

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2022-49-14>

УДК 621.391.8

Радзівілов Григорій Данилович, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-6047-1897>

Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв Крут, м. Київ, Україна

## АНАЛІЗ ДОСТОВІРНОСТІ ПРИЙОМУ ПОВІДОМЛЕНЬ В ІОТ ТЕХНОЛОГІЯХ З ОДНОСТОРОННІМИ ПРОТОКОЛАМИ ВЗАЄМОДІЇ

**Радзівілов Г.Д.** Аналіз достовірності прийому повідомлень в ІоТ технологіях з односторонніми протоколами взаємодії. Проведено аналіз достовірності прийому інформації в ІоТ технологіях з односторонніми протоколами взаємодії. Встановлено закономірності впливу завадової обстановки на значення ймовірності правильного прийому повідомлень з урахуванням можливих хибних спрацювань та застосованих методів підвищення достовірності прийому. Розглянуто можливість виникнення хибних спрацювань. Визначено напрямки досліджень для забезпечення використання ІоТ технологій з односторонніми протоколами взаємодії при проведенні сучасних бойових дій в умовах складної завадової обстановки та впливу структурних завад.

**Ключові слова:** ІоТ технології з односторонніми протоколами взаємодії, достовірність прийому повідомлень, ймовірність правильного прийому повідомлень, ймовірність хибного спрацювання.

**Radzivilov H.** The reliability analysis of receiving messages in IoT technologies with one-way interaction protocols. An analysis of information receiving reliability in IoT technologies with one-way interaction protocols was carried out. The influence regularities of the interference environment on the value of messages reception correct probability have been established. The possibility of false detecting and the applied methods of increasing the message reception reliability are taken into account. Research directions to ensure the possibility of using IoT technologies with one-way interaction protocols during the conduct of modern combat operations have been determined. It was made for difficult interference environment and the influence of structural interference.

**Keywords:** IoT technologies with one-way interaction protocols, reliability of message reception, probability of correct message reception, probability of false detecting.

**Постановка наукового завдання.** При проведенні сучасних бойових дій все частіше знаходять застосування технології, які отримали назву "Інтернет речей" (Internet of Things). Сенсори і керовані механізми, що використовуються на полі бою (Internet of Battlefield Things – ІоВТ) стають невід'ємною складовою сучасних військових операцій [1, 2]. Для покращення електромагнітної сумісності різних засобів, зменшення енергоспоживання, масо габаритних показників, затрат на розгортання та експлуатацію обладнання окреме місце у вказаних системах знаходить одностороння радіопередача [3, 4]. Необхідна умова використання односторонніх режимів роботи – забезпечення заданих та взаємопов'язаних показників достовірності доведення інформації, а саме – ймовірності правильного прийому повідомлення ( $P_n$ ) та ймовірності прийому хибного повідомлення  $P_x$  (хибного спрацювання), що зумовлене впливом структурних завад коли корисний сигнал в каналі – відсутній [5]. У зв'язку з цим, важливим завданням є здійснення аналізу достовірності прийому повідомлень за критерієм максимуму значення ймовірності правильного прийому при заданих вимогах до ймовірності хибного спрацювання в існуючих ІоТ технологіях з односторонніми протоколами взаємодії.

**Аналіз досліджень.** За результатами аналізу досліджень за обраним напрямком можна зробити висновок, що більшість публікацій присвячені розгляду особливостей функціонування ІоТ технологій з односторонніми протоколами взаємодії. В них вказані методи, що застосовуються для підвищення достовірності прийому інформації, серед яких – застосування корегуючих кодів з виправленням помилок, повторів передачі, як на одній частоті, так і на наборові частот [3, 4, 6, 7]. Однак недостатньо дослідженням залишається напрямком, що пов'язаний з оцінкою достовірності прийому повідомлень за критерієм максимуму значення  $P_n$  в доволі складній завадовій обстановці, з урахуванням вказаних вище методів підвищення достовірності та впливу структурних завад.

**Метою статті** є здійснення аналізу достовірності прийому повідомлень в ІоТ технологіях з односторонніми протоколами взаємодії для визначення перспектив їх використання при проведенні сучасних бойових дій в умовах доволі складної завадової обстановки та впливу структурних завад.

