

**КОМПЛЕКСНА ОЦЕНКА НА СИМУЛАТОРИ ЗА ZIGBEE БЕЗЖИЧНИ
СЕНЗОРНИ МРЕЖИ ЗА ЦЕЛИТЕ НА ОБУЧЕНИЕТО****АЙДЪН ХЪКЪ**¹¹Технически университет - Варна**COMPREHENSIVE EVALUATION OF ZIGBEE WIRELESS SENSOR NETWORK
SIMULATORS FOR PURPOSES OF EDUCATION****Aydan Haka**¹¹Technical University of Varna, Bulgaria
aydin.mehmed@tu-varna.bg**Abstract**

The growing popularity and use of Internet of Things technologies in recent years requires more active study of their work and principles, as well as parameters related to Quality of Service. This can be done by physically building the studied technology and researching the operation of the network, or by using simulation products that allow this. This paper presents a comprehensive evaluation of some of the most well-known simulation products for researching the Quality of Services in ZigBee sensor networks.

Keywords: ZigBee, Sensor Network Simulators, Comparison.**ВЪВЕДЕНИЕ**

Обявеното извънредно положение в цял свят през 2020г. налага предприемане на мерки за отдалечена работа във всички сфери от живота. В някои сфери се изисква отдалечено следене на параметри на околната среда или състоянието на пациенти. Това може да се постигне със средствата на съвременни технологии като 4G, 5G и Internet of Things (IoT). Съвременните комуникационни технологии 4G и 5G продължават да се развиват и подобряват активно като се превръщат в опорна инфраструктура за осигуряване на надежден и високоскоростен достъп както между устройствата на крайния потребител, така и между устройствата предназначени за IoT. Това позволява все по-широкото разрастване и разпространение на IoT мрежите в цял свят [1].

Съществуват множество IoT протоколи както за покриване на малки области, така и за големи [2]. Един от най-известните протоколи за реализиране на IoT мрежа на

къси разстояния и ниска консумация на енергия е ZigBee, разработен от ZigBee Alliance [3].

Разширяващото се използване на IoT технологиите в съвременния живот изисква по-активното им изследване с цел подобряване на ефективността и обслужването. Това може да се реализира с изграждане на реална инфраструктура за изследваната технология или чрез симулиране на работата ѝ.

Предимството при изследване на реално изградена инфраструктура е, че получените резултати от изследванията ще са достоверни и в момента, в който е стартирана мрежата, може да започне експлоатирането ѝ. Недостатъкът на този подход е, че трябва внимателно да се планират необходимите компоненти за изграждане на мрежата. В противен случай може да се наложи извършване на промени в инфраструктурата и инвестиране в допълнителни компоненти поради незадоволителна производителност,

недостиг на ресурс, лошо планиране на преносната среда и др. Това може да се избегне с предварително планиране и тестване на проектираната инфраструктура със средствата на симулационен продукт за изследваната технология.

Предимството на симулационния продукт е, че позволява предварително планиране на мрежата, добавяне или премахване на различни компоненти без инвестиране на средства за това, изследване състоянието на мрежата при различни натоварвания, добавяне на различна функционалност към устройствата, изграждане на обща визия и изводи за работата. Недостатъкът е, че може да се получат неточни резултати при различните изследвания.

В сферата на образованието двата подхода може да се комбинират с цел изследване резултатите от реална инфраструктура и симулация, както и за анализ на несъвпадащите резултати. В случай на невъзможност за инвестиране на средства в закупуване на оборудване за наблюдаваната технология се използват симулационни продукти, които може да са със свободен лиценз за ползване.

КРИТЕРИИ ЗА АНАЛИЗ НА СИМУЛАЦИОННИ СРЕДИ ЗА БЕЗЖИЧНИ СЕНЗОРНИ МРЕЖИ

Комплексното оценяване на симулационни среди за ZigBee сензорни мрежи може да се извърши въз основа на набор от критерии за оценяване. Получената комплексна оценка за всеки симулационен продукт позволява сравняването им и определянето на най-подходящия от тях за целите на обучението.

