

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-21>

УДК 621.376.3

ШПАТАР Петро

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
<https://orcid.org/0000-0003-4088-1458>  
[p.shpatar@chnu.edu.ua](mailto:p.shpatar@chnu.edu.ua)

НІЧИЙ Богдан

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
<https://orcid.org/0009-0001-4855-2053>  
[b.nichyi@chnu.edu.ua](mailto:b.nichyi@chnu.edu.ua)

НІЧИЙ Сергій

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича  
<https://orcid.org/0000-0003-2662-9694>  
[s.nichyi@chnu.edu.ua](mailto:s.nichyi@chnu.edu.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ LORA В БЕЗПРОВІДНИХ МОНІТОРИНГОВИХ МЕРЕЖАХ

В даній роботі розглядається моделювання функціонування кінцевих пристроїв (end point) компонентів безпроводних моніторингових мереж, які можна використати для побудови мережі типу "точка-точка" або "зірка" із використанням технології фізичного рівня LoRa. Технологія LoRa володіє достатньо високими параметрами по дальності. Енергоефективність даної технології досягається за рахунок накладання обмеження кількості передачі даних протягом доби. В цьому випадку досягається довготривале автономне функціонування (не менше 5 років) кінцевих пристроїв при використанні малогабаритних джерел живлення. Мета моделювання – дослідити можливість функціонування передавачів LoRa на фізичному рівні для забезпечення роботи безпроводних моніторингових мереж з максимальною періодичністю 60 с, з тривалістю автономного функціонування в межах 2,5 - 3 роки при використанні малогабаритних джерел живлення.

Ключові слова: безпроводні сенсорні мережі, LoRa, автономне функціонування, RFM95/96/97/98(W).

SHPATAR Petro, NICHYI Bohdan, NICHYI Sergiy  
Chernivtsi National University named after Yuri Fedkovich

## STUDY OF ENERGY EFFICIENCY OF LORA TECHNOLOGIES IN WIRELESS MONITORING NETWORKS

This work considers the modeling of the functioning of end devices (end point) components of wireless monitoring networks, which can be used to build a "point-to-point" or "star" type network using LoRa physical layer technology. LoRa technology has sufficiently high range parameters. The energy efficiency of this technology is achieved by limiting the number of data transfers during the day. In this case, long-term autonomous functioning (declared up to 5 years) of end devices is achieved when using small-sized power sources. The purpose of the simulation is to investigate the possibility of functioning of LoRa transmitters at the physical level to ensure the operation of wireless monitoring networks with a maximum frequency of 60 s, with the duration of autonomous operation within 2,5 - 3 years when using small-sized power sources. The following parameters of the final transmitters were investigated: the transmitter output power range was 4–8 dBm; minimum battery life of at least 3 years (1095 days). The data field must contain the minimum information: the identifier of the end device, the parcel number, the type of device, the condition (status) of the device. That is, the minimum length of the data field should contain 4 bytes, which will allow receiving the minimum information from the end device of the monitoring network. Simulation results for packages with parameters that allow to obtain an autonomous operation time of at least 900 days and a package period of 30 seconds at a radio signal power of 4 and 8 dBm with a power source capacity of 3200 mAh. The paper proves that when designing a wireless network based on LoRa technology, it is necessary to coordinate the parameters of the spectrum width BW and the spectrum expansion factor SF to obtain satisfactory performance characteristics of the network. The simulation results were compared with the results on mock-ups using PIC18LF4520 microcontrollers and the RFM95W (REV 1.2) LoRa module based on the RF96 chip (Semtech SX1276 analogue). As the results of this work show, LoRa technology can be used to build wireless monitoring networks with much more frequent data transmissions for premises with transmitter output power of 2-8 dBm and short messages.

Keywords: wireless sensor networks, LoRa, autonomous operation, RFM95/96/97/98(W).

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Безпроводні моніторингові мережі призначені для використання збору даних, моніторингу стану фізичних об'єктів, навколишнього середовища та ін. Такий тип мереж відносять до безпроводних сенсорних мереж. Залежно від призначення та алгоритму роботи функціональна база таких мереж є різноманітною [1]. Побудова безпроводних сенсорних мереж із використанням радіопередачі даних по технології LoRa все більше знаходить застосування. Запатентований принцип модуляції дозволяє отримати досить пристойні (до 15 км) відстані передачі на відкритій місцевості. Технологія LoRa розроблялась із метою використання в безпроводних сенсорних мережах LoRaWAN із максимальною швидкістю 50 кбіт/с. Наразі використання протоколу LoRaWAN розповсюджене в системах: "розумне місто", автоматизації контролю енергетичних

систем, інтернет речей та ін. Дана мережа передбачає функціонування приймачів та передатчиків в протоколі LoRaWAN [2]. Перспективність розвитку даної технології зумовлюється також нарощуванням випуску мікросхем прийомо-передавачів LoRa. Зокрема на ринку присутній широкий вибір таких мікросхем та модулів, на основі яких можливо побудувати пристрої LoRa:

- WLR089U0 від MICROCHIP TECHNOLOGY [3];
- RFM95/96/97/98(W) від HOPE MICROELECTRONICS [4];
- SX1276/77/78/79 від SEMTECH CORPORATION [5].

