

## ОЦІНКА ДАЛЬНОСТІ ЗВ'ЯЗКУ БЕЗДРОТОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЇ LORA

Використання новітніх бездротових технологій суттєво впливає на варіанти застосування бездротових сенсорних мереж військового призначення. Основні зусилля спрямовані на підвищення дальності зв'язку, швидкості передачі даних та часу автономної роботи сенсорів. В роботі проводиться огляд способів формування та обробки сигналів фізичного рівня модуляції LORA. Даний вид модуляції обумовлює високі показники чутливості та завадостійкості прийомо-передавачів LORA. Крім цього пропонується застосування математичної моделі Окамура-Хата для визначення втрат при різних умовах розповсюдження сигналу при заданих параметрах, а також досліджується вплив вибору коефіцієнту розширення спектру на швидкість передачі даних та відстань зв'язку, що є одними з ключових показників при проектуванні побудови сенсорних мереж військового призначення.

*Панченко І.В., Восколович А.И., Колтовсков Д.Г. Вариант расчета дальности связи беспроводной сенсорной сети на основании технологии LORA. Использование современных беспроводных технологий существенно влияет на варианты применения беспроводных сенсорных сетей военного назначения. Основные усилия направлены на повышение дальности связи, скорости передачи данных и времени автономной работы сенсоров. В работе проводится обзор способов формирования и обработки сигналов физического уровня модуляции LORA. Данный вид модуляции обуславливает высокие показатели чувствительности и помехоустойчивости приемо-передатчиков LORA. Кроме этого предлагается применение математической модели Окамура-Хата для определения потерь в разных условиях распространения сигнала при заданных параметрах, а также исследуется влияние выбора коэффициента расширения спектра на скорость передачи данных и дальность связи, что является одними из ключевых показателей при проектировании построения сенсорных сетей.*

*I. Panchenko, O. Voskolovich, D. Koltovskov The option of calculating the range of the wireless sensor network based on LORA technology. The use of the modern wireless technologies significantly affects the use of wireless sensor networks for military purposes. The main efforts are aimed at increasing communication range, data transfer speed and battery life of the sensors. This paper reviews the methods of generating and processing the signals of the physical modulation level of LORA. This type of modulation causes high sensitivity and noise immunity of LORA transmitters. In addition, the use of the Okamura-Khata mathematical model for determining losses under different signal propagation conditions for given parameters is proposed, and the influence of the choice of the coefficient of expansion of the spectrum on the data transmission rate and communication distance is also explored, which is one of the key indicators in designing the construction of sensor networks..*

**Ключові слова:** LORA, CSS, бездротові сенсорні мережі, дальність зв'язку.

**Постановка завдання.** Сьогодні пильні погляди у сфері бездротових технологій передачі даних прикуті до технології LORA [1, 2], що використовується не тільки в комерційних, а може бути використана й у військових бездротових сенсорних мережах (БСМ). Військова БСМ, в якій фізичний рівень передачі даних, побудований за допомогою технології LORA, здатна забезпечити необхідний час автономної роботи та дальність зв'язку. Однак визначення втрат при різних умовах розповсюдження сигналу при заданих параметрах, а також дослідження впливу вибору коефіцієнту розширення спектру на швидкість передачі даних та відстань зв'язку, що є одними з ключових показників при проектуванні побудови сенсорних мереж військового призначення не проводились. Тому дана стаття буде присвячена дослідженню цих питань.

**Аналіз останніх публікацій.** В роботі [2] проведено огляд та порівняння характеристик каналу зв'язку з використанням модуляції LORA, а саме дальності зв'язку та чутливості приймача. Аналіз отриманих результатів свідчить, що технологія передачі даних з модуляцією LORA є перспективною та потребує подальшого дослідження. В роботі [3] отримані співвідношення обчислення ймовірності бітової помилки, які дозволяють проектувати та розраховувати реальні бездротові сенсорні мережі військового призначення з використанням технології низькошвидкісної передачі даних LORA. В роботі [4] проводилось дослідження щодо способів підвищення швидкості передачі даних в БСМ з використанням LORA та отримані аналітичні залежності щодо побудови структури сигналу з врахуванням

коефіцієнту перекриття та міжсимвольної інтерференції. Але в даних роботах не розглядалися способи формування та обробки сигналів *LORA*, їх представлення в частотному та спектральному вигляді та залежність швидкості передачі даних та відстані зв'язку від вибору коефіцієнтів розширення.