**Виклад основного матеріалу.** В якості прикладів систем з односторонньою радіопередачею розглянуто технології Internet of Things (ІоТ) з односторонніми протоколами взаємодії (технологія Sigfox та Weightless-N).

Технологія Sigfox [4] підтримує як односторонню, так і двосторонню радіопередачу. Для підвищення достовірності прийому кадрів використовуються повтори передачі на різних частотах. Передача першої копії кадру висхідною лінією здійснюється випадково вибраним частотним каналом, а після цього передається дві наступні копії через різні інтервали часу, використовуючи інші частотні канали. Завадостійкі коди з виправленням помилок не застосовуються [7].

Визначений в технології Sigfox формат кадру для висхідної лінії показано на рисунку 1 [4].

19	29	32	0-96	16-40	16
Preamble	Frame Synch and Header	Device ID	Payload	Msg Auth Code	FCS

Рисунок 1. Формати кадрів Sigfox у висхідній лінії

Всі розміри поля кадру вказані в бітах. Третє поле після заголовка кадру є ідентифікатор пристрою (ID пристрою). Передостаннє поле кадру – це код автентифікації повідомлення (Msg Auth Code), останнє поле – контрольна послідовність, що призначена для виявлення помилок в кадрі (FCS).

Технологія Weightless-N [3, 8] повністю базується на односторонній радіопередачі висхідною лінією. Всі пристрої відправляють повідомлення на центральну базову станцію без синхронізації та підтвердження. Виділений діапазон частот розподілений на шість широких смуг (таблиця 1). Кожна смуга призначена для окремої базової станції. Кінцеві пристрої працюють в вузькій смузі частот 200 Гц (мікроканал).

Таблиця 1. Смуги частот технології Weightless-N

Band №	Lower Band (MHz)	Upper Band (MHz)	Bandwidth (MHz)	Number of Channels
1	863	864.998	1.998	9990
2	865	868	3	15000
3	868	868.6	0.6	3000
4	868.7	869.2	0.5	2499
5	869.4	869.64	0.24	1200
6	869.7	870	0.3	1500

Окрім того, кожна широкосмугова мережа ділиться на три під смуги (макроканали), кожен з яких містить декілька мікроканалів. Наприклад, кожен макроканал в діапазоні 0.6 МГц містить 1000 каналів.

Щоб підвищити ймовірність правильного прийому повідомлення, кожен термінал відправляє три ідентичні копії кожного повідомлення різними макро та мікро каналами, використовуючи режим стрибкоподібного переналаштування частоти. Загальна кількість копій може бути збільшена до 8-ми.

В технології Weightless-N кожне повідомлення складається з семи блоків (рисунок 2) [8]: преамбули (Preamble), ідентифікаційного номера вузла (Identification number - ID), блоку "Data length", де вказується розрядність блоку Payload (корисне навантаження), мітки часу (Time stamp), код автентифікації повідомлення (Message Authentication Code – MAC ) та FCS (Frame-Check Sequence) – кодова послідовність для виявлення помилок.

Preamble	ID	Data length	Time stamp	Payload	MAC	FCS
3 bytes	6 bytes	5 bits	19 bits	0 – 20 bytes	24 bits	16 bits

Рисунок 2. Повідомлення в технології Weightless-N

Базова станція перевіряє FCS і в тому випадку коли виникає помилка повідомлення ігнорується. В іншому випадку базова станція перевіряє відмітку часу (Time stamp), яка є лічильником хвилин у внутрішньому таймері терміналу. Передбачено, що повідомлення з однаковою відміткою часу є копіями одного і того ж повідомлення. В системі використовується згортковий код, що дозволяє виправляти помилки [6].

Оцінка достовірності прийому інформації в IoT технологіях з односторонніми протоколами взаємодії здійснюється шляхом розрахунку значення ймовірності правильного прийому повідомлення та ймовірності хибного спрацювання в продовж усього часу роботи системи. Для здійснення розрахунків ймовірнісних характеристик достовірності застосовані наступні аналітичні співвідношення. Ймовірність правильного прийому повідомлення з першої спроби описується виразом [5]:

$$P_{n1} = \sum_{i=0}^N C_N^i \cdot p_{\text{бит}}^i (1 - p_{\text{бит}})^{N-i}, \quad (1)$$

де  $N$  – загальна довжина повідомлення,  $p_{\text{бит}}$  – ймовірність помилки на біт.