Для створення енергоефективних безпроводних моніторингових мереж в приміщеннях використовуються мережі, побудовані на основі використання стандарту IEEE802.15.4 [6], яскравим прикладом якого є мережа на основі протоколу ZigBee. Існують пристрої, які володіють великою енергоефективністю, автономність роботи яких при потужності радіосигналу 4 dBm і періоді передачі 30 с доходить до 3-х років. Швидкість передачі в них дорівнює 250 кбіт/с, в діапазоні 2,4 ГГц. Наприклад, SoC CC2530, із вбудованими приймачами-передавачами, формують MAC рівень стандарту IEEE802.15.4 на апаратному рівні і це дає можливість створювати бюджетні моніторингові системи. Проте, з досвіду авторів, такі системи мають малий радіус дії (до 100-150 м). В приміщенні, де існують поглинаючі матеріали (стіни, меблі), даний радіус зменшується до 35 м. Щоб розширити дальність передачі даних від кінцевих пристроїв (end point) до точок доступу (Access Point) в таких мережах використовують технологію mesh-мереж, яка також має свої недоліки (складність налаштувань, а при збільшенні компонентів ускладнюється маршрутизація повідомлень). Для багатьох безпроводних моніторингових використовуються мережі типу "зірка" або деревоподібні мережі.

Технологія передачі LoRa дозволяє будувати мережі типу "зірка" без розгортання мережі LoRaWAN. В такому випадку використовується фізичний та MAC рівень системи OSI. Решта рівнів (транспортний, прикладний) розробляються розробниками системи, що дозволить розробити енергоефективні мережеві системи під конкретні параметри. Так при розробці автономних автоматизованих моніторингових систем необхідно враховувати наступні критичні моменти:

- 1) максимально дозволена потужність випромінювання згідно санітарних норм, крім цього даний фактор впливає на п.2.
- 2) мінімальний час автономного функціонування (для прикладу пожежні радіоканальні системи моніторингу повинні мати термін не менше 3 років [7]).
- 3) вимоги пунктів 1 і 2 визначають формфактор пристрою, на який значний вплив мають розміри автономних джерел живлення.

### АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Технологія LoRa - це метод модуляції з розширенням спектра, в якій дані кодується широкосмуговими ЛЧМ (Chirp Spread Spectrum) імпульсами з частотою, що збільшується (up-chirp), або зменшується (down-chirp) на деякому часовому інтервалі. Математично ЛЧМ сигнал подається у вигляді виразу:

$$x=A_0 \cos (\omega_0 t + \frac{\mu}{2} t^2), \text{ причому } \frac{T_{sym}}{2} \leq t < \frac{T_{sym}}{2} \quad (1)$$

де  $\omega_0=2\pi f_0$  – центральна частота радіосигналу;

$\mu=BW/T_{sym}$  – швидкість зміни частоти радіосигналу;

$T_{sym} = 2^{SF}/BW$  – тривалість радіосигналу;

$BW$  – ширина спектру радіосигналу, яка визначає нижню та верхню границю смуги робочих частот  $f_H=(f_0-BW/2) - f_B=(f_0+BW/2)$ ;

$SF$  – коефіцієнт розширення спектру (7 - 12), який визначає базу радіосигналу  $B = BW \cdot T_{sym} = 2^{SF}$ .

База радіосигналу визначає умови кодування байта даних [8], швидкість передачі символу.

Кількість символів в блоці даних фізичного рівня визначається наступним виразом [9]:

$$N_{sym} = 8 + \max(\text{ceil}(\frac{8PL-4SF+28+16CRC-20H}{4(SF-20DE)})(CR + 4), 0) \quad (2)$$

де,  $\text{max}(\text{ceil}...)$  – операція (функція) округлення до найбільшого додатного цілого;  $PL$  – довжина поля даних в байтах;  $SF$  - коефіцієнт розширення спектру;  $CRC$  – включення контрольної суми (два байта  $CRC$  можна включати в довжину поля даних - *payload*), якщо  $CRC=1$  поле контрольної суми включається в пакет;  $H$  – індикатор поля заголовку, якщо  $H=1$  поле заголовку в пакет не включається;  $DE$  – оптимізація передачі даних при малих значень швидкостей переді даних ( $T_{sym}>16$  мс), якщо  $DE = 0$  оптимізація виключена;  $CR$  – швидкість виправлення помилок ( $1 \div 4$ ), яка рекомендована до використання, коли в мережі передбачаються великі імпульсні завади .

Загальний формат пакету MAC рівня LoRa має вигляд на рис 1. Пакет включає поля преамбули, заголовка із контрольною сумою, самих даних та контрольної суми поля даних.

