

УДК 621.396.946

Валуїський С.В., канд. техн. наук;
Димид М.Д.,
НТУУ «КПІ»

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ВЕРХНЬОЇ МЕЖІ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ ZIGBEE

Запропоновано методику оцінки верхньої межі пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж ZigBee, що може бути використана для будь-якого рівня каналної активності. Максимальна пропускна здатність для передачі з одним хопом у слабо навантажених мережах без маяків приблизно дорівнює 115,5 кбіт/с. Результати моделювання демонструють зниження максимальної пропускної здатності із збільшенням каналної активності.

Предложена методика оценки верхней границы пропускной способности беспроводных сенсорных сетей ZigBee, которая может быть использована для любого уровня каналной активности. Максимальная пропускная способность для передачи с одним хопом в слабо нагруженной сети без маяков примерно равна 115,5 кбит/с. Результаты моделирования демонстрируют снижение максимальной пропускной способности с увеличением каналной активности.

The technique of estimation of the upper limit of the capacity of wireless sensor networks ZigBee, which can be used for any level of channel activity. Maximum capacity for the transmission of one hop in the network loads of times without beacons is approximately equal to 115.5 kbps. Simulation results show a reduction of maximum capacity with increase of channel activity.

Вступ. ZigBee є ідеальним стандартом для безпроводових сенсорних мереж (БСМ), адже він будується згідно з енергоефективною специфікацією IEEE 802.15.4 і має багатопереходовий алгоритм маршрутизації, що може переналаштуватися при збоях з'єднань, маючи при цьому мінімальні енерговитрати [1]. Однак БСМ для моніторингу подій можуть стикатися з випадками, що вимагають швидкої передачі великих обсягів даних через мережу. У випадках коли WSN є частиною контрольних мереж необхідна низька затримка, адже подія, що потребує швидкого реагування має бути швидко передана на пункт управління для оперативного реагування на екстрену ситуацію. Застосування технології ZigBee у таких випадках ускладнюється, адже ZigBee базується на низькошвидкісному стандарті IEEE 802.15.4 (до 250 кбіт/с). Тому актуальною на сьогодні задачею є підвищення пропускної здатності мережі ZigBee.

Аналіз досліджень і публікацій. В роботі [2] проводилася груба оцінка параметрів мережі ZigBee, в даній роботі пропонується провести більш точку оцінку, використовуючи аналітичне моделювання функціонування мережі.

Вихідні дані, обмеження та припущення. Стандарт IEEE 802.15.4 обмежує максимальний розмір пакета до 133 октетів, диктуючи максимальну фізичну довжину службового блоку даних (найбільший блок даних, переданий від MAC), що дорівнює 127 (`aMaxPHYPacketSize`) октетам. Решта 6 октетів відповідають за службову інформацію преамбули, початкового розмежувача кадрів і поля довжини кадра, що вставляється в пакет. Загалом, заголовки PHY/ MAC займають 17 октетів службової інформації у кожному кадрі даних, як показано на рис.1.

