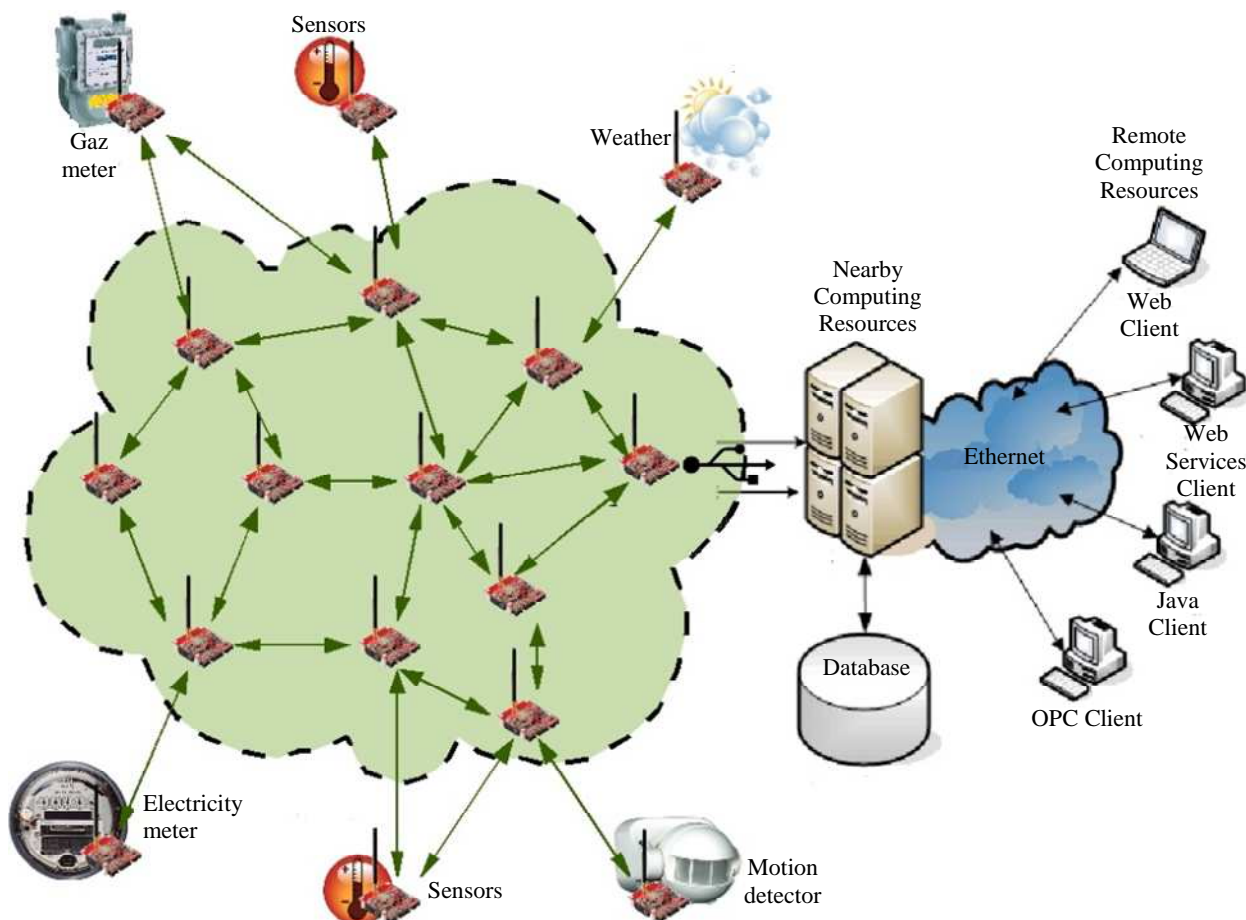


Рис. 1. Пример беспроводной сенсорной сети [11]

Fig. 1. An example of a wireless sensor network [11]

Методы беспроводной связи с низким энергопотреблением. Стандарт NB-IoT, разработанный консорциумом 3GPP, является наиболее перспективной технологией радиочастотного доступа, которая создана для удовлетворения специфических требований IoT. Технология NB-IoT основана на существующих сетях LTE [15]. При этом функциональные возможности сети LTE, не используемые NB-IoT, сводятся к минимуму, а весь ресурс сети отдается для реализации необходимых NB-IoT возможностей. NB-IoT оптимизирован для небольших и нечастых передач данных и позволяет избежать функций, не требующихся для целей IoT, например измерений для контроля качества канала, агрегации несущих и двойного подключения. Поэтому конечным устройствам требуется лишь небольшой запас энергии батареи, что делает стандарт экономически эффективным. В связи с этим NB-IoT-комплекс совместим с существующей инфраструктурой сотовой сети и обладает таким же уровнем безопасности, что и LTE [16].