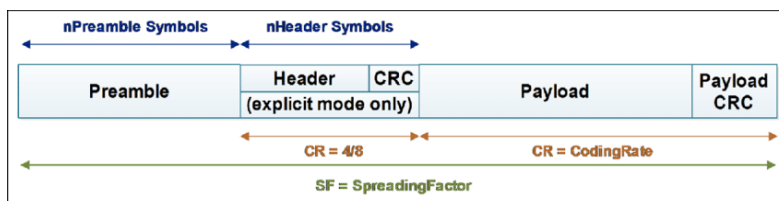


Рис. 1. Формат пакету MAC рівня LoRa

Енергетичні параметри фізичного рівня та наповненість пакету MAC рівня при передачі даних визначають наступні характеристики безпроводної системи:

- Завадостійкість передачі даних, що включає достовірність переданої інформації, яка передається, та кількість втрачених переданих пакетів.
- Витрати енергії на передачу пакету і, як наслідок, тривалість автономної роботи передавача.

Завдання різних параметрів для формул (1) і (2) приводить до різної структури пакету, який передається кінцевими пристроями (ED) до точок доступу (AP), наслідком чого є довжина пакету, час передачі, завадостійкість пакету, споживана енергоємність передачі. Цілий ряд наукових публікацій присвячений математичному моделюванню процесів передачі та функціонуванню пристроїв LoRa [10]. Моделювання та прикладні дослідження функціонування пристроїв LoRa висвітлюють можливості експлуатації в мережах LoRaWAN [11,12]. В таких роботах визначаються параметри для досягнення максимальної дальності ( $\geq 10$  -15 км) із досягненням максимальної енергоефективності [13].

### ФОРМУВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою дослідження є проведення математичного моделювання функціонування передавачів LoRa на MAC рівні мережі та визначити можливість отримання оптимальних енергетичних і часових параметрів, які забезпечують роботу безпроводної моніторингової мережі з періодичністю передачі даних один раз в 30 с, та тривалістю автономного функціонування в межах 2,5 - 3 роки, при використанні малогабаритних джерел живлення, наближених до типу CR123A (3В 1600 мА\*год).

### ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Нами пропонується розглянути результати досліджень по встановленню оптимальних енергетичних властивостей пристроїв, які передають дані за технологією LoRa, для побудови мережі типу “зірка”. Мета моделювання - вибрати оптимальні параметри фізичного рівня для технології LoRa для таких мереж, які за енергетичними характеристиками подібні до мереж з використанням IEEE802.15.4. Вихідними параметрами кінцевих передавачів є наступні вимоги: діапазон вихідної потужності передавача 4 –8 dBm; мінімальний час автономної роботи не менше 3 років (1095 днів). Поле даних повинно містити мінімальну інформацію: ідентифікатор кінцевого пристрою, номер посилки, тип пристрою, стан (статус) пристрою. Тобто мінімальна довжина поля даних повинна містити 4 байта, яка дасть змогу отримувати мінімальну інформацію від кінцевого пристрою моніторингової мережі. Так як передбачається, що пристрої працюють з наперед заданими параметрами, то поле заголовку (*Header*) ми виключили.

Для отримання енергетичних, часових характеристик нами використано формулу (2), та інші формули розрахунку параметрів передачі пакета згідно технічним паспортам на виробі (dataset) SX1276/77/78/79, і RFM95/96/97/98 (формули ідентичні) та програмний пакет “LoRaModemCalculatorTool”, від фірми “Semtech Corporation” для проектування мереж з використанням технології LoRa, на базі мікросхем SX1272/1273/1276/1277 [14].

Програмний пакет “LoRaModemCalculatorTool” дає змогу отримати теоретичну чутливість приймача при різних параметрах фізичного рівня пакета (рис. 2).

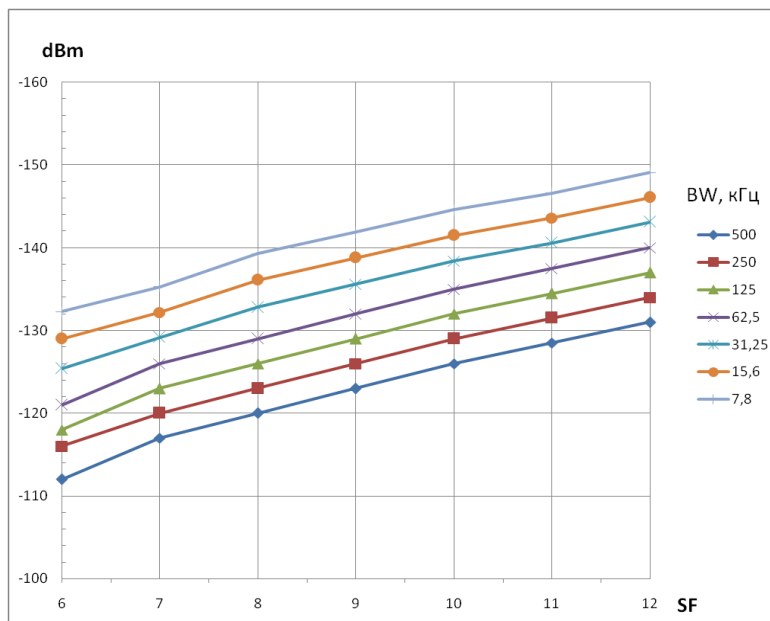


Рис 2. Залежність чутливості приймача LoRa від ширини спектру BW і коефіцієнта розширення спектру SF

