

Vynnychuk Stepan, doctor of technical sciences, acting head of department, Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine.

Максименко Євген Васильович, аспірант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України.

E-mail: iszzi@i.ua

Максименко Евгений Васильевич, аспірант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України.

Maksymenko Evhenyy, postgraduate student Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine.

Віталій Миколайович Місько, аспірант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України.

E-mail: vitalik560@yandex.ru

Місько Віталій Николаевич, аспірант Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України.

Misko Vitaliy Nikolaevich, postgraduate student Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine.

УДК 621.391

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛЕЙ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ВСЕРЕДИНІ ПРИМІЩЕННЯ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ ЖИВУЧИХ СИСТЕМ ОХОРОНИ ПОБУДОВАНИХ НА СТАНДАРТІ ZIGBEE

Сергій Родін

В цій статті наведено основні види моделей, що описують розповсюдження радіохвиль та обґрунтовано доцільність застосування цих моделей для моделювання. Розглянуто відомі моделі розповсюдження радіохвиль всередині приміщення, а саме: OSM(one-slope model), модель Keenan-Moitley, COST 231 Multi-Wall Model. Проведені теоретичні розрахунки за цими моделями. Описано методика та засоби проведення експериментальних досліджень розповсюдження радіохвиль стандарту ZigBee. Наведені результати експериментальних досліджень, які були зіставлені з теоретичними розрахунками ослаблення сигналу. Опрацьовано та проаналізовано зведені результати дослідження. Перевірено придатність відомих моделей для проектування бездротової системи охорони, побудованої на стандарті ZigBee. Запропоновано новий підхід для проектування та проведення моделювання бездротових систем, що може підвищити такі їхні характеристики, як надійність та живучість.

Ключові слова: системи охорони, розповсюдження радіохвиль всередині приміщення, моделі розповсюдження радіохвиль, бездротові, живучість, ZigBee, RSSI.

Вступ. Застосування сучасних бездротових технологій ґрунтується на можливості їх швидкого розгортання і застосування. Їх зручно й легко використовувати в системах різного призначення як на відкритому просторі, так і в умовах забудови, зокрема всередині приміщень.

Бездротові технології щораз ширше застосовуються у системах моніторингу розподілених у просторі об'єктів, зокрема у системах охорони. Особливістю бездротових систем охорони, з одного боку, є низькі вимоги щодо обсягів та швидкості передачі даних, а з іншого – підвищені вимоги щодо надійності та живучості. Для забезпечення безперебійної роботи бездротових систем потрібно, щоб рівень сигналу в приймальній антені пристрою був на достатньому рівні.

Тому для підвищення живучості бездротових систем охорони, ще на етапі проектування системи, проводиться моделювання розташування приймачів та передавачів. Для моделювання застосовують моделі розповсюдження радіохвиль.

Існують кілька видів моделей для поширення радіохвиль, які наведені нижче[5]:

– статистичні моделі, які не потребують докладної інформації про приміщення, окрім загального опису його типу, наприклад, виробниче приміщення, готель, лікарня, торговий центр, приміщення старої забудови і т.п.;

– емпіричні (одно- чи багатопробленеві) моделі, які засновані на аналізі одного або декількох променів, що з'єднують передавальну й приймальну антени з метою оцінки рівня прийнятого сигналу;

– променеві моделі (Ray Tracing model), у яких використовується квазіоптичне представлення процесів поширення сигналів і враховуються відбиття від стін приміщення й дифракцію радіохвиль.

Моделі не враховують специфіку технології розширеного спектру і невеликі віддалі між передавальними і приймальними пристроями.

Метою статті є перевірка придатності відомих моделей для проектування бездротової системи охорони, побудованої на стандарті ZigBee.

Розрахунки будуть проводитися для декількох моделей, щоб визначити яка з моделей найбільш близька до даних, отриманих при проведенні експериментів. Це дозволить заощаджувати час на проведення практичних вимірів. Визначивши найточнішу модель, надалі можна буде будувати мережі використовуючи цю модель.