Для визначення достовірності прийому повідомлень при використанні багатократної передачі ймовірність правильного прийому повідомлення хоча б один раз за  $R$  спроб записується наступним чином [5]:

$$P_{nR} = \sum_{i=1}^R C_R^i \cdot P_{n1}^i (1 - P_{n1})^{R-i}. \quad (2)$$

Для розрахунку ймовірності правильного прийому повідомлення хоча б на одній придатній частоті хоча б один раз за умови, що ймовірність придатності кожної з частот – однакова визначається наступним співвідношенням [5]:

$$P_n = \sum_{i=1}^F C_F^i \cdot P_{nR}^i (1 - P_{nR})^{F-i}, \quad (3)$$

де  $F$  – загальна кількість частот для передачі повідомлення.

Виходячи з умов функціонування систем радіозв'язку різного призначення, варто враховувати, що в процесі очікування повідомлення може виникнути ситуація, коли канал відсутній, а через вплив завади, яка складається з послідовності статистично незалежних рівноймовірних символів приймається якесь хибне повідомлення. У цьому випадку  $p_{\text{бит}} = 0,5$  [5].

Тоді ймовірність хибного прийому повідомлення з першої спроби при впливові структурних завод різного походження задається наступним співвідношенням [5]:

$$P_{x1} = \sum_{i=0}^N C_N^i \cdot (p_{\text{бит}})^i (1 - p_{\text{бит}})^{N-i} = 2^{-N} \sum_{n=0}^N C_N^i \quad (4)$$

Відомо, що коли, наприклад, час роботи системи радіозв'язку в режимі радіомовчання дорівнює  $\Delta T$ , то атакуючій стороні досить нескладно підібрати таке значення розрядності регістра зсуву  $n$  (розрядність регістра для формування послідовності максимальної довжини), за допомогою якого можна буде сформувати імітуючу послідовність загальної довжини  $L = 2^n - 1$ , що не повторюватиметься за структурою впродовж часу  $\Delta T$  на довжині  $n$  при будь-якому місці його розташування [5]. Ймовірність прийому хибного повідомлення хоча б один раз за час  $\Delta T$ , при швидкості передачі  $V$  розраховується за наступним аналітичним виразом [5]:

$$P_{xL} = \left( \sum_{i=1}^{L-N+1} C_{L-N+1}^i \cdot P_{x1}^i (1 - P_{x1})^{L-N+1-i} \right), \quad (5)$$

де  $L = \Delta T \cdot V$ .

Ймовірність того, що хибне спрацювання відбудеться хоча б на одній з частот описується формулою [5]:

$$P_x = \sum_{i=1}^F C_F^i \cdot P_{xL}^i (1 - P_{xL})^{F-i}. \quad (6)$$

Оцінка достовірності прийому повідомлень здійснювалась за наступними вихідними даними.  
 Вихідні дані.

1. Час роботи системи  $\Delta T = 7$  діб.

2. Вимоги по ймовірності правильного прийому повідомлень. Вимоги до ймовірності правильного прийому повідомлення в IoT системах розраховуються відповідно до вимог QoS по максимально допустимому значенні ймовірності помилки на символ, яка при передачі повідомлень C2 (Command & control messages containing critical operational) має бути не більша ніж  $10^{-3}$  [9]. Максимальна довжина повідомлення в Weightless-N системах становить 280 двійкових символів (рисунок 2) [8], а в системі SigFox – 216 (рисунок 1) [4]. Для підвищення достовірності прийому повідомлень в обох випадках здійснюється трикратна передача на різних частотах. Здійснивши елементарні розрахунки можна визначити, що мінімально допустима ймовірність правильного прийому повідомлення в таких системах становить –  $P_{\text{п}} \geq 0.99$ .