Множество проучвания на ZigBee сензорни мрежи изследват работата и ефективността на механизмите за маршрутизиране на трафика [4, 5, 6].

В [7] е извършен сравнителен анализ на симулационни продукти за ZigBee мрежи. Използваните критерии за реализиране на сравнението са:

- лиценз за ползване;
- език за програмиране;
- експортиране на кода от симулатора;

- възможност за внедряване и проектиране на протоколи;
- възможност за изграждане на различни мрежови архитектури;
- възможност за разширяване на симулираната безжична сензорна мрежа;
- основни функции;
- недостатъци.

Въз основа на предходно проучване на симулационни среди за 6LoWPAN сензорни мрежи [8] може да се модифицират предложените критерии за комплексно оценяване и да се приложат за ZigBee сензорни мрежи.

С цел прецизиране на комплексната оценка на симулационни продукти се обединяват критериите в разгледаните проучвания както следва:

- моделиране на различни механизми за приоритизация на трафика при ZigBee;
- моделиране на различни видове трафик;
- възможност за изграждане на различни мрежови архитектури за ZigBee;
- симулиране на ZigBee мобилност;
- анализ на получените резултати;
- възможност за визуално представяне на изследваната мрежа;
- възможност за внедряване и проектиране на протоколи;
- нагледно представяне на въведените данни;
- извеждане на статистически резултати за направените тестове;
- поддържане на графичен потребителски интерфейс;
- наличие на ръководство за потребители и разработчици;
- поддържана операционна система;
- скалируемост;
- поддържана хардуерна платформа;
- оценяване батерията/времето за живот;
- моделиране на консумацията на енергия;
- моделиране на механизми за приоритизиране на трафика;
- език за програмиране;
- лесна инсталация;

- време за изучаване;
- използване на процесора (Average CPU);
- използване на паметта (Commit);
- лиценз за ползване.

КОМПЛЕКСНА ОЦЕНКА ЗА КАЧЕСТВОТО НА СИМУЛАЦИОННИ СРЕДИ ЗА ZIGBEE СЕНЗОРНИ МРЕЖИ

За да се избегне субективността на автора при оценяване на разглежданите симулационни среди, може да се използва методът на комплексна оценка, представен в [9]. За изчисляване на комплексния показател за качество се избира една от следните математически зависимости: квадратична, геометрична, аритметична или хармонична.

Сравнението съгласно разглежданите критерии се основава на средна аритметична и средна геометрична оценка, които се определят като оптимални по отношение на състоятелност, нормираност и сравнимост и се изчисляват съгласно формули (1) и (2) съответно [10].

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (1)$$

$$R_g = \prod_{i=1}^n d_i^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

Създадени са множество симулационни продукти, даващи възможност за симулиране и изследване на ZigBee технология. В настоящото изследване са разглеждани едни от най-известните: ZBOSS, OPNET, QualNet, OMNeT++, NS-2, NS-3 и MATLAB. Разглежданите среди са сравнени с разработения от съавторски екип симулационен софтуер в [11] и е представена средна аритметична и средна геометрична оценка на всеки от тях. На база получените оценки може да се определи най-подходящият симулационен продукт за целите на обучението.

ZBOSS [12] – среда за симулиране на

ZigBee стек с отворен код, която включва инструменти за рационализиране на задачи за разработка и отстраняване на грешки. Работи на компютър с Linux операционна система и осигурява стекови взаимовръзки без допълнителен хардуер. Действа като концентратор, свързващ виртуални устройства. Може да се използва за разработване на нови и специфични потребителски профили, преди да бъдат заредени в целевата платформа. Позволява симулиране на големи мрежи.

OPNET [13] – обектно-ориентиран софтуер, предоставящ среда за моделиране на комуникационни системи и мрежи. Може да се използва за разглеждане на комуникационни мрежи, устройства, протоколи и приложения. Графичният потребителски интерфейс на средата позволява формиране на топология на мрежата от физически до приложен слой. Разработен е модул за симулиране на различни функционалности на IEEE 802.15.4 стандарта.