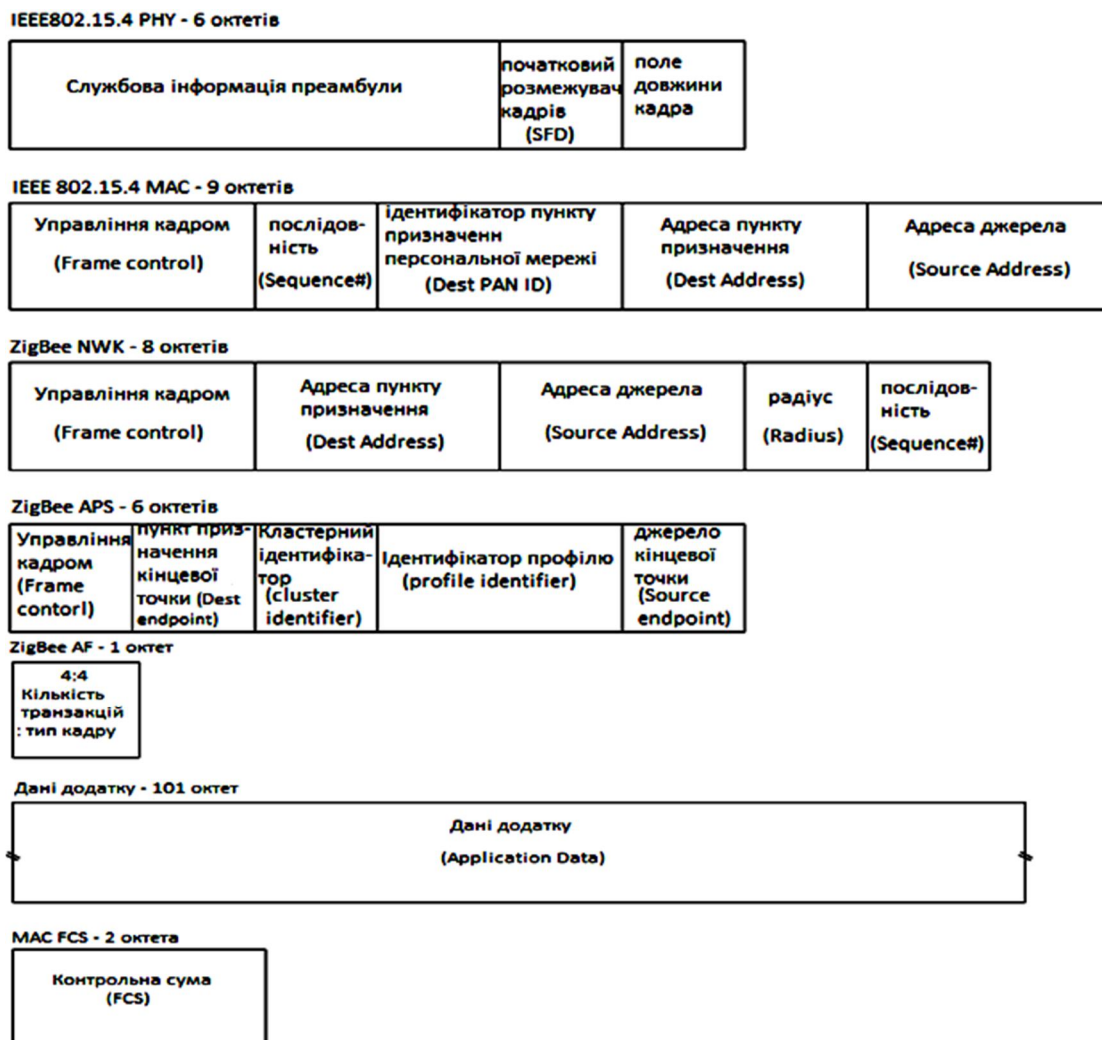


Рис. 1. Формат кадру даних ZigBee/IEEE 802.15.4

Службова інформація додана рівнем MAC може змінюватись через функціональність адресації змінної довжини. Стандарт IEEE 802.15.4 включає 2 режими адресування приладів, які часто називають довга

адресація і коротка. Довга адресація складається з 64-бітної адреси, унікальної для кожного 802.15.4-радіопередавача, коротка адреса складається з 16 біт і присвоюється вузлу після під'єднання до даної мережі. Так, як стандарт IEEE 802.15.4 призначений для низькошвидкісних PAN, коротким адресам надається перевага. Щоб узгодити адресацію за допомогою коротких або довгих адрес, заголовок шару MAC визначає поля адрес довжиною 0,2 або 8 октетів. Як тільки коротка адреса назначена, згідно зі стандартом IEEE 802.15.4 якщо коротка адреса джерела відома при відправці пакету, відправник позначає пакет короткою адресою замість довгої [3].