С точки зрения стека протоколов технология NB-IoT может рассматриваться как новый радиоинтерфейс, построенный на инфраструктуре LTE. NB-IoT использует лицензированный участок спектра и полосу пропускания всего 200 кГц. Он позволяет подключать до 100 000 оконечных устройств на соту с возможностью увеличения емкости добавлением большего количества несущих.

Для передачи данных в NB-IoT применяется частотное разделение каналов с мультиплексированием на одной несущей в восходящей линии (uplink – UL) [17, 18] и множественный доступ с частотным разделением каналов с одной несущей частотой (Single Carrier Frequency Division Multiple Access – SC-FDM) с использованием модуляции QPSK в нисходящей линии (downlink – DL) [19]. В стандарте NB-IoT минимальными структурными составляющими являются так называемые ресурсные блоки (FDM-символы на 6 или 7 поднесущих) длительностью 0.5 мс (один временной интервал). Два временных интервала (таймслота) образуют подкадр, 10 подкадров составляют

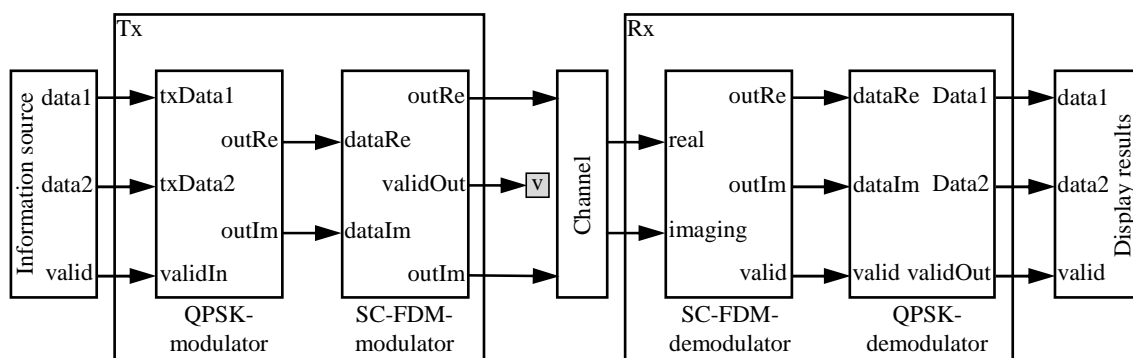


Рис. 2. Блок-схема модели системы связи на базе NB-IoT

Fig. 2. A flow chart of a communication system prototype based on NB-IoT

кадр [18]. Для установления синхронизации с базовой станцией используется двухэтапная схема: один раз в кадр в эфир передаются сигналы первичной синхронизации (primary synchronization signal – PSS) и обеспечивающие уточнение сигналы вторичной синхронизации (secondary synchronization signal – SSS). В качестве обоих сигналов используются последовательности Задова–Чу со сдвигами, которые позволяют однозначно идентифицировать базовую станцию.

Скорость передачи данных ограничена 200 кбит/с в DL и 180 кбит/с в UL. Дальность работы для городских и пригородных районов составляет до 8 и до 25 км соответственно.

Разработка системы информационного взаимодействия. Основу модели разработанной в среде MatLab системы связи на базе NB-IoT (рис. 2) составляют 2 структурных элемента, реализующих алгоритмы цифровой обработки сигналов в передатчике и в приемнике.

Перед преобразованием с использованием метода SC-FDM квадратурно-модулированный сигнал должен быть отображен на ресурсную сетку NB-IoT, представляющую собой матрицу, где строки являются поднесущими, а столбцы – символами UL-кадра SC-FDM. Сетка ресурсов охватывает подкадр (2 временных интервала) во временной области. Размер этого массива составляет $12N_{RB} \times 2N_{symb}$, где N_{RB} – количество ресурсных блоков, охватывающих доступную полосу пропускания; N_{symb} – количество SC-FDM-символов на интервале.

Для проверки алгоритма обработки передающей части системы информационного взаимодействия реализован приемник, выполняющий

обратные преобразования для восстановления исходного сигнала.

В соответствии с требованиями стандарта NB-IoT приняты следующие значения параметров подсистем передающей и приемной частей модели:

- расстояние между поднесущими 15 кГц;
- размер преобразований Фурье 128 точек;
- количество используемых поднесущих 12;
- длина циклического префикса – стандартная;
- частота дискретизации схемы 1.92 МГц;
- полоса частот передаваемого сигнала 180 кГц.