Аналіз відомих моделей розповсюдження радіохвиль всередині приміщення. Сучасні бездротові технології призначені для розгортання мереж всередині будинку. На цей час розроблено багато моделей поширення радіохвиль в приміщеннях. Ці моделі, звісно, помітно складніші, ніж моделі для сигналів на відкритому просторі (поза приміщеннями). Це передовсім зумовлено такими факторами: обмеженість простору між передавачем і приймачем, складністю конфігурації приміщень (коридори, повороти, переходи, багатопверхові будинки), а також необхідністю врахування ефектів багатопроникності (сигнали на антену приймача надходять як у результаті відбитих від поверхонь, так і за рахунок дифракції або проникнення крізь перешкоди, стіни). Однак розрахунки рівнів сигналу, що проводилися за відомими моделями відрізняються від результатів експерименту, що не дають точних даних. Якщо

порівнювати теоретичні й експериментальні значення, то вони будуть відрізнятися одне від одного, тому що у теорії враховується не все.

У цьому випадку будемо розглядати декілька версій розрахунків в середині приміщення: OSM (one-slope model) [2], модель Keenan-Motley [3], COST 231 Multi-Wall Model [6]. В кожній з цих моделей використовується показник ослаблення радіохвиль стандарту ZigBee у вільному просторі L_{fs} .

$$L_{fs} = 10 \lg \left(\frac{d}{d_0} \right)^{2.5}, \text{ дБ} \quad (1)$$

d – відстань між передавачем і приймачем;

d_0 – віддаль 1 м.

Цей показник був одержаний в результаті дослідження розповсюдження радіохвиль стандарту ZigBee у вільному просторі.

One-slope model. Проста, емпірична модель, яка може дати початкові результати на етапі проектування. Широко використовується у стільникових мережах зв'язку. Головною складовою є степеневий показник, який загально характеризує тип будівлі (кількість та тип стін). Формула має вигляд:

$$L = L_{fs} + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right), \text{ дБ} \quad (2)$$

де L_{fs} – ослаблення у вільному просторі;

d – відстань між передавачем і приймачем;

d_0 – віддаль 1 м;

n – степеневий показник залежності від типу будівлі.

Оскільки ми будемо проводити випробування в одному будинку. Будинок збудований з залізобетонних конструкцій, тобто стіни та перекриття виготовлені з залізобетону. Для розрахунку в обох випадках степеневий показник приймемо рівним 2. Цей показник буде вказувати нам на те, що це залізобетонний будинок.

Таблиця 1

Розрахункові значення ослаблення сигналу для OSM між поверхами

Відстань між пристроями, м	3	6	9	12	15	18	21	24
Кількість перекриттів	1	2	3	4	5	6	7	8
Ослаблення сигналу, дБ	21,47	35,02	42,94	48,56	52,92	56,49	59,5	62,11

Таблиця 2

Розрахункові значення ослаблення сигналу для OSM на одному поверсі

Відстань між пристроями, м	2	4	6	8	10
Ослаблення сигналу, дБ	13,54	27,09	35,02	40,64	45

Модель Keenan-Motley. Модель Keenan-Motley використовується для розрахунків рівня ослаблення сигналу в закритих приміщеннях і враховує загасання сигналу при проходженні через усі стіни, що лежать на лінії, що з'єднує передавач і приймач. Дана модель враховує кількість стін та

перекриттів на шляху прямого променя від передавача до приймача. Проте всі стіни та перекриття мають мати однаковий фактор ослаблення.

$$L = L_{fs} + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + k_{wall} L_{wall} + k_{floor} L_{floor}, \text{ дБ} \quad (3)$$

де L_{fs} – ослаблення у вільному просторі;
 d – відстань між передавачем і приймачем;
 d_0 – віддаль 1 м;
 n – степеневий показник ослаблення, який залежить від середовища.
 k_{wall} – кількість стін, що закривають прямий промінь поширення радіосигналу;
 k_{floor} – кількість перекриттів, що закривають прямий промінь поширення радіосигналу;

L_{wall} – фактор ослаблення радіохвиль при поширенні через стіни;
 L_{floor} – фактор ослаблення радіохвиль при поширенні через перекриття.

Оскільки міжповерхові перекриття є товщі ніж стіни на поверсі, то для розрахунку L_{wall} приймемо рівним 2, а L_{floor} приймемо рівним 4.