3. Вид модуляції та завадостійкого кодування. В технологіях SigFox (у висхідній лінії) та Weightless-N використовується відносно фазова модуляція (Differential Binary Phase-Shift Keying). Застосовуються завадостійкі коди з виявленням помилок [4, 8]. В Weightless-N є можливість використання коду з виправленням помилок [6]. Вказані параметри враховано при розрахунках значення  $p_{\text{вн}}$ .

4. Швидкість передачі в радіоканалі та максимально допустимий час на передачу повідомлень. Швидкість передачі в радіоканалі (в країнах Європи) становить 100 біт/с [4, 8].

5. Вимоги по ймовірності хибного прийому повідомлень.

Вимоги до ймовірності хибного прийому повідомлень розраховуються виходячи з того, що за час роботи системи  $\Delta T$  не повинно виникати хибних спрацювань [10]. Іншими словами – середній час між двома хибними спрацюваннями  $T_c$  має не перевищувати значення  $\Delta T$   $T_c \leq \Delta T$ . Зв'язок між ймовірністю хибного спрацювання і  $T_c$  є наступним [10]. При відсутності сигналу ймовірність помилкового прийому символу  $p_c = 0.5$ , тоді при швидкості передачі  $V$  біт/с заповнення регістра зсуву в приймачеві буде відбуватись  $0.5 \cdot V$  раз за секунду. Після кожного наступного заповнення хибне спрацювання можливе з ймовірністю –  $P_x$ . Тоді за одну секунду може бути здійснено  $\beta$  хибних заповнень регістру, де  $\beta = 0.5 \cdot V \cdot P_x$ . Розглядаючи ці події, як рідкісні, можна скористатись розподілом Пуассона з параметром  $\beta$ . Тоді величина, зворотна  $\beta$ , буде визначати середній час між двома хибними спрацюваннями  $T_c = 2/V \cdot P_x$ . Вимоги до ймовірності хибного спрацювання можна записати наступним чином [10]:

$$P_x \leq \frac{2}{V \cdot \Delta T}, \quad (7)$$

В таблиці 2 наведено вимоги до ймовірності хибного спрацювання при різному часі роботи системи та швидкості передачі 100 біт/с.

Таблиця 2. Гранично допустимі значення ймовірності хибного спрацювання

Час $\Delta T$	Вимоги до ймовірності хибного спрацювання ( $P_x$ ), при швидкості передачі 100 біт/с.
1 година	$5.56 \cdot 10^{-6}$
1 доба	$2.3 \cdot 10^{-7}$
1 тиждень	$3.3 \cdot 10^{-8}$
1 місяць	$7.7 \cdot 10^{-9}$

7. Максимально допустима кількість частот для передачі повідомлень в технології Weightless-N,  $F^* = 8$  [8], в технології SigFox  $F^* = 3$  [4].

Для проведення досліджень було використано аналітичні вирази (1 – 6). За допомогою яких здійснено розрахунки достовірності прийому повідомлень для наведених вище вихідних даних. В результаті розрахунків встановлено, що значення ймовірності хибного спрацювання при будь-якому часі очікування повідомлень для систем, що аналізуються є значно меншою ніж та яка наведена в

таблиці 2. На рисунку 3 представлено залежність приросту значення ймовірності правильного прийому повідомлення від завадової обстановки (значення  $P_{\text{бит}}$ ) при трикратній передачі.