В качестве данных для передачи используется сигнал меандра, отсчеты которого хранятся в системной памяти DDR. После обработки потока данных подсистемой модулятора сигнал поступает в AD9361, где происходит его оцифровка и необходимые преобразования для отправки в эфир.

После сборки и настройки проекта в программном пакете Xilinx Vivado версии 2017.2 [20] были выполнены операции синтеза и имплементации HDL-модели, а также генерация конечной прошивки ПЛИС, которая используется для последующей демонстрации работы узла передачи.

Для управления программируемой логикой в процессор системы на кристалле (SoC) Zynq [21] были загружены основные драйверы и библиотеки, позволяющие взаимодействовать различным компонентам системы, а также написана программа, содержащая инструкции для установленного на отладочную плату модуля радиочастотного трансивера.

Результаты. Рассмотрим полученные на разных этапах моделирования в Simulink зависимости и убедимся, что блок-схема алгоритмов передачи и приема сигнала, реализующая восходящую линию связи стандарта NB-IoT, функционирует корректно.

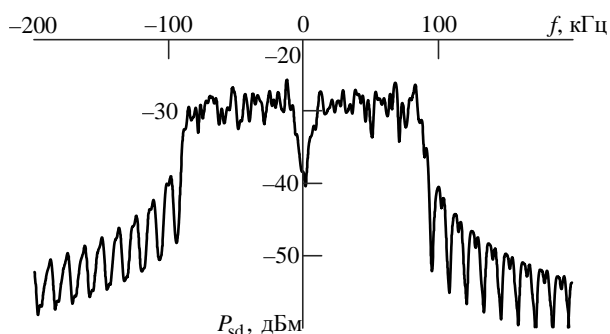


Рис. 3. Спектральная плотность мощности передаваемого сигнала

Fig. 3. The spectral power density of the transmitted signal

Как следует из зависимости спектральной плотности мощности формируемого передатчиком сигнала от частоты (рис. 3), основная мощность сигнала сосредоточена в полосе 180 кГц. Можно заметить сниженную мощность в районе нулевой частоты, соответствующей постоянной составляющей сигнала.

Результаты обнаружения сигнала синхронизации PSS проиллюстрированы на рис. 4. На нем показано изменение уровня взаимной корреляции принимаемого сигнала и искомой последовательности PSS (кривая 1) CC_P в зависимости от номера отсчета входного сигнала. На один символ в модели приходится 2000 отсчетов.

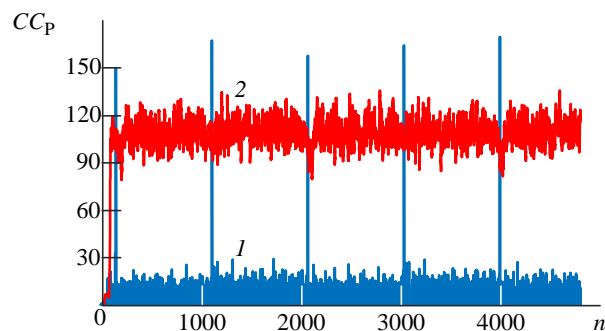


Рис. 4. Обнаружение сигнала синхронизации PSS

Fig. 4. PSS synchronization signal detection

На график также нанесен пороговый сигнал (кривая 2), пропорциональный усредненному значению корреляции. Длина окна усреднения определялась принятым значением вероятности пропуска синхросигнала и при $P_{\text{miss}} = 0.1$ составила 32 отсчета. Пики, превышающие пороговое значение, соответствуют моментам обнаружения конкретной последовательности PSS. На длительность одного SC-OFDM-символа приходится 2 пика, что соответствует передаче PSS дважды в каждом радиочастотном кадре NB-IoT.

На рис. 5 показаны графики, отображающие уровень взаимной корреляции между принимаемым сигналом и SSS. По оси абсцисс указаны условные номера последовательностей SSS (всего используются 167 последовательностей). Для каждого сигнала SSS отображены только максимальные значения взаимной корреляции. Последовательность SSS с максимальной взаимной корреляцией, достигнутой за время вторичной синхронизации, используется для символьной синхронизации и одновременно позволяет определить групповой идентификатор (Group ID – GID) базовой станции. Представленные графики поиска сигналов SSS демонстрируют способность приемной системы осуществлять идентификацию абонентов в сети.