Максимальна довжина заголовку MAC дорівнює 25 октетам і визначена константою $aMaxMACFrameOverhead$. Максимальне корисне навантаження, що підтримується рівнем MAC визначається як $aMaxMACFrameSize$ у даній формулі:

$$aMaxMACFrameSize = aMaxPHYPacketSize - aMaxMACFrameOverhead = 127 - 25 = 102.$$

Для розрахунку пропускної здатності спочатку оцінюють середній час, необхідний для виконання CSMA-CA, потім розраховують час, необхідний для завершення решти чотирьох кроків процесу передачі для пакету заданої довжини (TXData, ACKTurnaround, TXACK, LIFS) (рис.2).

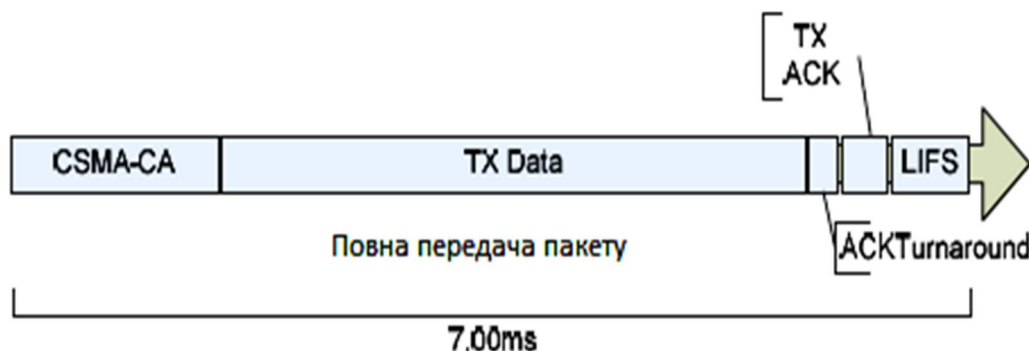


Рис. 2. Процедури передачі пакету IEEE 802.15.4

Практична оцінка пропускної здатності в мережі ZigBee регулюється наступними припущеннями:

- Немає жодних помилок передачі, що призводять до ушкодження чи втрати пакету даних.
- Кожен пакет даних запитує підтвердження на прийом.
- Пакетна структура і розміри поля при аналізі визначені як у стандарті. Зокрема корисне навантаження додатку, $AppPayload$, дорівнює 101 байт.

- Вузол призначення знаходиться на відстані одного хопа; маршрутні таблиці попередньо зкомпільовані.
- Час моделюється в символах, які можуть бути перетворені в секунди шляхом поділу на швидкість передачі символу радіозв'язку 62500 символів в секунду.

Практична оцінка пропускної здатності ZIGBEE.

Фаза передачі 1 (CSMA-CA). На MAC рівні CSMA-CA обумовлює процедуру, згідно якої пристрої стандарту IEEE 802.15.4 отримують доступ до бездротового каналу: спочатку прослуховується радіоэфір, щоб визначити, чи здійснює інший пристрій передачу в даний момент часу. На рис. 3 показана неслотована (unslotted) частина алгоритму CSMA-CA, що використовується для мереж PAN, що працюють без маяків, як описано в стандарті IEEE 802.15.4. Кроки (2) і (3) потребують змінного часу для того, щоб бути виконаними, в залежності від активності каналу. Значення $W_{\text{має}}$ нижню і верхню межі, які позначаються як $\text{macMinWE}(3)$ і $\text{macMaxWE}(3)$ (за замовчуванням 5) згідно з стандартом IEEE 802.15.4.

Максимальна кількість ітерацій, щоб отримати доступ до каналу визначається як $\text{macMaxCSMABackoffs}$ (за замовчуванням 4). Ці межі дозволяють змодельовати кореляцію процедури CSMA-CA та передачі пакету в якості ланцюга Маркова, що показано на рис. 4. Якщо алгоритм не отримує доступ до каналу в спробах $\text{macMaxCSMABackoffs}$, оголошується відмова доступу до каналу і передача завершується. Переміщення по ланцюгу Маркова від початкового стану 'TX Request' (Запит на передачу) до кінцевого стану 'AccessFailure' (Відмова доступу) призводить до ймовірності відмови доступу до каналу. Далі для розрахунків пропускної здатності вважатимемо, що мережа слабо навантажена, тобто

$$P_{\text{inactive}} = 0.9 \cdot P_{\text{access_failure}} = (1 - P_{\text{inactive}})^{\text{macMaxCSMABackoffs}} \\ = (0.1)^4 = 0.0001.$$