Таблиця 3

Розрахункові значення ослаблення сигналу для моделі Keenan-Motley між поверхами

Відстань між пристроями, м	3	6	9	12	15	18	21	24
Кількість перекриттів	1	2	3	4	5	6	7	8
Ослаблення сигналу, дБ	20,7	35,24	45,4	53,77	61,16	67,93	74,28	80,31

Таблиця 4

Розрахункові значення ослаблення сигналу для моделі Keenan-Motley на одному поверсі

Відстань між пристроями, м	2	4	6	8	10
Кількість стін	1	2	3	4	5
Ослаблення сигналу, дБ	12,54	25,07	33,24	39,61	45

COST 231 Multi-Wall Model. Ця модель враховує ослаблення на проникнення сигналу через стіни та перекриття одночасно, що лежать на лінії прямої видимості між приймачем та передавачем. Проте на відміну від Keenan-Motley моделі, модель COST 231 Multi-Wall може враховувати індивідуальні показники згасання для кожної стіни. Було виявлено, що втрати при проходженні через деяке число перекриттів нелінійно залежать від кількості останніх. Для врахування цього фактору введений емпіричний коефіцієнт $b=0,1\dots0,9$, що дозволяє описати ослаблення сигналу виразом:

$$L = L_{fs} + 10nlg\left(\frac{d}{d_0}\right) + \sum_{i=1}^I k_{wi} L_{wi} + k_f^{\left(\frac{k_f+2}{k_f+1}-b\right)} L_f, \text{ дБ} \quad (4)$$

де k_{wi} – кількість стін i -го типу, через які проходить сигнал;
 k_f – кількість подоланих перекриттів;
 L_{fs} – ослаблення у вільному просторі;
 L_{wi} – втрати на проходження через стіну i -го типу;
 L_f – втрати на проходження на сусідній поверх;
 I – кількість типів стін (зазвичай $I = 2$ для врахування тонких і товстих стін).

Оскільки випробування проводяться в одній будівлі, то відповідно втрати на проходження одного поверху будуть такі ж як і в попередньому розрахунку, а саме L_f буде рівним 4. Оскільки коефіцієнт b є емпіричним, для отримання кращих результатів було підібрано його значення і становить 0,17. Щодо стін, то дана модель дозволяє нам враховувати індивідуальні показники ослаблення сигналу кожної стіни, які наведені в табл. 6.

Таблиця 5

Розрахункові значення ослаблення сигналу для COST 231 Multi-Wall моделі між поверхами

Відстань між пристроями, м	3	6	9	12	15	18	21	24
Кількість перекриттів	1	2	3	4	5	6	7	8
Ослаблення сигналу, дБ	20,7	36,19	46,50	54,45	61,06	66,8	71,93	76,62

Таблиця 6

Розрахункові значення ослаблення сигналу для COST 231 Multi-Wall моделі на одному поверсі

Відстань між пристроями, м	2	4	6	8	10
Кількість стін	1	2	3	4	5
Індивідуальні показники ослаблення сигналу, дБ	1,5	1,5	1,9	1,85	1,8
Ослаблення сигналу, дБ	12,03	24,07	32,93	39	44

Дослідження розповсюдження радіохвиль zigbee всередині приміщення. Дослідження проводилися у дев'ятиповерховому залізобетонному житловому будинку, за допомогою приймально- передавальних пристроїв ZigBee, які побудовані на базі чіпів CC2530 виробництва Texas Instruments. Схема розташування приймально-передавальних пристроїв на плані будинку наведені в рис. 2 та 3. Проводилося вимірювання рівня прийнятого сигналу в дБм за допомогою функції RSSI. Отримані дані були перетворені в значення ослаблення сигналу.