Значення величини ширини спектру  $BW$  і коефіцієнта розширення спектру  $SF$  впливає не тільки на чутливість приймача (бюджет каналу), але й на швидкість передачі даних, відповідно, і на час радіоэфіру, що в сукупності визначає тривалість автономної роботи кінцевого пристрою.

Для розрахунку бітової швидкості використовується формула

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * \frac{4}{4+CR} \quad (3)$$

Використовуючи дані формули, отримуються значення, які наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1.

Залежність швидкості передачі бітів  $R_b$  (біт/сек) від  $BW$  і  $SF$

SF\BW	500 кГц	250 кГц	125 кГц	62,5 кГц	31,25 кГц	15,6 кГц	7,8 кГц
6	37500	18750	9375,00	4687,50	2343,75	1170,00	585,00
7	21875	10937,5	5468,75	2734,38	1367,19	682,50	341,25
8	12500	6250	3125,00	1562,50	781,25	390,00	195,00
9	7031,25	3515,63	1757,81	878,91	439,45	219,38	109,69
10	3906,25	1953,13	976,56	488,28	244,14	121,88	60,94
11	2148,44	1074,22	537,11	268,56	134,28	67,03	33,52
12	1171,88	585,94	292,97	146,49	73,24	36,56	18,28

При передачі даних за технологією LoRa краще враховувати тривалість передачі символу  $T_{sym}$  – час, протягом якого передається  $SF$  бітів даних. Крім того, слід враховувати кількість бітів, які включаються в пакет для корекції помилок. Тоді протягом  $T_{sym}$  передається  $SF * \frac{4}{4+CR}$  інформаційних бітів. В таблиці 2 наведені результати розрахунків тривалості передачі символу в залежності від значень параметрів  $BW$  і  $SF$ , які вираховуються за формулою

$$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (4)$$

Таблиця 2.

Залежність тривалість передачі символу  $T_{sym}$  (мкс) від  $BW$  і  $SF$

SF\BW	500 кГц	250 кГц	125 кГц	62,5 кГц	31,25 кГц	15,6 кГц	7,8 кГц
6	0,13	0,26	0,51	1,02	2,05	4,1	8,21
7	0,26	0,51	1,02	2,05	4,1	8,21	16,41
8	0,51	1,02	2,05	4,1	8,21	16,41	32,82
9	1,02	2,05	4,1	8,19	16,38	32,82	65,64
10	2,05	4,1	8,19	16,38	32,77	65,64	131,28
11	4,1	8,19	16,38	32,77	65,54	131,28	262,56
12	8,19	16,38	32,77	65,64	131,07	262,56	525,13

Графіки залежності швидкості передачі бітів  $R_b$  (біт/сек) і тривалості передачі символу  $T_{sym}$  (мкс) від  $BW$  і  $SF$  на основі таблиць 1 і 2, зображені на рис. 3.

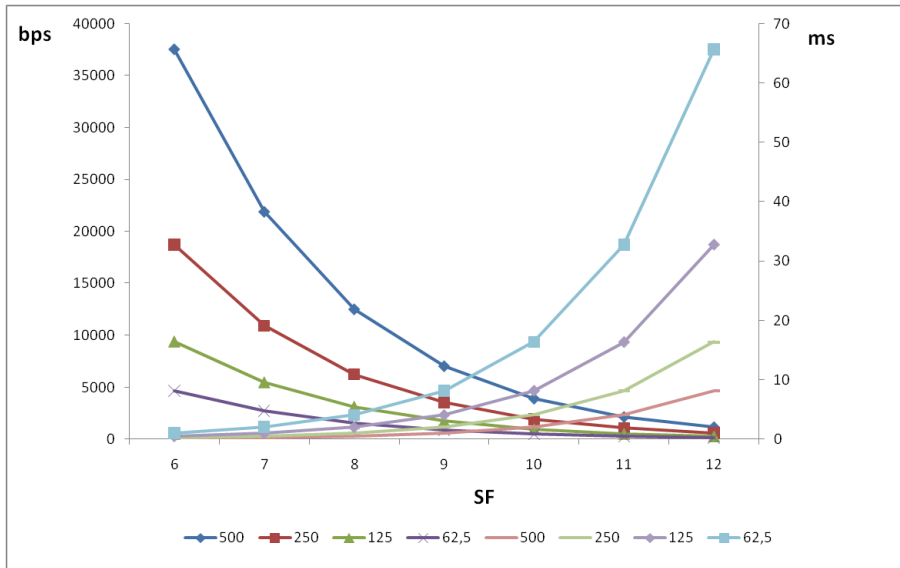


Рис. 3. Залежність швидкості передачі бітів  $R_b$  (біт/сек) і тривалості передачі символу  $T_{sym}$  (мкс) від  $BW$  і  $SF$