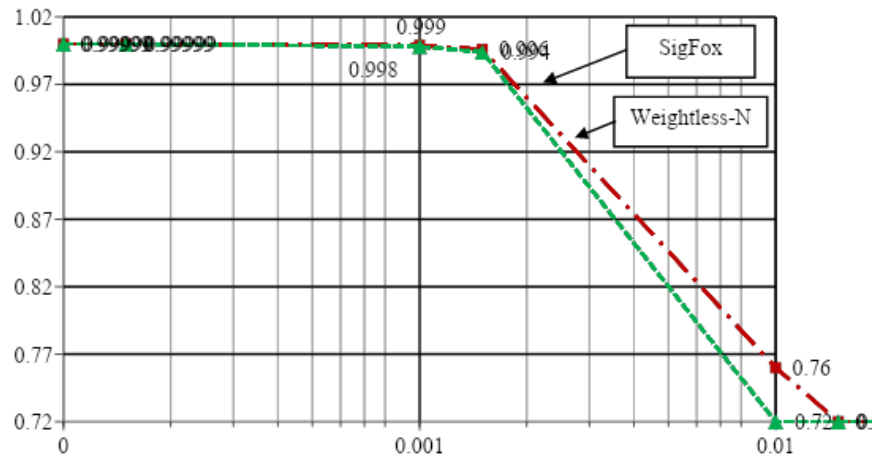


Рисунок 3. Залежність приросту значення  $P_n$  від значення  $p_{\text{бит}}$  при трикратній передачі

На рисунку 4 наведено залежність приросту значення ймовірності правильного прийому повідомлення від значення  $p_{\text{бит}}$  при використанні технології Weightless-N в якій передбачена можливість восьмикратної передачі.

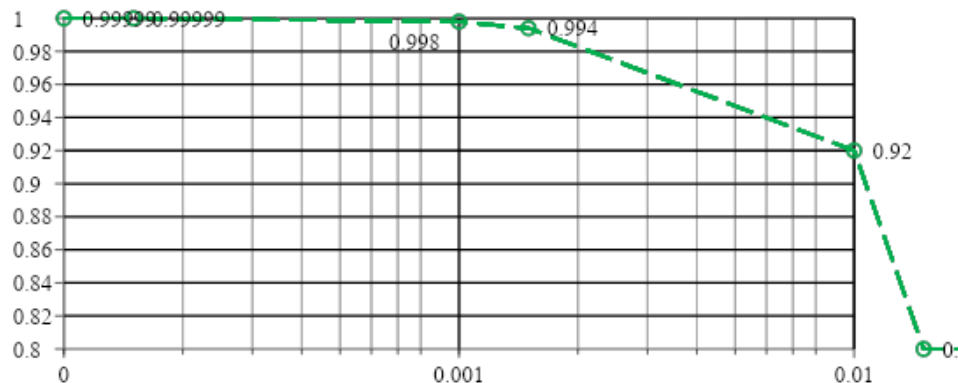


Рисунок 4. Залежність приросту значення  $P_n$  від значення  $p_{\text{бит}}$  при восьмикратній передачі повідомлень в технології Weightless-N

Аналіз отриманих результатів свідчить про наступне:

– при трикратній передачі та відношенні сигнал-шум в каналі такому, що  $P_{\text{бит}}$  знаходиться в межах від  $1.5 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-2}$  ймовірність правильного прийому повідомлень при застосуванні технології SigFox знаходиться в межах від 0,99 до 0,76, технології Weightless-N – від 0,99 до 0,72, ;

– при восьмикратній передачі та відношенні сигнал-шум в каналі такому, що  $P_{\text{бит}}$  знаходиться в межах від  $1.5 \cdot 10^{-3}$  до  $10^{-2}$  ймовірність правильного прийому повідомлень при застосуванні технології Weightless-N знаходиться в межах від 0,99 до 0,92. При подальшому погіршенні завадової обстановки ймовірність правильного прийому повідомлень стрімко зменшується і при  $P_{\text{бит}} = 0,015$  становить 0,8.

**Висновки та перспективи подальшого дослідження.**

В результаті досліджень – встановлено, що в розглянутих IoT технологіях, коли ймовірність помилкового прийому символу повідомлення не перевищує  $10^{-2}$ , ймовірність правильного прийому повідомлень є не меншою ніж 0,99. При подальшому погіршенні завадової обстановки не

забезпечується прийом повідомлень з необхідною достовірністю. Ймовірність хибного спрацювання для розглянутих в роботі систем є значно меншою ніж максимально допустима навіть при тривалому часі роботи системи.

Таким чином існуюча структура повідомлень, застосовані методи прийому та обробки сигналів не дозволяють забезпечити задану достовірність прийому інформації в умовах складної заводської обстановки. Тому застосування технологій інтернету речей з односторонніми протоколами взаємодії при проведенні сучасних бойових дій, що супроводжуються великою насиченістю радіоефіру та застосуванням засобів радіоелектронної боротьби потребує розв'язання завдань із підвищення достовірності прийому інформації. У зв'язку з цим, напрямком подальших досліджень є розробка структури повідомлень, визначення способів прийому та обробки сигналів для підвищення достовірності прийому інформації в IoT технологіях з односторонніми протоколами взаємодії.