Рис. 1. Приймально-передавальний пристрій ZigBee

Таблиця 7

Характеристика пристроїв [4]

Живлення	USB порт 5В
Температурний діапазон	-40°C ~ 85°C
UART швидкість передачі	9600біт/с, 19200біт/с, 38400біт/с (За замовчуванням), 57600біт/с, 115200біт/с
Радіочастоти	2460МГц (За замовчуванням), 2405МГц – 2480МГц, Крок: 5МГц
Протокол	ZigBee2007
Дистанція	У межах прямої видимості: 1600м
Робочий струм	Передача: 120мА (Мах) Прийом: 45мА (Мах) Очікування: 40мА (Мах)
Чутливість приймача	-110дБм
Чіп	CC2530F256, 256KFLASH
Розміри	70x50x24мм

На рис. 2 зображено план поверху на якому проводилось дослідження. На ньому вказано місця розташування приймачів та передавачів. Зображені лінії вказують між якими вузлами проводились вимірювання та кількість стін, які проходив сигнал по прямій лінії.

RSSI (англ. Received Signal Strength Indication) – в телекомунікації, пристрій для вимірювання рівня потужності сигналу [1]. Індикатор потужності прийнятого сигналу є мірою потужності сигналу, що надходить на вхід приймача. У

режимі прийому значення RSSI можна безперервно зчитувати з реєстра стану RSSI, поки демодулятор виявляє синхроімпульс.

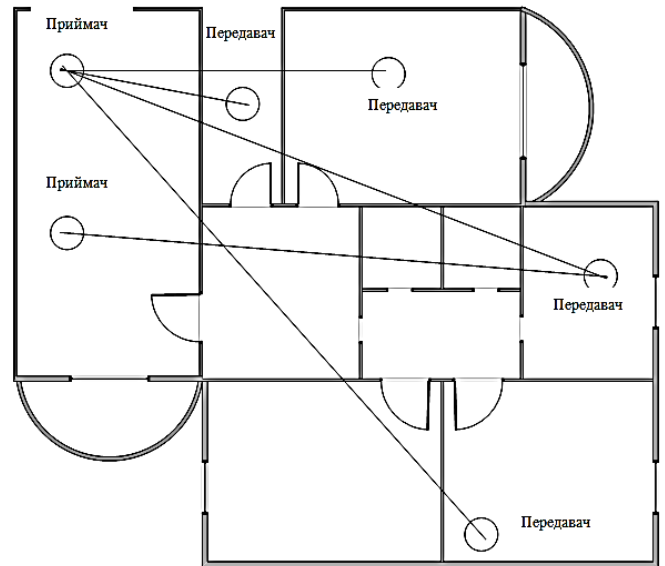


Рис. 2. План одного поверху

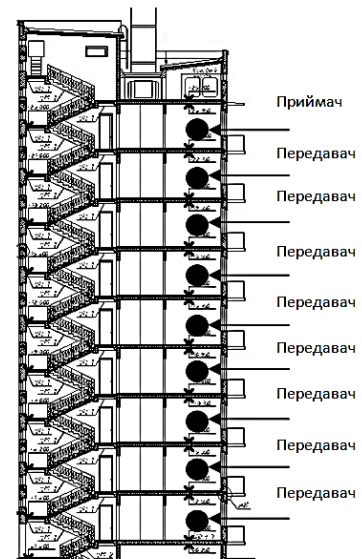


Рис. 3. План будинку

На цьому етапі показання RSSI фіксується до наступного моменту, коли мікросхема входить в режим прийому. Якщо виявлення синхронізації відключено, відбувається постійне оновлення реєстра RSSI. Значення RSSI, зчитане з реєстра стану RSSI – це число в шістнадцятковому коді. Для перетворення показання RSSI в абсолютний рівень потужності (RSSI_dBm) можна використовувати наведений нижче алгоритм. Припустимо, що значення 0xCF зчитується з реєстра RSSI. Для конвертування скористаймося виразом: $RSSI_dBm = RSSI - 256$, отримаємо значення RSSI в дБм.

Однак значення RSSI не поводить себе стабільно. Воно трохи коливається. Це відбувається за

рахунок багатьох факторів, проте основним є наявність шумів. Для того щоб підвищити точність вимірювання, будемо розраховувати середнє значення RSSI на основі декількох знятих показів. Виходить, що нам потрібно відправляти не один пакет а періодично відправляти серії пакетів і усереднювати значення RSSI. Між пакетами мають бути невеликі затримки, щоб вся серія не припала на пік завади.

Опрацювання результатів експерименту.