Аналіз графіків на рисунках 2 і 3 вказує, що при проектуванні безпроводної мережі на базі технології LoRa необхідно узгоджувати між собою параметри  $BW$  і  $SF$  для отримання задовільних характеристик роботи мережі. Збільшення параметра  $SF$  приводить до зростання порогу чутливості приймача та часу тривалості передачі символу і, відповідно, збільшення енергозатрат. В той же час зростання параметру  $BW$  приводить до зменшення порогу чутливості приймача та часу тривалості передачі символу. Підбираючи дані параметри, можна отримати необхідні енергетичні характеристики.

Біти даних за технологією LoRa передаються символами. В одному символі кодується  $SF$

бітів. Згідно формули (2), для передачі даних мінімальна кількість символів дорівнює 8. В таблиці 3 наведені результати розрахунків кількості символів, які необхідні для кодування байтів поля даних.

Таблиця 3.

Кількості символів, які необхідні для кодування байтів поля даних

SF/ Байт	CR = 1							CR = 4						
	6	7	8	9	10	11	12	6	7	8	9	10	11	12
4	13	13	13	13	8	8	8	16	16	16	16	8	8	8
5	13	13	13	13	13	13	8	16	16	16	16	16	16	8
6	18	13	13	13	13	13	13	24	16	16	16	16	16	16
7	18	18	13	13	13	13	13	24	24	16	16	16	16	16
8	18	18	18	13	13	13	13	24	24	24	16	16	16	16
9	23	18	18	18	13	13	13	32	24	24	24	16	16	16
10	23	23	18	18	18	13	13	32	32	24	24	24	16	16
11	23	23	18	18	18	18	13	32	32	24	24	24	24	16
12	28	23	23	18	18	18	18	40	32	32	24	24	24	24

З таблиць випливає, що кількість переданих символів є незмінною при зміні байтів в полі даних (горизонтальні стовбці). Значення величини  $CR$  суттєво впливає на значення кількості символів, необхідних для кодування поля даних (наведені дані для  $CR = 1$  та  $CR = 4$ ). На рис. 4. зображені графіки залежність кількості символів для поля даних, при значеннях  $SF = 8$  і  $SF = 10$  ( $CR=1$ ). Графіки побудовані для двох вибірок з метою кращої наглядності.

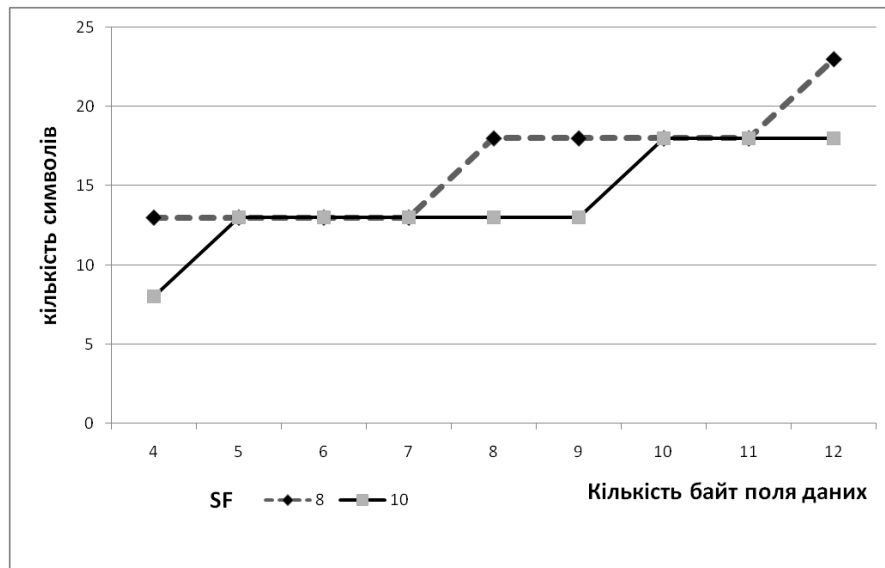


Рис. 4. Залежність кількості символів для поля даних при двох значеннях SF (CR=1)

Загальний час передачі пакету (рис. 1) визначається наступною формулою:

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload} \quad (5)$$

де

$$T_{payload} = N_{sym} T_{sym} \quad (6)$$

$$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4,25) T_{sym} \quad (7)$$

$n_{preamble}$  – кількість символів, які задаються програмно.

З аналізу графіків рис. 4 можна зробити висновок, що, якщо вибирати поле даних з 5 ÷ 9 байтів для SF =10, кращою енергоефективністю буде володіти пакет із 9 байтів. Проте слід зауважити, що  $T_{sym}$  має залежність від значень BW і SF. Програмний пакет “LoRaModemCalculatorTool” розраховує величини струму (таб. 4) під час передачі для відповідної вихідної потужності передавача.