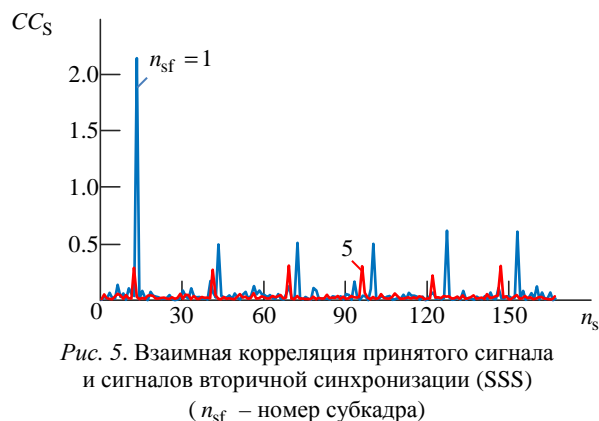


Рис. 5. Взаимная корреляция принятого сигнала и сигналов вторичной синхронизации (SSS) (n_{sf} – номер субкадра)

Fig. 5. Cross-correlation of the received signal and SSS (n_{sf} – subframe number)

Результаты моделирования полученной системы для канала с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) представлены на рис. 6, который описывает зависимость вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум E_b/N_0 .

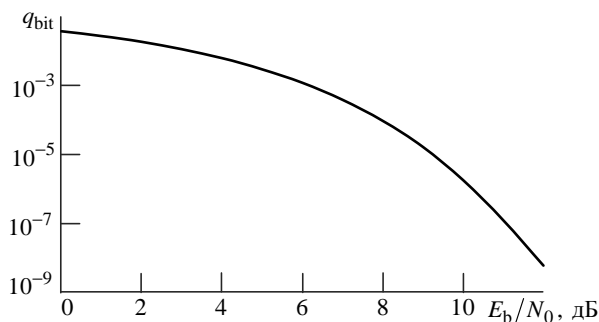


Рис. 6. Вероятности битовой ошибки для канала с АБГШ

Fig. 6. The bit error rate for a channel with Additive White Gaussian Noise (AWGN)

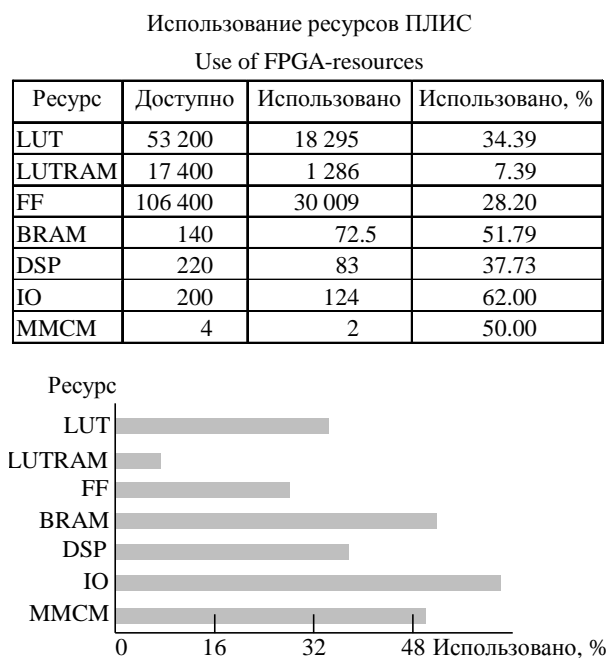


Рис. 7. Использование ресурсов ПЛИС

Fig. 7. Use of FPGA resources

В таблице и на рис. 7 представлен отчет об использовании ресурсов СнК Zynq для разработанного проекта. Необходимо отметить, что при синтезе и имплементации модели Vivado применялись стандартные стратегии их исполнения, направленные на уменьшение времени выполнения синтеза и достижения требуемых временных параметров модели.

Параметр энергопотребления систем экомониторинга играет важнейшую роль при разработке сенсорных систем. Вследствие этого необходимо проанализировать энергетические затраты полученной системы. С помощью функции анализа мощности в Vivado выполнены оценки потребляемой мощности на всех этапах разработки: после синтеза, после размещения компонентов и трассировки соединений.

На рис. 8 представлен сводный отчет о мощности, потребляемой компонентами итогового проекта на этапе трассировки. Как следует из отчета, основная часть энергопотребления приходится на процессорную часть СнК Zynq. Это обусловлено, в первую очередь, отсутствием режима сна, характерного для устройств с небольшими аккумуляторными элементами. После инициализации системы и выполнения программы передачи/приема оборудование продолжает функционировать в стандартном режиме, что значительно повышает потребление энергии платой.