Наведемо зведені результати теоретичних розрахунків та практичних випробувань розповсюдження радіохвиль всередині будівлі. На рис. 4 та 5 зображено графіки зведених теоретичних розрахунків та результатів проведених випробувань.

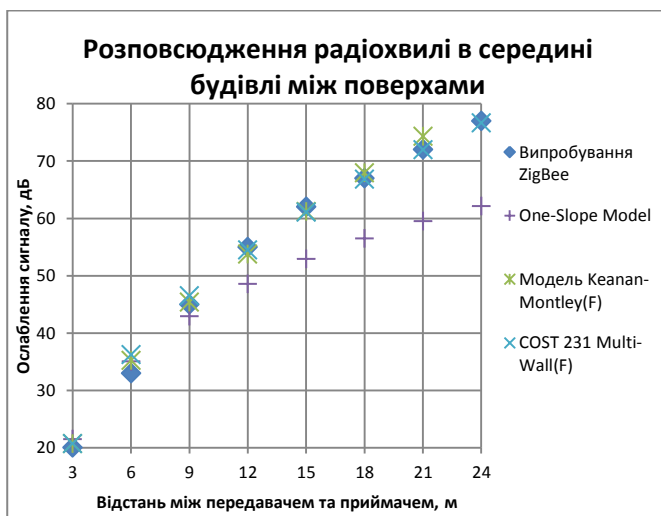


Рис. 4. Графік залежності ослаблення сигналу від відстані



Рис. 5. Графік залежності ослаблення сигналу від відстані

Як видно з графіків, COST 231 Multi-Wall модель розповсюдження радіохвиль є більш складніша, тому дає більшу точність. Це й не дивно, тому що, вона є найбільш гнучкою. Завдяки емпіричному коефіцієнту b можна врахувати нелінійну залежність ослаблення сигналу через однакові перекриття між поверхами, а також врахувати

індивідуальні показники ослаблення сигналу кожної стіни на поверсі.

Висновки. Попереднє моделювання на етапі проектування сучасних бездротових систем охорони сприяє поліпшенню таких властивостей системи, пов'язаних з поширенням сигналу, як вибір кількості й місць розміщення сенсорів; коректне прогнозування потужності сигналу в критичних місцях; для екстрених ситуацій – необхідність використання й кількість додаткових сенсорів; вибір алгоритму регулювання потужності випромінювання; перехід на інші частоти (адаптація); кероване надання каналів; врахування особливостей використовуваного обладнання (виробника обладнання); врахування характеристик використовуваних антен та ін.

Поширення сигналів всередині будівель суттєво відрізняється від поширення радіохвиль поза приміщеннями й ускладнюється обмеженістю й складною конфігурацією об'ємів, різноманітністю матеріалів, відбиваючих поверхонь, наявністю фіксованих і рухливих об'єктів, необхідністю врахування ослаблення при переході сигналів з/в приміщення.

Очевидно, жодна математична модель не може врахувати повністю всі фактори, які впливають на розповсюдження радіохвиль. Тому постає питання використання експериментальних методів вимірювання ослаблення сигналу, результати яких можна використати для чисельних розрахунків. Чим складніша математична модель (враховує більше факторів), тим вона точніша. Як видно з дослідження, краще провести попередньо випробування бездротової технології всередині конкретної будівлі, зняти покази в основних її точках та застосувати їх для чисельного розрахунку і проведення моделювання.

ЛІТЕРАТУРА

- [1]. Johnsrud S. RSSI Interpretation and Timing / S. Johnsrud, T. Aaberge // Design Note DN505. Texas Instruments Incorporated, 2010, 16 p.
- [2]. Luo M. Indoor radio propagation modeling for system performance prediction: thesis for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY / M. Luo, National Institute for Applied Sciences. – Lyon, 2013, - 126 p.
- [3]. Serodio C. A Lightweight Indoor Localization Model based on Motley-Keenan and COST / C.Serodio, L.Coutinho, L. Reigoto, J. Matias, A. Correia, P. Mestre // World Congress on Engineering (WCE 2012), (London, U.K., July 4-6, 2012), ISSN: 2078-0966 (Online).
- [4]. Shenzhen DTK Electronics Co., Ltd. Zigbee Module User Guide / Інструкція користувача для радіопередавальних модулів. // Shenzhen DTK Electronics Co., Ltd., 2012, 17 p.