QualNet [14] – мрежов симулатор за планиране, тестване и обучение. За създаване на типични мрежови модели продуктът предоставя графичен потребителски интерфейс. За добавяне на по-специализирана функционалност и мрежови протоколи са налични допълнителни библиотеки от компоненти. Включва библиотека за симулиране на различни протоколи за сензорни мрежи като Bluetooth, Thread и функционалности на IEEE 802.15.4/ZigBee.

OMNeT++ [15] – модулна платформа, базирана на C++ с възможност за разширяване. Предоставя модули за симулиране на специфична за областта функционалност като поддръжка на сензорни мрежи, безжични ad-hoc мрежи, Интернет протоколи, моделиране на производителността и др. Притежава ZigBee спецификации, подходящи за комуникация на високо ниво, които се използват за създаване на частна мрежа от устройства с ниска мощност. Разпространява се под академичен публичен лиценз.

NS-2 [16] – базиран на дискретни събития симулатор, програмиран на C++. Осигурява симулиране на TCP трафик, протоколи за маршрутизиране и мултикаст по

жични и безжични мрежи. Осигурява подробна документация. Не е мащабируем за по-широки мрежи. Версия 2.26 на NS-2 включва допълнения в кода за симулиране на IEEE 802.15.4 LR-WPAN. Внедрените допълнения обхващат основните функции, с изключение на сигурността и свободния за достъп период, който се състои от резервиране на слотове за прилагане на Quality of Service.

NS-3 [17] – симулатор с отворен код на C++, разработен през 2006г. и базиран на дискретни събития, предназначен за изследователска и образователна работа. NS-3 изучава механизми за предаване и интеграция. Има подобрена модулна архитектура и повишена производителност в сравнение с NS-2. Модулите за безжични персонални мрежи на симулатора следват същата IEEE 802.15.4 архитектура внедрена в устройствата, базирани на този стандарт.

MATLAB [18] – изчислителна среда и патентован език за програмиране, разработен от MathWorks. Продуктът позволява матрични манипулации, графики на функции и данни, прилагане на алгоритми, създаване на графичен потребителски интерфейс и взаимодействие с програми, написани на други езици, включително C, C++, C#, Java, Fortran и Python. MATLAB има библиотека „Communications Toolbox“, която позволява симулиране на различни ZigBee спецификации.

За специфичните учебни цели на дисциплината „Безжични комуникации“ в катедра „Компютърни науки и технологии“ при ТУ-Варна е разработен продукт [11] с отворен код, написан на езика Visual Basic. Предоставя интуитивен и лесен за работа графичен потребителски интерфейс. Позволява изследване на ZigBee сензорна мрежа, като предоставя графики и статистически данни за симулираните действия.

Извършено е сравнение на осем симулационни продукта за изграждане на ZigBee

мрежа. Проведени са експерименти с въвеждане на параметри на една и съща ZigBee мрежа, с едни и същи входни данни. Симулирани са едни и същи ситуации и са анализирани получените резултати, представени в Таблица 1.

Изчислените комплексни средни аритметични и средни геометрични оценки за изследваните симулатори, на база експерименталните резултати от Таблица 1, са представени в Таблица 2.

Резултатите от комплексните оценки съгласно използваните критерии за сравнение доказват, че **QualNet** и **NS-3** симулаторите предоставят най-добри възможности за изследване на ZigBee мрежи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия доклад е предложена подобрена система от критерии за прецизно извършване на сравнение и комплексно оценяване на симулатори за ZigBee мрежи. На база на предложената система от критерии са оценени осем симулационни продукта и са изчислени комплексни оценки, които намаляват субективността на автора и осигуряват сравнимост на резултатите.