Таблиця 4

**Залежність величина споживаного струму від потужності радіосигналу**

$P_{вих}$ передачі	$I_{ж}$ передачі
1 dBm	23 мА
2 dBm	24 мА
3 dBm	24 мА
4 dBm	24 мА
5 ÷ 8 dBm	25 мА

В таблицях 5 наведені основні результати моделювання для пакетів з параметрами, що дозволяють отримати автономний час функціонування не менше 900 діб та періодом посилок 30 сек при потужності радіосигналу 4 і 8 dBm. Ємність джерела живлення 3200 мА\*год. В таблицю не включені результати розрахунків для  $T_{sym} > 16$  мс. Це дає змогу виключити, відповідно до рекомендації виробників, оптимізацію передачі даних для малих значень швидкостей, що дозволяє зменшити кількість символів при передачі даних відповідно до формули (2). Дані в таблиці викладені для наступних параметрів: довжина преамбули дорівнює 8,25 (4+4,25) символів; довжина поля даних – 8 байт; байти контрольної суми виключені. Поле заголовку в пакет не включається; оптимізація передачі даних для малих значень швидкостей виключена; CR – швидкість виправлення помилок дорівнює 1 (4/5).

Присутність однакових результатів розрахунків при різних параметрах BW і SF є наслідком формули (2), яка вказує, що однаковою кількістю символів можна передати різну кількість бітів.

Результати моделювання порівнювались з результатами на макетах із використанням мікроконтролерів PIC18LF4520 і модуля LoRa RFM95W (REV 1.2) на базі мікросхеми RF96 (аналог Semtech SX1276), згідно схеми на рис. 5 з використанням радіопередаючого тракту з максимальною вихідною потужністю 14 dBm. Програмне забезпечення передавача та приймача створено на мові C. Алгоритм функціонування передбачав 8-ми байтну посилку в полі даних. Метою експериментальних вимірювань було встановлення кореляції розрахункових та реальних енергетичних параметрів макетного зразка.

Розрахункова кількість днів автономної роботи

BW	SF					
	Вихідна потужність 4 dBm					
	7	8	9	10	11	12
500	24253	12262	7606	3816	1911	956
250	12262	6165	3816	1911	956	
125	6165	3091	1911	958		
62,50	3091	1547	956			
	Вихідна потужність 8 dBm					
	7	8	9	10	11	12
500	23304	11777	7304	3664	1835	918
250	11777	5920	3664	1835	918	
125	5920	2968	1835	918		
62,50	2868	1486	918			

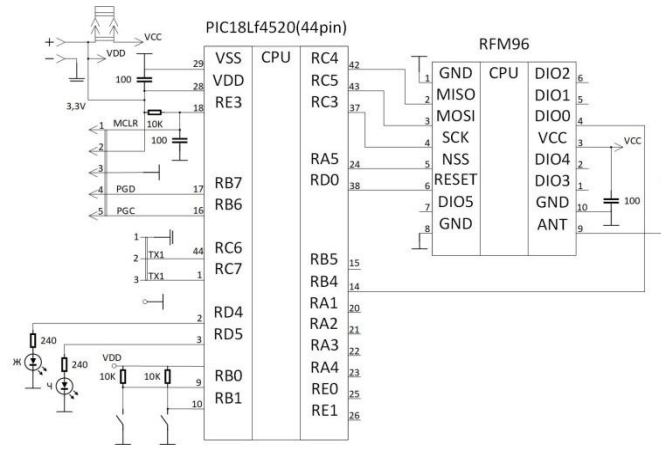


Рис.5. Принципова електрична схема пристрою

Передача 8-ми байтів в полі даних здійснювалась з наступними параметрами:  $BW = 125$ ,  $SF = 9$ , запрограмована вихідна потужність сигналу 4 dBm, напруга живлення 3 В. В цьому випадку, згідно з теоретичними розрахунками, бюджет каналу становить 133 dB,  $T_{sum}=4,1$  мс,  $T_{посилки}=87,04$  мс. Під час вимірювань модуль RFM95W між передачами пакетів був запрограмований в режим *Standby*. Струм споживання, в режимі *Sleep* визначали окремо. Вимірювання споживаного струму і часу передачі пакета проводилися за допомогою цифрового осцилографа SmartDS5932E. Осцилограма падіння напруги на резисторі ( $R=6,4$  Ом), включеного в коло живлення RFM95W, зображено на рис. 6 (скріншот екрана осцилографа).