### Список бібліографічного опису

1. Russell S., Abdelzaher T. The Internet of Battlefield Things: The Next Generation of Command, Control, Communications and Intelligence (C3I) Decision-Making. *MILCOM 2018 – 2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, 29 – 31 Oct. 2018. Los Angeles, CA, USA. Los Angeles. 2018. P. 737 – 742. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8599853>.
2. Analyzing the Applicability of Internet of Things to the Battlefield Environment / N. Suri, M. Tortonesi, J. Michaelis, P. Budulas, G. Benincasa, S. Russell, C. Stefanelli, R. Winkler. *ICMCIS 2016: Conference Paper At Brussels, Belgium*, May 2016. DOI: 10.1109/ICMCIS.2016.7496574. URL: [https://www.researchgate.net/publication/303839381\\_Analyzing\\_the\\_Applicability\\_of\\_Internet\\_of\\_Things\\_to\\_the\\_Battlefield\\_Environment](https://www.researchgate.net/publication/303839381_Analyzing_the_Applicability_of_Internet_of_Things_to_the_Battlefield_Environment).
3. MAC Layer Protocols for Internet of Things. Luiz Oliveira, Joel J. P. C. Rodrigues, Sergei A. Kozlov, Ricardo A. L. Rabêlo, Victor Hugo C. de Albuquerque. *Journal Future Internet*. 2019. Vol. 11(1). P. 16. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330381472\\_MAC\\_Layer\\_Protocols\\_for\\_Internet\\_of\\_Things\\_A\\_Survey/fulltext/5c3d680992851c22a375d03d/MAC-Layer-Protocols-for-Internet-of-Things-A-Survey.pdf](https://www.researchgate.net/publication/330381472_MAC_Layer_Protocols_for_Internet_of_Things_A_Survey/fulltext/5c3d680992851c22a375d03d/MAC-Layer-Protocols-for-Internet-of-Things-A-Survey.pdf).
4. A Sigfox Energy Consumption Model. Carles Gomez, Juan Carlos Veras, Rafael Vidal, Lluís Casals. *Journal Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 681. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330947889\\_A\\_Sigfox\\_Energy\\_Consumption\\_Model/fulltext/5c5ced9d45851582c3d5a09e/A-Sigfox-Energy-Consumption-Model.pdf](https://www.researchgate.net/publication/330947889_A_Sigfox_Energy_Consumption_Model/fulltext/5c5ced9d45851582c3d5a09e/A-Sigfox-Energy-Consumption-Model.pdf).
5. Ерохин В. Ф. Методика расчета длины кодограммы для асимптотически надежной радиолинии управления / Ерохин В. Ф., Залужный О. В. // *Вісник Національного технічного університету України „КПІ”, серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування*. – 2013. – № 54. – С. 44 – 53.
6. Bembe, M., Abu-Mahfouz, A., Masonta, M. A survey on low-power wide area networks for IoT applications. *Telecommun Syst* 71, 249–274 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00557-9>.
7. B. Buurman, J. Kamruzzaman, G. Karmakar and S. Islam. Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges. in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 17179-17220, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968057.
8. Abbas R., Al-Sherbaz A., Bennecer A., Picton P. A new channel selection algorithm for the Weightless-N Frequency Hopping with lower collision probability. *8th International Network of the Future (NoF) Conference Proceedings*. London: IEEE (In Press). 2017. URL: <http://nectar.northampton.ac.uk/id/eprint/9777>.
9. Investigating communication architecture for tactical radio networks design / B. Suman, S.C. Sharma, M. Pant, S. Kumar. *International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences*. 2012. Vol. 2, Issue 2. P. 106 – 118. URL: <http://euroasiapub.org/wp-content/uploads/2016/10/11.pdf>.
10. Защищенные радиосистемы цифровой передачи информации / П.Н. Сердюков и др. Москва: АСТ, 2006. 403 с.