Тому **метою** роботи є дослідження способів формування та обробки сигналів *LORA*, розрахунки втрат розповсюдження сигналів *LORA* в урбанізованих районах та вплив коефіцієнтів розширення спектру на дальність зв'язку та швидкість передачі даних.

**Виклад основного матеріалу.** Метод модуляції *LORA* базується на розширенні спектру та варіації лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) або *CSS* (від англ. *Chirp Spread Spectrum*) при якій данні кодуються ширококутовими імпульсами. Частота *CSS* радіосигналу може як збільшуватись (*up-chirp*), так і зменшуватись (*down-chirp*) відносно центральної (несучої) частоти. Математично *CSS* сигнал [5] виражається у наступному вигляді:

$$x(t) = A_0 \cos\left(\omega_0 t + \frac{\mu}{2} t^2\right), \text{ де } \frac{T_{sym}}{2} \leq t < \frac{T_{sym}}{2}$$

та описується наступними параметрами:

$BW$  – ширина спектру радіосигналу;

$f_0; \omega_0 = 2\pi f_0$  – центральна (несуча) частота радіосигналу;

$f_H = f_0 - \frac{BW}{2}; \omega_H = 2\pi f_H$  – нижня частота радіосигналу;

$f_B = f_0 + \frac{BW}{2}; \omega_B = 2\pi f_B$  – верхня частота радіосигналу;

$SF$  – коефіцієнт розширення спектру (змінюється в діапазоні від 7 до 12);

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

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

$B = BW T_{sym} = 2^{SF}$  – база радіосигналу.

В даному виразі коефіцієнт розширення спектру ( $SF$ ) визначає розрядність символів даних (у бітах), що передається радіоінтерфейсом за час  $T_{sym}$ .

На рис. 1 приведено загальний вигляд ЛЧМ сигналу на часовому проміжку та на рис. 2 зображено його спектр з  $BW=125$  кГц та базою (коефіцієнтом розширення спектру), що дорівнює 128 ( $SF = 7$ ).

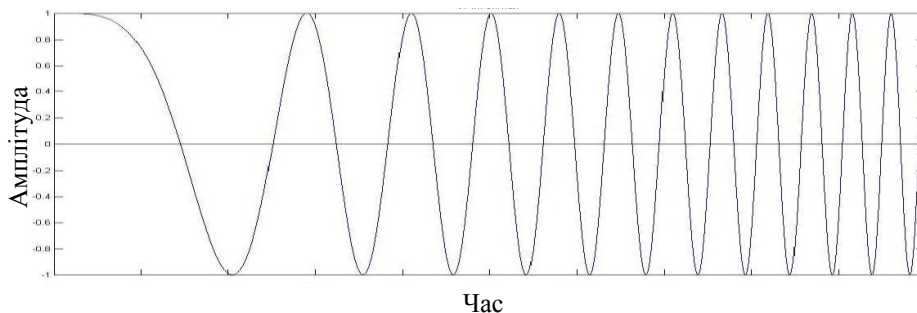


Рис. 1. Загальний вигляд ЛЧМ сигналу

Фізичний радіоінтерфейс *LORA* заснований на використанні ширококутових сигналів з базою сигналу, значно більшою за одиницю.

Даний вид радіосигналів має дві особливості, таких як:

спектр радіосигналу значно перевищує швидкість передачі даних ( $BW \gg R_b$ );

кореляційна функція суттєво вужча за кореляційну функцію вузькосмугового сигналу з  $B \sim 1$ .