За винятком "Відмови Доступу" ('AccessFailure'), у кожного стану CSMA-CA є ненульовий символ часу. За цією оцінкою ми розглянемо середній випадок для отримання результатів, що мають відношення до практичної реалізації. Середня затримка даного стану в процедурі CSMA-CA може бути обчислена шляхом множення ймовірності введення стану та штрафного часу, понесеного за відвідування того стану.

Середня затримка виконання ітерацій процедури CSMA-CA є сумою середніх затримок кожного стану. Процес обчислення виконується наступним чином.

Середній символний час для даного етапу CCA (ClearChannelAssessment), CCA_i визначається так:

$$\text{symbolsCCA}_i = \text{backoff_duration}_i + \text{cca_duration} = \text{backoff_duration}_i + 8 \text{ symbols.}$$

Нехай $X_i = \text{random}(2^{\text{BE}_i} - 1)$, тоді $\text{backoff_duration}_i = E(X_i) * \text{aUnitBackoffPeriod} = E(X_i) * 20 \text{ symbols.}$

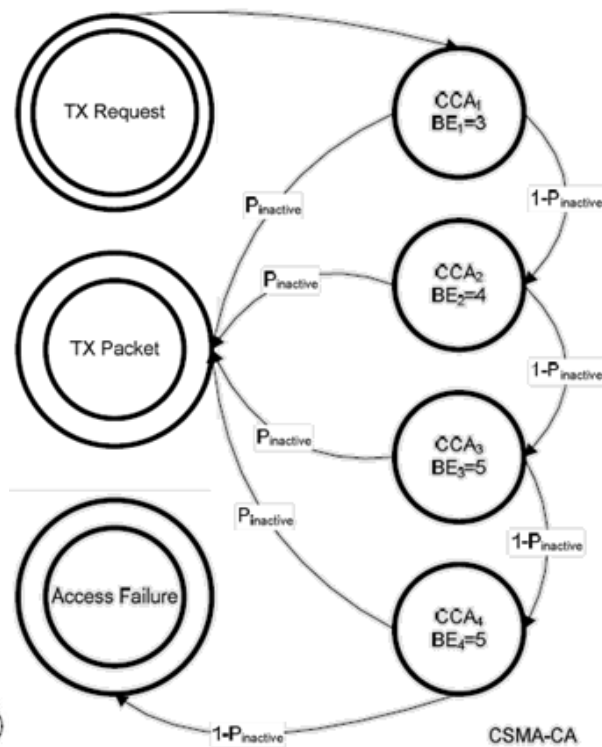
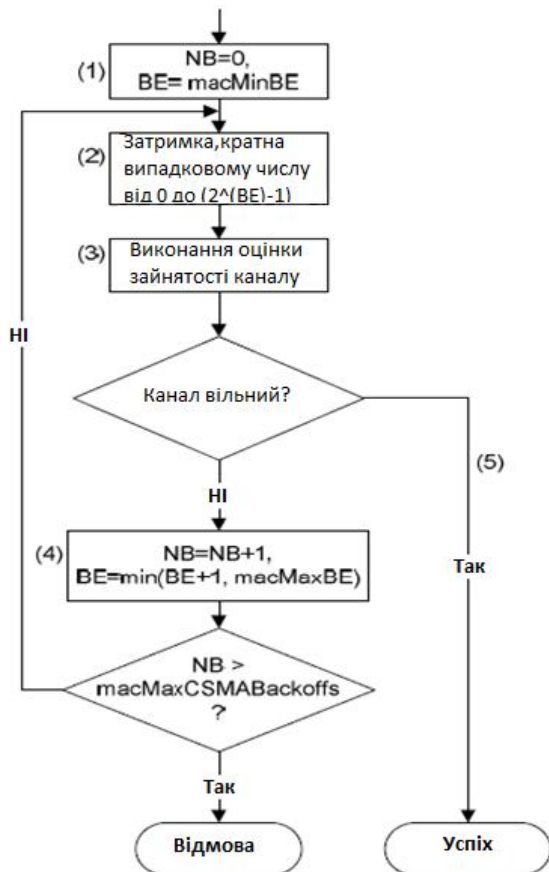