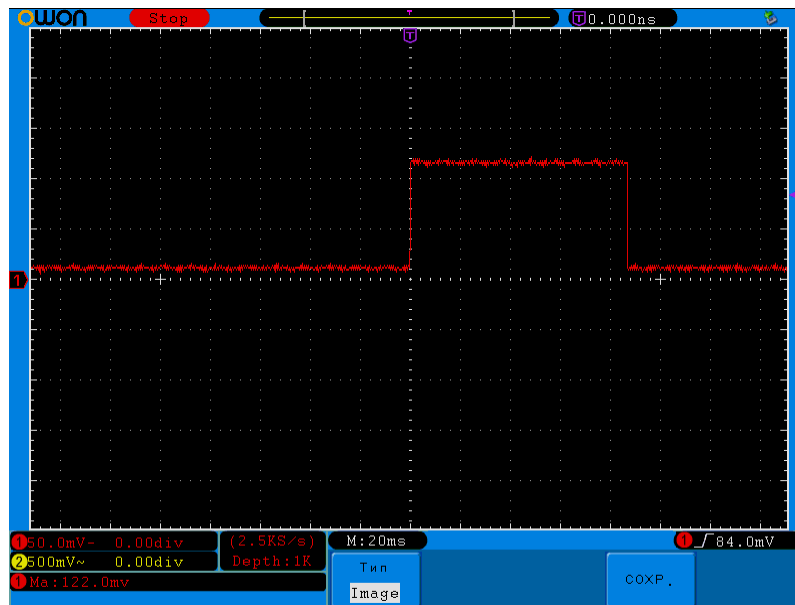


Рис. 6. Типова часова залежність напруги на резисторі в колі колектора.  
 $BW = 125$ ,  $SF = 9$ ,  $R=6,4$  Ом

З осцилограм розраховані значення струму споживання під час передачі ( $I=U/R=U/6,4$  Ом) і тривалість передачі пакету. В таблиці 6 представлені результати змодельованих та визначених з вимірювань параметрів роботи передавача RFM95W.

Таблиця 6

Порівняльна таблиця параметрів передавача

Параметр	Розрахунки "LoRaModemCalculatorTool"	Визначені з осцилограм
Струм режиму <i>Sleep</i>	100 нА	~ 200 нА (окреме вимірювання)
Струм режиму <i>Standby</i>	1,6 – 1,8 мА (для RF96W)	~ 2 мА
Струм режиму передачі	24 мА	~ 19 мА
Тривалість передачі	87,04 мс	~ 88 – 90 мс
Автономний час роботи	1911 день	1731 день

З результатів, наведених в таблиці 6, випливає, що є можливість використання технології LoRa для розгортання безпроводних сенсорних мереж із низьким енергоспоживанням. Як показали виміри передавач на висоті 1,5 м від підлоги, з налаштованими параметрами:  $BW = 125$ ,  $SF = 9$ , вихідна потужність сигналу 4 dBm, дає змогу отримати стабільний прийом в структурі "точка-точка", на відстані до 250 м в середині приміщення (кількість цегляних стін не менше 10, кімнати не порожні).

### ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В порівнянні із протоколом IEEE802.15.4, технологія LoRa має меншу швидкість передачі корисних даних і є більш енергозатратною. Проте, як показують результати даної роботи, технологія LoRa може використовуватись для побудови безпроводних моніторингових мереж із значно частішими передачами даних для приміщень із вихідною потужністю передавача 2 – 8 dBm та короткими повідомленнями. Важливо при проектуванні мережі знаходити оптимальні значення  $BW$  і  $SF$ . Зменшення  $BW$  приводить до збільшення часу радіопередачі, збільшення енергоспоживання, але збільшується чутливість приймача. При зменшенні  $SF$  зменшується час передачі, але й зменшується чутливість приймача. Дані в таблиці 5 вказують, що існує можливість обирати оптимальні значень  $BW$  і  $SF$  в залежності від умов експлуатації мережі без суттєвої втрати енергоефективності.

### Література

1. Степанов М. Зв'язок елементів сенсорної мережі системи моніторингу/ М. Степанов, В.Лаврінченко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2023. – №4. – С.199-206
2. LoRa Alliance Technical committee. LoRaWAN™ 1.0.2 Regional Parameters. Revision: B. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan\\_regional\\_parameters\\_v1.0.2\\_final\\_1944\\_1.pdf](https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_regional_parameters_v1.0.2_final_1944_1.pdf).
3. WLR089U0. – Режим доступу : <https://www.microchip.com/en-us/product/wlr089u0>
4. RFM95W. Режим доступу: <https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95W.html>
5. SX1276 Режим доступу <https://www.semtech.com/search?q=%E2%80%A209SX1276>
6. Галкин П.В. Особенности имитационного моделирования беспроводных сенсорных сетей стандарта IEEE 802.15.4/ П.В. Галкин // Телекоммуникаційні та інформаційні технології. – 2015. – No 2. –С. 67-79.
7. ДСТУ CEN/TS 54-14:2021 Системи пожежної сигналізації та оповіщення. Частина 14. – [Чинний від 2021-07-01]. – ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»)
8. AN1200.22. LoRa™ Modulation Basics. Revision 2. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>
9. SX1272/3/6/7/8. LoRa Modem Design Guide. AN1200.13. Revision 1 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://www.openhacks.com/uploadsproductos/loradesignguide\\_std.pdf](https://www.openhacks.com/uploadsproductos/loradesignguide_std.pdf)
10. Md. Noor-A-Rahim. Hybrid Chirp Signal Design for Improved Long-Range (LoRa) Communications// Md. Noor-A-Rahim, M. Omar Khyam, Apel Mahmud, Xinde Li, Dirk Pesch, H. Vincent Poor. // *Signals* 2022, 3, 1–10. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/signals3010001>.
11. Congduc Pham. Dense Deployment of LoRa Networks: Expectations and Limits of Channel Activity Detection and Capture Effect for Radio Channel Access/ Congduc Pham, Muhammad Ehsan // *Sensors* 2021, 21, 825. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s21030825>.
12. D.Monica Satyavathi. Real-time hidden data transmission using lora./ D.Monica Satyavathi, B.Vandana Mala, Ch.Veera Vamsi, Ch.Chiranjeevi, Ch.Neeraj// *EPR International Journal of Research and Development*. – 2022. –v.4. –№9. –p.90-94.