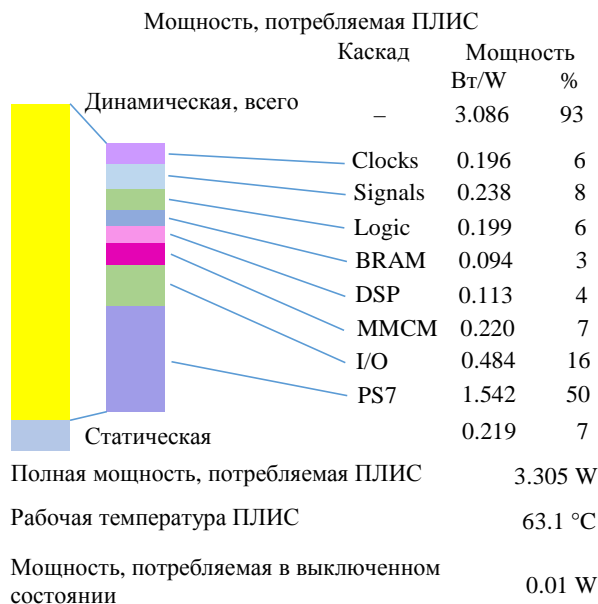


Рис. 8. Отчет о потреблении мощности

Fig. 8. Power consumption report

В итоге результаты моделирования показали правильность функционирования разработанного физического уровня узла сенсорной системы на основе выбранного стандарта NB-IoT. В дальнейшем эти наработки планируется использовать для создания узла сенсорной системы с помощью отечественной компонентной базы, например базовых матричных кристаллов. Поскольку вычислительные ресурсы традиционного телекоммуникационного оборудования значительно превышают ресурсы ПЛИС, для полной реализации функциональных возможностей узла беспроводной сенсорной сети необходимы как более мощная плата, так и проведение оптимизации затрачиваемых ресурсов и энергопотребления, что является планом для дальнейшей работы.

Заключение. В статье рассмотрены возможности систем мониторинга экологических параметров с использованием датчиков, передающих результаты измерения при помощи беспроводной сети. Для увеличения длительности жизни узлов такой сети в качестве радиопотокола передачи данных выбран стандарт со сниженным энергопотреблением (NB-IoT).

Разработана система информационного взаимодействия и проверена ее работоспособность с использованием отладочной платы с радиочастотным модулем. В ходе моделирования изучен спектр сигнала и показана, в частности, возможность устойчивого обнаружения синхросигналов, а в ходе испытания определена вероятность битовой ошибки. Полученные данные доказывают работоспособность созданных алгоритмов.

В результате реализации NB-IoT в ПЛИС оценено энергопотребление системы на стороне абонента. Отчеты САПР Vivado показывают высокий уровень мощности, потребляемой прототипом, в частности процессорным ядром, однако на этапе макета снизить эту мощность невозможно. Вместе с тем, расход мощности созданной цифровой

частью позволяет оценить общий уровень расходов потенциальной микросхемы ASIC. Помимо этого было оценено количество используемых итоговым проектом ресурсов отладочной платы: задействуется лишь часть структурных элементов программируемой логики, что предоставляет возможность для модификации проекта.

Авторский вклад

Северюкова Елена Александровна – постановка задачи, введение.

Волкова Елена Анатольевна – разработка алгоритмов и архитектуры программного обеспечения, обзор систем экомониторинга.

Дорошенко Владислав Александрович, Солодков Алексей Викторович – моделирование алгоритмов, представление результатов, заключение.

Author's contribution

Elena A. Sevrukova, problem statement, introduction.

Elena A. Volkova, development of algorithms and software architecture, survey of ecological monitoring systems.

Vladislav A. Doroshenko, Alexey V. Solodkov, development and modeling of algorithms, presentation of simulation results and conclusion.

Список литературы

1. A Study on Design Principles of Automatic System for Environment Monitoring / E. A. Sevrukova, E. A. Volkova, N. V. Gubanov, A. V. Solodkov, A. V. Gorelik // 2020 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus). St Petersburg and Moscow, 27–30 Jan. 2020. Piscataway: IEEE, 2020. P. 2545–2548. doi: 10.1109/ElConRus49466.2020.9039522

2. Environmental Monitoring Systems: Review and Future Development / I. Šečerov, D. Dolinaj, D. Pavić, D. Milošević, S. Savić, S. Popov, Ž. Živanov // Wireless Engineering and Technology. 2018. Vol. 10, № 1. P. 1–18. doi: 10.4236/wet.2019.101001