Съгласно направеният комплексен сравнителен анализ симулаторът **QualNet** е най-подходящ за изследване на ZigBee сензорни мрежи. Комплексните оценки за разработения в [11] симулационен продукт дават повод за твърдение, че той се доближава по качества до най-добрите.

Спрямо критериите „Лесна инсталация“, „Време за изучаване“, „Използване на процесора“, „Използване на паметта“, „Лиценз за ползване“, които са важни по отношение на обучението, разработеният в катедра „Компютърни науки и технологии“ при ТУ-Варна симулационен продукт предоставя по-добри или съизмерими резултати в сравнение с останалите.

Таблица 1. Сравнение на симулатори на ZigBee мрежи

Критерии за сравнение на ZigBee симулатори	Изследвани симулатори							
	ZBOSS	OPNET	QualNet	OMNeT++	NS-2	NS-3	MATLAB	Разработен
моделиране на различни механизми за приоритизация на трафика при ZigBee	Да частично	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно
моделиране на различни видове трафик	Да частично	Да напълно	Да частично	Да частично	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно
възможност за изграждане на различни мрежови архитектури за ZigBee	Да частично	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно
симулиране на ZigBee мобилност	Да частично	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да частично	Да частично
анализ на получените резултати	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно
възможност за визуално представяне на изследваната мрежа	Да частично	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да частично
възможност за внедряване и проектиране на протоколи	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно
нагледно представяне на въведените данни	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно
извеждане на статистически резултати за направените тестове	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно
поддържане на графичен потребителски интерфейс	Да частично	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно
наличие на ръководство за потребители и разработчици	Да частично	Да частично	Да напълно	Да частично	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно
поддържана операционна система	Linux	Windows, Linux	Windows, Linux	Linux, MAC OS, Windows	Linux, Win9x, 2000,XP	Linux, MAC OS, Windows experimental	Linux, MAC OS, Windows	Windows
скалируемост	Да частично	Да напълно	Да напълно	Да частично	Да частично	Да частично	Да напълно	Да частично
поддържана хардуерна платформа	TI CC253x, UBEC 2400, UBEC 2410	Виртуална	Виртуална	Виртуална	Виртуална	Виртуална	Виртуална	Виртуална
оценяване батерията/времето за живот	Не/Не	Не/Не	Да частично / Да напълно	Да напълно / Да напълно	Да частично / Да частично	Да напълно / Да напълно	Не/Не	Не/Не
моделиране на консумацията на енергия	Да напълно	Да частично	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Не
моделиране на механизми за маршрутизиране на трафика	Да частично	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да напълно	Да частично	Да частично
език за програмиране	C	C и C++	C++	C++	C++, OTCL	C++, Python Bindings	Matlab script, Python	Visual Basic
лесна инсталация	Да частично	Да частично	Да напълно	Да частично	Да частично	Да частично	Да напълно	Да напълно
време за изучаване	Средно	Продължително	Кратко	Средно	Продължително	Продължително	Продължително	Кратко
използване на процесора	11.85%	9.70%	27.65%	7.57%	12.42%	11.56%	28.43%	4.20%
използване на паметта	577 882KB	549 510KB	950 874KB	439 500KB	956 840KB	570 932KB	940 832KB	200 520KB
лиценз за ползване	Безплатен	Безплатен академичен лиценз	Платен търговски	Безплатен	Безплатен	Безплатен	Платен стандартен и академичен	Безплатен

Таблица 2. Сравнение на комплексните оценки на симулатори за ZigBee мрежи

Комплексен показател	Изследвани симулатори							
	ZBOSS	OPNET	QualNet	OMNeT++	NS-2	NS-3	MATLAB	Разработен
R_d	0.328	0.418	0.459	0.422	0.444	0.453	0.442	0.394
R_s	0.288	0.336	0.401	0.360	0.381	0.389	0.367	0.293

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследванията, резултатите от които са представени в настоящия доклад, са проведени по научен проект на ТУ-Варна „Изследване на възможностите за интегриране на машинно обучение и Blockchain технологии за Internet of Things“, който се финансира от държавния бюджет.