### References

1. Russell S., Abdelzaher T. The Internet of Battlefield Things: The Next Generation of Command, Control, Communications and Intelligence (C3I) Decision-Making. *MILCOM 2018 – 2018 IEEE Military Communications Conference (MILCOM)*, 29 – 31 Oct. 2018. Los Angeles, CA, USA. Los Angeles. 2018. P. 737 – 742. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8599853>.
2. Analyzing the Applicability of Internet of Things to the Battlefield Environment / N. Suri, M. Tortonesi, J. Michaelis, P. Budulas, G. Benincasa, S. Russell, C. Stefanelli, R. Winkler. *ICMCIS 2016: Conference Paper At Brussels, Belgium*, May 2016. DOI: 10.1109/ICMCIS.2016.7496574. URL: [https://www.researchgate.net/publication/303839381\\_Analyzing\\_the\\_Applicability\\_of\\_Internet\\_of\\_Things\\_to\\_the\\_Battlefield\\_Environment](https://www.researchgate.net/publication/303839381_Analyzing_the_Applicability_of_Internet_of_Things_to_the_Battlefield_Environment).
3. MAC Layer Protocols for Internet of Things. Luiz Oliveira, Joel J. P. C. Rodrigues, Sergei A. Kozlov, Ricardo A. L. Rabêlo, Victor Hugo C. de Albuquerque. *Journal Future Internet*. 2019. Vol. 11(1). P. 16. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330381472\\_MAC\\_Layer\\_Protocols\\_for\\_Internet\\_of\\_Things\\_A\\_Survey/fulltext/5c3d680992851c22a375d03d/MAC-Layer-Protocols-for-Internet-of-Things-A-Survey.pdf](https://www.researchgate.net/publication/330381472_MAC_Layer_Protocols_for_Internet_of_Things_A_Survey/fulltext/5c3d680992851c22a375d03d/MAC-Layer-Protocols-for-Internet-of-Things-A-Survey.pdf).
4. A Sigfox Energy Consumption Model. Carles Gomez, Juan Carlos Veras, Rafael Vidal, Lluís Casals. *Journal Sensors*. 2019. Vol. 19. P. 681. URL: [https://www.researchgate.net/publication/330947889\\_A\\_Sigfox\\_Energy\\_Consumption\\_Model/fulltext/5c5ced9d45851582c3d5a09e/A-Sigfox-Energy-Consumption-Model.pdf](https://www.researchgate.net/publication/330947889_A_Sigfox_Energy_Consumption_Model/fulltext/5c5ced9d45851582c3d5a09e/A-Sigfox-Energy-Consumption-Model.pdf).

5. Yerokhin V. F., Zaluzhnyi O. V. Calculating technique of the codegram length for asymptotically reliable radio lines of control / Yerokhin V. F., Zaluzhnyi O. V. // *Visnyk NTUU KPI Seriia - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. – 2013. - № 54. – P. 44 – 53.
6. Bembe, M., Abu-Mahfouz, A., Masonta, M. A survey on low-power wide area networks for IoT applications. *Telecommun Syst* 71, 249–274 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11235-019-00557-9>.
7. B. Buurman, J. Kamruzzaman, G. Karmakar and S. Islam. Low-Power Wide-Area Networks: Design Goals, Architecture, Suitability to Use Cases and Research Challenges. in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 17179-17220, 2020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2968057.
8. Abbas R., Al-Sherbaz A., Bennecer A., Picton P. A new channel selection algorithm for the Weightless-N Frequency Hopping with lower collision probability. *8th International Network of the Future (NoF) Conference Proceedings*. London: IEEE (In Press). 2017. URL: <http://nectar.northampton.ac.uk/id/eprint/9777>.
9. Investigating communication architecture for tactical radio networks design / B. Suman, S.C. Sharma, M. Pant, S. Kumar. *International Journal of Research in Engineering & Applied Sciences*. 2012. Vol. 2, Issue 2. P. 106 – 118. URL: <http://euroasiapub.org/wp-content/uploads/2016/10/11.pdf>.
10. Protected radio systems for digital transmission of information / P.N. Serdyukov et al. Moscow: AST, 2006. 403 p.