Рис. 3. Процедура множинного доступу CSMA-CA згідно IEEE 802.15.4[4]

Рис. 4. Ланцюг Маркова, що ілюструє вплив CSMA-CA на процес передачі пакету

Потім, для даного CCA_i , згідно з випадковою функцією, X_i є випадковою функцією стандартного рівномірного розподілу з параметром $b = 2^{\text{BE}_i} - 1$. Тому: $E(X_i) = (2^{\text{BE}_i} - 1) / 2$.

Тривалість CCA розрахована цим способом матиме наступні результатами:

$$\begin{aligned} \text{symbolsCCA1} &= 78 \text{ symbols,} \\ \text{symbolsCCA2} &= 158 \text{ symbols,} \end{aligned}$$

symbolsCCA3 = 318 symbols,
symbolsCCA4 = 318 symbols.

Символьний час, необхідний для проходження алгоритму CSMA-CA і у свою чергу здійснення спроби передати один пакет, може бути обчислений з урахуванням заданої ймовірності $P_{inactive}$, що канал буде неактивним для даної операції ССА і символьного часу symbolsTX-Phase2, за який необхідно завершити ті кроки передачі, що залишились: TX Packet, ACKTurnaround, TX ACK та IFS. Тому середній час для завершення однієї ітерації невідомого результату процесу передачі може бути розрахований як:

$$\text{symbols}_{iteration} = \text{CCA}_1 + (1 - P_{inactive}) * (\text{CCA}_2 + (1 - P_{inactive}) * (\text{CCA}_3 + (1 - P_{inactive}) * \text{CCA}_4)) + \text{symbols}_{TX-Phase2} * P_{access_granted}.$$

Число ітерацій, необхідне для результату 'accessgranted' (успіх гарантовано) моделюється як число випробувань Бернуллі, необхідних для отримання результату 'success' (успіх), яке являється геометричним розподілом. Bazуючись на властивостях геометричного розподілу, очікуване число ітерацій, необхідне для отримання доступу до каналу:

$$P_{access_failure} = (1 - P_{inactive})^4$$

$$P_{access_granted} = 1 - P_{access_failure} = 1 - (1 - P_{inactive})^4 = 1 - (0.1)^4 = 0.9999$$

$$E(iteration_count) = 1 / P_{access_granted}.$$

Тепер визначимо середній час, необхідний для успішної передачі одного пакету:

$$\text{symbols}_{transmit} = \text{symbols}_{iteration} * E(iteration_count) = \text{symbols}_{iteration} / P_{access_granted} = (\text{CCA}_1 + (1 - P_{inactive}) * (\text{CCA}_2 + (1 - P_{inactive}) * (\text{CCA}_3 + (1 - P_{inactive}) * \text{CCA}_4))) / P_{access_granted} + \text{symbols}_{TX-Phase2} = \text{symbols}_{CSMA-CA} + \text{symbols}_{TX-Phase2}.$$

Для $P_{inactive} = 0.9$ матимемо $\text{symbols}_{CSMA-CA} = (78 + (0.1) * (158 + (0.1) * (318 + (0.1) * 318))) / 0.9999 = 97.31 \text{ symbols}.$

Фаза передачі 2 (TX Packet). Друга фаза передачі пакету виконується, якщо процедура CSMA-CA надає доступ до каналу. Час для здійснення цієї фази залежить лише залежно від розміру пакету. Найбільший розмір пакету, дозволений 802.15.4, матиме найбільше відношення пропускну здатність/службова інформація, отже вважатимемо, що кожен пакет даних