REFERENCE

- [1] Ericsson Mobility Report June 2020, <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/june-2020>, Last visit on 22.09.2020.
- [2] Link Labs Wireless IoT Network Protocols, <https://www.link-labs.com/blog/complete-list-iot-network-protocols>, Last visit on 22.09.2020.
- [3] zigbee alliance, <https://zigbeealliance.org/>, Last visit on 22.09.2020.
- [4] Maung, S., Shiraje, S., Islam, A., Hossain, M. M., Nahar, S., Arif, M. Optimization of ZigBee Network Parameters for the Improvement of Quality of Service. //Journal of Computer and Communications (JCC), Vol. 6, 2018, pp: 1-14, ISSN: 2327-5227.
- [5] Li, X., Peng, M., Cai, J. OPNET-based modeling and simulation of mobile Zigbee sensor networks. Peer-to-Peer Netw. Appl. 9, 414–423, 2016, <https://doi.org/10.1007/s12083-015-0349-8>.
- [6] Xie, H., Zeng, F., Zhang, G., Su, D. Simulation Research on Routing Protocols in ZigBee Network //Proceedings of the 6th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation January 2016, DOI: 10.2991/978-94-6239-148-2_88.
- [7] Ghayvat, H., Jie, L., Babu, A., Alahi, M., Bakar, U., Mukhopadhyay, S., Gui, X. Simulation and Evaluation of ZigBee based Smart Home using Qualnet Simulator //Ninth International Conference on Sensing Technology, 2015, DOI: 10.1109/ICSensT. 2015.7438456.
- [8] Haka, A. Study of 6LoWPAN Wireless Sensor Network Simulators for Purposes of Education. //Proceedings of International Scientific Conference UNITECH Gabrovo 2019, Volume II, 15-16 November 2019, pp: II-22 - II-27, ISSN: 1313-230X.
- [9] Haka, A., Aleksieva, V., Valchanov, H. Comparative Evaluation of Mechanisms for Traffic Prioritization in LTE Networks. //Proceedings, 2019 16-th Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA), 6-8 June 2019, Varna, Bulgaria, pp: 406-410, ISBN: 978-1-7281-1412-5.
- [10] Haka, A. Software tool for comparing LTE traffic prioritisation algorithms. //Monthly scientific and technical journal ELECTROTECHNICA & ELECTRONICA E+E, Bulgaria, 2019, Vol. 54. No 9-10/2019, pp: 146-152, ISSN: 0861-4717.
- [11] Haka, A., Aleksieva, V., Valchanov, H. Enhanced Simulation Framework for Visualisation of IEEE 802.15.4 Frame Structure on Beacon Enabled Mode of ZigBee Sensor Network. //International Conference on Biomedical Innovations and Applications (BIA 2020), 24-27 September, Varna, Bulgaria (in press).
- [12] (ZBOSS). ZBOSS Network Simulator, <https://zboss.dsr-wireless.com/projects/zboss/wiki/Documentation>, Last visit on 22.09.2020.
- [13] (OPNET). OPNET Network Simulator, IEEE 802.15.4/ZigBee OPNET Simulation Model, http://www.open-zb.net/wpan_simulator.php, Last visit on 22.09.2020.
- [14] (QualNet). QualNet simulator, <https://www.scalable-networks.com/qualnet-network-simulation>, Last visit on 22.09.2020.
- [15] (OMNeT++). OMNeT++ Network Simulator, OMNeT++ ZIGBEE MODULE, <https://omnet-manual.com/omnet-zigbee-module/>, Last visit on 22.09.2020.
- [16] (NS2). NS2 Simulator. <http://ns2simulator.com/>, Last visit on 28.09.2020.
- [17] (NS3). Network Simulator 3, <https://www.nsnam.org/>, Last visit on 28.09.2020.
- [18] (MATLAB). MATLAB Simulator. <https://uk.mathworks.com/products/matlab.html>, Last visit on 28.09.2020.