- [5]. Tengku Puteh Tippi. Propagation indoor / Tengku Puteh Tippi // AWE Communications GmbH, 2012 www.awe-com.com.
- [6]. Yarkoni N. Prediction of propagation characteristics in indoor radio communication environments / N.Yarkoni, N. Blaunstein // Progress In Electromagnetics Research – PIER 59, 2006, P. 151-174.

REFERENCES

- [1]. Johnsrud S., Aaberge T. (2010) RSSI Interpretation and Timing – Design Note DN505. – Texas Instruments Incorporated, 16 p.
- [2]. Luo M. (2013) «Indoor radio propagation modeling for system performance prediction: thesis for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY»; National Institute for Applied Sciences, Lyon, 126 p.
- [3]. Serodio C., Coutinho L., Reigoto L., Matias J., Correia A., Mestre P. (2012) «A Lightweight Indoor Localization Model based on Motley-Keenan and COST», World Congress on Engineering (WCE 2012), (London, U.K., July 4-6, 2012), ISSN: 2078-0966 (Online).
- [4]. Shenzhen DTK Electronics Co., Ltd. Zigbee Module User Guide, Shenzhen DTK Electronics Co., Ltd., 2012, 17 p.
- [5]. Tengku Puteh Tippi. Propagation indoor, Tengku Puteh Tippi, AWE Communications GmbH, 2012 www.awe-com.com.
- [6]. Yarkoni N., Blaunstein N. (2006) «Prediction of propagation characteristics in indoor radio communication environments», Progress In Electromagnetics Research, PIER 59, P. 151-174.

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖИВУЧИХ СИСТЕМ ОХРАНЫ ПОСТРОЕННЫХ НА СТАНДАРТЕ ZIGBEE

В этой статье приведены основные виды моделей описывающих распространение радиоволн и обоснована целесообразность применения этих моделей для моделирования. Рассмотрены известные модели распространения радиоволн внутри помещения, а именно: OSM (one-slope model), модель Keenan-Motley, COST 231 Multi-Wall Model. Проведены теоретические расчеты по этим моделям. Описаны методика и средства проведения экспериментальных исследова-

ний распространения радиоволн стандарта ZigBee. Приведены результаты экспериментальных исследований, которые были сопоставлены с теоретическими расчетами ослабление сигнала. Обработаны и проанализированы сводные результаты исследования. Проверено пригодность известных моделей для проектирования беспроводной системы охраны, построенной на стандарте ZigBee. Предложен новый подход для проектирования и проведения моделирования беспроводных систем, который может повысить их характеристики такие, как надежность и живучесть.

Ключевые слова: системы охраны, распространение радиоволн внутри помещений, модели распространения радиоволн, беспроводной, живучесть, ZigBee, RSSI.

RESEARCH INDOOR RADIO PROPAGATION MODELS FOR DESIGN SURVIVABILITY SECURITY SYSTEMS BUILT ON THE ZIGBEE STANDARD

In this article describes the main types of radio propagation models and expediency of the application of these models for the simulation is substantiated. The known indoor radio propagation models are considered, that is: OSM (one-slope model), model Keenan-Motley, COST 231 Multi-Wall Model. The theoretical calculations based on these models are conducted. The method and means of experimental research radio propagation of ZigBee standard are described. The results of experimental research was conducted and have been compared with theoretical calculations of the signal attenuation. The combined results of the research are processed and analyzed. The suitability of known models for the design of a wireless security system, built on the standard ZigBee is verified. A new approach for the design and simulation of wireless systems, which can improve their characteristics such as reliability and survivability was proposed.

Keywords: security system, indoor radio propagation, radio propagation models, wireless, survivability, ZigBee, RSSI.

Родін Сергій Олександрович, аспірант кафедри «Захист інформації», Національний університет «Львівська політехніка».

E-mail: serg0768@gmail.com.

Родин Сергей Александрович, аспирант кафедры «Защита информации», Национальный университет «Львовская политехника».

Rodin Sergey, postgraduate Information Security Department, Lviv Polytechnic National University.