міститиме 101 байт інформації додатку плюс 32 байти службової інформації (133 байти). Повний час, необхідний для виконання фази 2, є сумою компонентів:

$$\text{symbolsTX-Phase2} = \text{symbolstx} + \text{symbolsturnaround} + \text{symbolstx-ACK} + \text{symbolsIFS}.$$

1) *Час передачі (TX Data)*. Фізичний шар передає пакети після збирання їх у PPDU-структуру. Отже, фізичний шар додає 6 додаткових октетів до 133 октетів для передачі. Дійсний символний час, необхідний для передачі:

$$\begin{aligned} \text{lengthPPDU} &= 133 \text{ bytes, } \text{lengthsymbol} = 4 \text{ (bits/symbol),} \\ \text{symbolstx} &= \text{lengthPPDU (bytes)} * 8 \text{ (bits/byte)} / \\ \text{lengthsymbol (bits/symbol)} &= 133 * 8 / 4 = 266 \text{ symbols.} \end{aligned}$$

2) *Час обороту (ACK Turnaround)*. Після того, як останній октет пакету отриманий на приймальній стороні, IEEE 802.15.4 визначає, що вузол потребує не більше ніж $a\text{TurnaroundTime}$ для переключення пристрою з прийому на передачу, щоб передати підтвердження. Отже, на практиці: $\text{symbolsturnaround} = a\text{TurnaroundTime} = 12 \text{ symbols}$.

3) *Час передачі підтвердження (TX ACK)*. Час передачі кадру підтвердження вираховується так само, як і два кроки назад для інформаційного кадру. Єдина різниця процедури є скорочення lengthPPDU до 11 байт згідно зі стандартом: формат кадру підтвердження складається з 5 байт MAC-заголовку і 6 байт PHY-заголовку. Отже, $\text{symbolstx-ACK} = 11 * 8 / 4 = 22 \text{ symbols}$.

4) *Часовий проміжок між кадрами (LIFS)*. Так, як MAC-підшару необхідне обмеження часу для закінчення прийому пакету, стандарт IEEE 802.15.4 визначає період часового проміжку між кадрами (IFS), що слідує після передачі кадру. IFS може приймати мінімальне значення, визначене одною з двох констант, $a\text{MinLIFSPeriod}$ чи $a\text{MinSIFSPeriod}$. Для розглядуваного сценарію, $\text{symbolsIFS} = a\text{MinLIFSPeriod} = 40 \text{ symbols}$.

Загальний час передачі. Зважаючи на виконані розрахунки, середній час, необхідний для передачі одиничного пакету в слабо навантаженій мережі ($P_{\text{inactive}} = 0.9$), легко вираховується $\text{symbolssum} = 437.31 \text{ symbols} = 7 \text{ мс}$. Нарешті пропускна здатність вираховується знаючи середню кількість переданих пакетів за секунду: $\text{packetssec} = \text{ratesymbol} / \text{symbolssum} = 62,500 / 437.31 = 142.92 \text{ (packets/s)}$, $\text{throughputkbps} = \text{AppPayload (bytes/packet)}$

$$\begin{aligned} & * 8 \text{ (bits/byte)} * \text{packetssec (packets/s)} = 101 * 8 * 142.92 \\ & = 115.5 \text{ kbps.} \end{aligned}$$

Запропонована методика оцінки пропускної здатності може бути виконана для будь-якого рівня каналної активності, як зображено на рис.5, де показано крива, що демонструє зниження максимальної пропускної здатності зі збільшенням каналної активності. У подальших роботах планується оцінититочність таких прогнозів за допомогою симуляції вOPNETModeler та практичної оцінки на обладнанні Arduino/XBee.