3. Othman M. F., Shazali K. Wireless sensor network Applications: A study in environment monitoring System // Procedia Engineering. 2012. Vol. 41. P. 1204–1210. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.302

4. Shiravale S., Sriram P., Bhagat S. M. Flood Alert System by using Weather Forecasting Data and Wireless Sensor Network // Intern. J. of Computer Applications. 2015. Vol. 124, № 10. P. 14–16. doi: 10.5120/ijca2015905608

5. Wiston M., Mphale K. M. Weather Forecasting: From the Early Weather Wizards to Modern-day Weather Predictions // J. of Climatology & Weather Forecasting. 2018. Vol. 6, № 2. P. 1–9. doi: 10.4172/2332-2594.1000229

6. Ayele T. W., Mehta R. Air Pollution Monitoring and prediction Using IoT // 2018 Second Intern. Conf. on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). Coimbatore, India, 20–21 April 2018. Piscataway: IEEE, 2018. P. 1741–1745. doi: 10.1109/ICICCT.2018.8473272

7. A Review of Urban Air Pollution Monitoring and Exposure Assessment Methods / X. Xie, I. Semanjski, S. Gautama, E. Tsiligiann, N. Deligiannis, R. T. Rajan, F. Pasveer, W. Philips // ISPRS Intern. J. of Geo-Information. 2017. Vol. 6, № 12. P. 1–21. doi: 10.3390/ijgi6120389

8. A Review of Wireless Sensors and Networks' applications in Agriculture / A. Rehman, A. Z. Abbasi, N. Islam, Z. A. Shaikh // Computer Standards & Interfaces. 2014. Vol. 36, № 2. P. 263–270. doi: 10.1016/j.csi.2011.03.004

9. Agricultural Management through wireless Sensors and Internet of Things / S. Navulur, A. S. C. S. Sastry, M. N. Giri Prasad // Intern. J. of Electrical and Computer Engineering. 2017. Vol. 7, № 6. P. 3492–3499. doi: 10.11591/ijece.v7i6.pp3492-3499

10. Saiz-Rubio V., Rovira-Más F. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: a Review on Crop Data Management // Agronomy. 2020. Vol. 10, № 2. P. 1–21. doi: 10.3390/agronomy10020207

11. Mieleveville F., Galos M., Navarro D. Dynamic Reconfiguration for Software and Hardware Heterogeneous Real-time WSN // SENSORCOMM 2012: The Sixth Intern. Conf. on Sensor Technologies and Applications. Rome, Italy, IARIA, 19–24 Aug. 2012. P. 95–100.

12. Имитационное моделирование системы мониторинга окружающей среды / Е. А. Северюкова, Е. А. Волкова, А. В. Угроватов, М. Д. Копылова // Изв. вузов. Электроника. 2019. Т. 25, № 5. С. 521–529. doi: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-521-529.

13. Node Energy Consumption Analysis in Wireless Sensor Networks / F. Luo, C. Jiang, H. Zhang, X. Wang, L. Zhang,

Y. Ren // IEEE 80th Vehicular Technology Conf. (VTC2014-Fall). Vancouver, Canada, 14–17 Sept. 2014. P. 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2014.6966071

14. Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies / G. Pasolini, C. Buratti, L. Feltrin, F. Zabini, C. De Castro, R. Verdone, O. Andrisano // Sensors. 2018. Vol. 18, iss. 4. P. 1118–1134. <https://doi.org/10.3390/s18041118>

15. Fattah H. 5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT). Boca Raton: CRC Press, 2019. 262 p. <https://doi.org/10.1201/9780429455056>

16. Paving the path to Narrowband 5G with LTE Internet of Things (IoT) // White Paper, Qualcomm. 2016. 36 p. URL: <https://www.qualcomm.cn/media/documents/files/paving-the-path-to-narrowband-5g-with-lte-iot.pdf> (дата обращения 25.02.2021)

17. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things

/ Y.-P. E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, H. S. Razaghi // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55, № 3. P. 117–123. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600510CM

18. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G. London: Academic Press, 2016. 616 p.

19. Cellular Internet of things: technologies, standards, and performance / O. Liberg, M. Sundberg, E. Wang, J. Bergman, J. Sachs. London: Academic Press, 2017. 382 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01868-5>

20. Тарасов И. Е. ПЛИС Xilinx. Языки описания аппаратуры VHDL и Verilog, САПР, приемы проектирования. М.: Горячая линия–Телеком, 2020. 538 с.

21. The Zynq Book: Embedded Processing with the ARM Cortex-A9 on the Xilinx Zynq-7000 All Programmable SoC / R. A. Elliot, M. A. Enderwitz, C. H. Louise, R. W. Stewart. Glasgow: Strathclyde Academic Media, 2014. 484 p.