13. Husam Rajab. Evaluation of Energy Consumption of LPWAN Technologies/ Husam Rajab, Tibor Cinkler, Taoufik Bouguera // Режим доступу: <https://www.researchsquare.com/article/rs-343897/v1>
14. SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem. Low Energy Consumption Design. AN1200.17. Revision 1 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://www.openhacks.com/uploadsproductos/loralowenergydesign\\_std.pdf](https://www.openhacks.com/uploadsproductos/loralowenergydesign_std.pdf)

### References

1. Stepanov M. Zviazok elementiv sensornoi merezhi systemy monitorynhu/ M. Stepanov, V.Lavrinenko // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2023. - №4. – S.199- 206
2. LoRa Alliance Technical committee. LoRaWAN™ 1.0.2 Regional Parameters. Revision: B. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan\\_regional\\_parameters\\_v1.0.2\\_final\\_1944\\_1.pdf](https://lora-alliance.org/wp-content/uploads/2020/11/lorawan_regional_parameters_v1.0.2_final_1944_1.pdf).
3. WLR089U0. – Режим доступу: <https://www.microchip.com/en-us/product/wlr089u0>
4. RFM95W. Режим доступу: <https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM95W.html>
5. SX1276 Режим доступу <https://www.semtech.com/search?q=%E2%80%A2%09SX1276>
6. Halkyn P.V. Osobennosti ymytatsyonnoho modelyrovannya besprovodnykh sensornykh setei tandarta IEEE 802.15.4/ P.V. Halkyn // Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii. – 2015. – No 2. –S. 67-79.
7. DSTU CEN/TS 54-14:2021 Systemy pozhezhnoi syhnalizatsii ta opovishchuvannia. Chastyna 14. – [Chynnyi vid 2021–07–01]. — DP «Ukrainskyi naukovo-doslidnyi i navchalnyi tsentr problem standartyzatsii, sertyfikatsii ta yakosti» (DP «UkrNDNTs»).
8. AN1200.22. LoRa™ Modulation Basics. Revision 2. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.frugalprototype.com/wp-content/uploads/2016/08/an1200.22.pdf>
9. SX1272/3/6/7/8. LoRa Modem Design Guide. AN1200.13. Revision 1 [Електронний ресурс]. — Режим доступу: [https://www.openhacks.com/uploadsproductos/loradesignguide\\_std.pdf](https://www.openhacks.com/uploadsproductos/loradesignguide_std.pdf)
10. Md. Noor-A-Rahim. Hybrid Chirp Signal Design for Improved Long-Range (LoRa) Communications// Md. Noor-A-Rahim, M. Omar Khyam, Apel Mahmud, Xinde Li, Dirk Pesch, H. Vincent Poor. // *Signals* 2022, 3, 1–10. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/signals3010001>.
11. Congduc Pham. Dense Deployment of LoRa Networks: Expectations and Limits of Channel Activity Detection and Capture Effect for Radio Channel Access/ Congduc Pham, Muhammad Ehsan // *Sensors* 2021, 21, 825. Режим доступу: <https://doi.org/10.3390/s21030825>.
12. D.Monica Satyavathi. Real-time hidden data transmission using lora./ D.Monica Satyavathi, B.Vandana Mala, Ch.Veera Vamsi, Ch.Chiranjeevi, Ch.Neeraj// EPRA International Journal of Research and Development. – 2022. –v.4. –№9. –p.90-94.
13. Husam Rajab. Evaluation of Energy Consumption of LPWAN Technologies/ Husam Rajab, Tibor Cinkler, Taoufik Bouguera // [Elektronnyi resurs] — Режим доступу: <https://www.researchsquare.com/article/rs-343897/v1>
14. SX1272/3/6/7/8: LoRa Modem. Low Energy Consumption Design. AN1200.17. Revision 1 [Elektronnyi resurs]. — Режим доступу: [https://www.openhacks.com/uploadsproductos/loralowenergydesign\\_std.pdf](https://www.openhacks.com/uploadsproductos/loralowenergydesign_std.pdf)