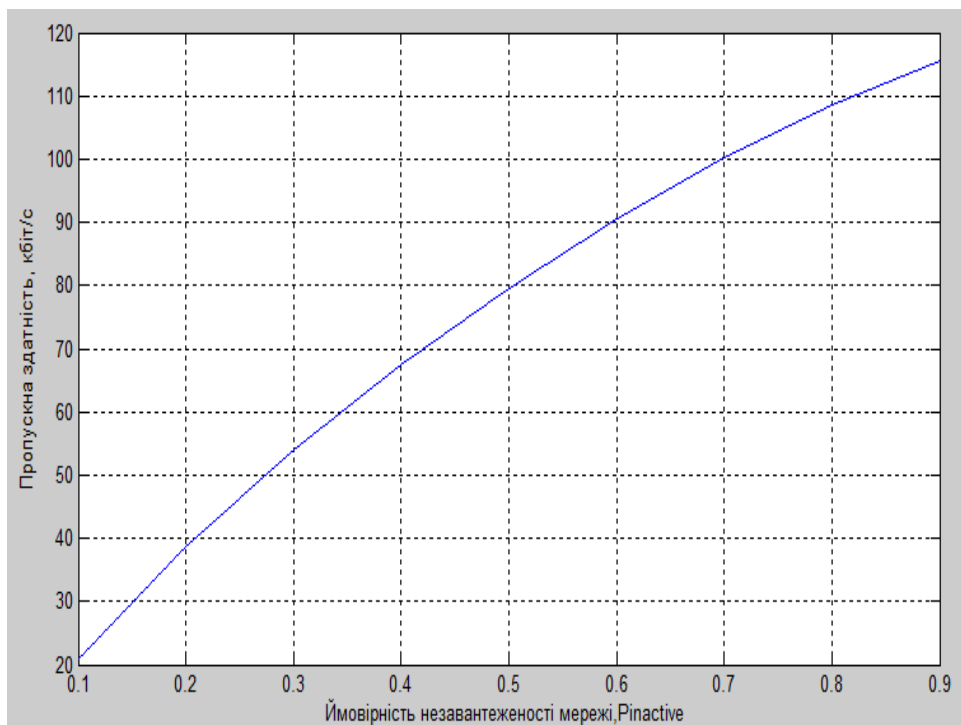


Рис. 5. Залежність пропускної здатності БСМ ZigBee від активності каналу

Висновки. В роботі розроблено методику оцінки верхньої межі пропускної здатності безпроводових сенсорних мереж ZigBee. Максимальна пропускна здатність для передачі з одним хопом у слабо навантаженій мережі без маяків приблизно дорівнює 115,5 кбіт/с. Ця величина включає дозволи для службової інформації, створеної заголовками пакетів ZigBee. Таким чином це є належна оцінка верхньої межі пропускної здатності у безпроводових мережах ZigBee. У подальших роботах планується розробити методи налаштування реального обладнання на основі Arduino/XBee для максимального наближення до даної границі пропускної здатності. Пропускна здатність може бути ще підвищена за рахунок модернізації протоколів множинного доступу та маршрутизації.

Використані джерела інформації:

1. ZigBeeAllianceDocument 053474r06: ZigBeeSpecification, December 2004.
2. Наземнов В.В. Оцінка реальних значень параметрів безпроводових сенсорних мереж ZIGBEE / В.В. Наземнов, С.В. Валуйський // Проблеми телекомунікацій : 7-а Міжнар. наук.-техн. конф., 16-19 квіт. 2013р. : матеріали конф. – К., 2013. – С. 245–247.
3. InstituteofElectricalandElectronicsEngineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2003, IEEE Standard forInformationTechnology — TelecommunicationsandInformation Exchange betweenSystems — LocalandMetropolitanAreaNetworks — SpecificRequirements — Part 15.4: WirelessMedium Access Control (MAC) andPhysicalLayer (PHY) SpecificationsforLowRateWirelessPersonalAreaNetworks (WPANs). NewYork: IEEE Press. 2003.
4. InstituteofElectricalandElectronicsEngineers, Inc., IEEE Std. 802.15.4-2006, IEEE Standard forInformationTechnology — TelecommunicationsandInformation Exchange betweenSystems — LocalandMetropolitanAreaNetworks — SpecificRequirements — Part 15.4: WirelessMedium Access Control (MAC) andPhysicalLayer (PHY) SpecificationsforLowRateWirelessPersonalAreaNetworks (WPANs). NewYork: IEEE Press. 2006.