Информация об авторах

Севрюкова Елена Александровна – доктор технических наук (2017), профессор, зам. директора Института перспективных материалов и технологий Национального исследовательского университета "МИЭТ" (НИУ МИЭТ). Автор более 60 научных публикаций. Сфера научных интересов – экология, системы мониторинга окружающей среды.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МИЭТ" (НИУ МИЭТ), пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия

E-mail: melaly@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5522-7427>

Волкова Елена Анатольевна – магистр техники и технологии по направлению "Электроника и наноэлектроника" (2019), преподаватель НИУ МИЭТ. Автор более 15 научных работ. Сфера научных интересов – экология, системы мониторинга окружающей среды.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МИЭТ" (НИУ МИЭТ), пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия

E-mail: eavolkova2015@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5647-2582>

Дорошенко Владислав Александрович – магистр техники и технологии по направлению "Телекоммуникации" (2020), инженер-программист АО "ПКК Миландр". Автор двух научных публикаций. Сфера научных интересов – ПЛИС, цифровая обработка сигналов.

Адрес: АО "ПКК Миландр", Георгиевский пр., д. 5, Зеленоград, Москва, 124498, Россия

E-mail: doroshenko.v@milandr.ru

Солодков Алексей Викторович – магистр техники и технологии по направлению "Телекоммуникации" (2012), преподаватель НИУ МИЭТ. Автор более 30 научных публикаций. Сфера научных интересов – ПЛИС, цифровая обработка сигналов.

Адрес: Национальный исследовательский университет "МИЭТ" (НИУ МИЭТ), пл. Шокина, д. 1, Зеленоград, Москва, 124498, Россия

E-mail: solodkov_aw@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8663-372X>

References

1. Severyukova E. A., Volkova E. A., Gubanova N. V., Solodkov A. V., Gorelik A. V. A Study on Design Principles of Automatic System for Environment Monitoring. 2020 IEEE Conf. of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St Petersburg and Moscow, 27–30 Jan. 2020. Piscataway, IEEE, 2020, pp. 2545–2548. doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039522
2. Šećerov I., Dolinaj D., Pavić D., Milošević D., Savić S., Popov S., Živanov Ž. Environmental Monitoring Systems: Review and Future Development. *Wireless Engineering and Technology*. 2018, vol. 10, no. 1, pp. 1–18. doi: 10.4236/wet.2019.101001
3. Othman M. F., Shazali K. Wireless sensor network Applications: A study in environment monitoring System. *Procedia Engineering*. 2012, vol. 41, pp. 1204–1210. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.302
4. Shiravale S., Sriram P., Bhagat S. M. Flood Alert System by using Weather Forecasting Data and Wireless Sensor Network. *Intern. J. of Computer Applications*. 2015, vol. 124, no. 10, pp. 14–16. doi: 10.5120/ijca2015905608
5. Wiston M., Mphale K. M. Weather Forecasting: From the Early Weather Wizards to Modern-day Weather Predictions. *J. of Climatology & Weather Forecasting*. 2018, vol. 6, no. 2, pp. 1–9. doi: 10.4172/2332-2594.1000229
6. Ayele T. W., Mehta R. Air Pollution Monitoring and prediction Using IoT. 2018 Second Intern. Conf. on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT). Coimbatore, India, 20–21 April 2018. Piscataway, IEEE, 2018, pp. 1741–1745. doi: 10.1109/ICICCT.2018.8473272
7. Xie X., Semanjski I., Gautama S., Tsiligiann E., Deligiannis N., Rajan R. T., Pasveer F., Philips W. A Review of Urban Air Pollution Monitoring and Exposure Assessment Methods. *ISPRS Intern. J. of Geo-Information*. 2017, vol. 6, no. 12, pp. 1–21. doi: 10.3390/ijgi6120389
8. Rehman A., Abbasi A. Z., Islam N., Shaikh Z. A. A Review of Wireless Sensors and Networks' applications in Agriculture. *Computer Standards & Interfaces*. 2014, vol. 36, no. 2, pp. 263–270. doi: 10.1016/j.csi.2011.03.004
9. Navulur S., A. S. C. S. Sastry, M. N. Giri Prasad Agricultural Management through wireless Sensors and Internet of Things. *Intern. J. of Electrical and Computer Engineering*. 2017, vol. 7, no. 6, pp. 3492–3499. doi: 10.11591/ijece.v7i6.pp3492-3499
10. Saiz-Rubio V., Rovira-Más F. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: a Review on Crop Data Management. *Agronomy*. 2020, vol. 10, no. 2, pp. 1–21. doi: 10.3390/agronomy10020207
11. Mieleveville F., Galos M., Navarro D. Dynamic Reconfiguration for Software and Hardware Heterogeneous Real-time WSN. *SENSORCOMM 2012. The Sixth Intern. Conf. on Sensor Technologies and Applications*. Rome, Italy, IARIA, 19–24 Aug. 2012, pp. 95–100.
12. Severyukova E. A., Volkova E. A., Ugrovatov A. V., Kopylova M. D. Imitation simulation of environment monitoring system. *Proc. Univ. Electronics*. 2019, vol. 24, no. 5, pp. 521–529. doi: 10.24151/1561-5405-2019-24-5-521-529. (In Russ.)
13. Luo F., Jiang C., Zhang H., Wang X., Zhang L., Ren Y. Node Energy Consumption Analysis in Wireless Sensor Networks. *IEEE 80th Vehicular Technology Conf. (VTC2014-Fall)*. Vancouver, Canada, 14–17 Sept. 2014, pp. 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2014.6966071
14. Pasolini G., Buratti C., Feltrin L., Zabini F., De Castro C., Verdone R., Andrisano O. Smart City Pilot Projects Using LoRa and IEEE802.15.4 Technologies. *Sensors*. 2018, vol. 18, iss. 4, pp. 1118–1134. <https://doi.org/10.3390/s18041118>
15. Fattah H. 5G LTE Narrowband Internet of Things (NB-IoT). Boca Raton, CRC Press, 2019, 262 p. <https://doi.org/10.1201/9780429455056>
16. Paving the path to Narrowband 5G with LTE Internet of Things (IoT). White Paper, Qualcomm. 2016, 36 p. Available at: <https://www.qualcomm.cn/media/documents/files/paving-the-path-to-narrowband-5g-with-lte-iot.pdf> (accessed 25.02.2021)
17. Wang Y.-P. E., Lin X., Adhikary A., Grovlen A., Sui Y., Blankenship Y., Bergman J., Razaghi H. S. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*. 2017, vol. 55, no. 3, pp. 117–123. doi: 10.1109/MCOM.2017.1600510CM
18. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G. London, Academic Press, 2016, 616 p.
19. Liberg O., Sundberg M., Wang E., Bergman J., Sachs J. Cellular Internet of things: technologies, standards, and performance. London, Academic Press, 2017, 382 p. doi: 10.1016/C2016-0-01868-5
20. Tarasov I. E. PLIS Xilinx. *Yazyki opisaniya apparatury VHDL i Verilog, SAPR, priemy proektirovaniya*. [Hardware Description Languages VHDL and Verilog, CAD, Design Techniques]. Moscow, *Goryachaya liniya – Telekom*, 2020, 538 p. (In Russ.)
21. Elliot R. A., Enderwitz M. A., Louise C. H., Stewart R. W. The Zynq Book: Embedded Processing with the ARM Cortex-A9 on the Xilinx Zynq-7000 All Programmable SoC. Glasgow, Strathclyde Academic Media, 2014, 484 p.

Information about the authors

Elena A. Sevryukova, Dr. Sci. (Eng.) (2017), professor, deputy director of Institute of Advanced Materials and Technologies National Research University of Electronic Technology – MIET. The author of more than 60 scientific publications. Area of interest: ecology, monitoring.

Address: National Research University of Electronic Technology – MIET, Bld. 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow 124498, Russia

E-mail: melaly@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5522-7427>

Elena A. Volkova, Master of Engineering (2019), teacher in MIET. The author of 15 scientific publications. Area of interest: ecology, monitoring.

Address: National Research University of Electronic Technology – MIET, Bld. 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow 124498, Russia

E-mail: eavolkova2015@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5647-2582>

Vladislav A. Doroshenko, Master of Engineering (2020), software engineer of JSC " PAC Milander". The author of 2 scientific publications. Areas of interest: FPGA, digital signal processing.

Address: JSC " PAC Milander", 5 Georgievskiy Pr., Zelenograd, Moscow 124498, Russia

E-mail: doroshenko.v@milandr.ru

Alexey V. Solodkov, Master of Engineering (2012), teacher in MIET. The author of more than 30 scientific publications. Area of interest: FPGA, digital signal processing.

Address: National Research University of Electronic Technology – MIET, Bld. 1 Shokin Square, Zelenograd, Moscow 124498, Russia

E-mail: solodkov_aw@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8663-372X>