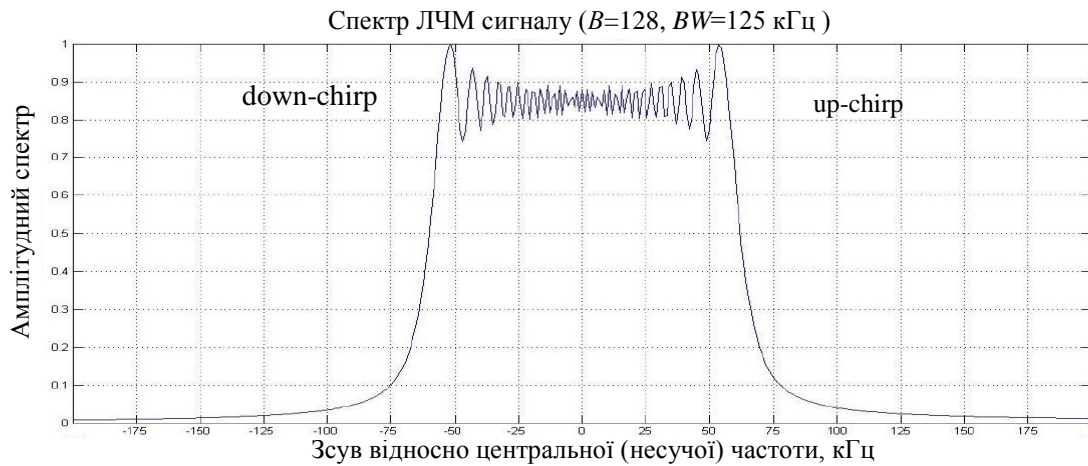
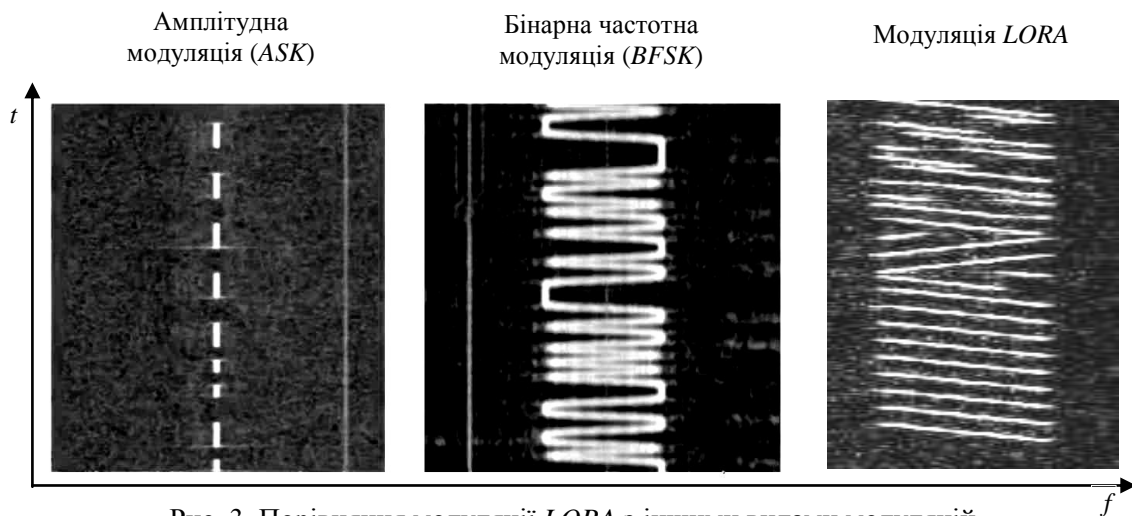


Рис. 2. Спектр ЛЧМ сигналу

Частотна надлишковість широкосмугового сигналу забезпечує високу завадостійкість. Передавачі *LORA* формують *CSS* радіосигнали з шириною спектру 125, 250 та 500 кГц.

Модуляція *LORA* [6] заснована на розширенні спектру (*spread spectrum*) який називається *CSS* та була розроблена з метою передачі даних на великі відстані на частотах, які не підлягають ліцензуванню, з обмеженням потужності передавача 25 мВт. Для забезпечення регулювання балансу між відстанню та швидкістю передачі даних існують коефіцієнти розширення ( $SF7$ - $SF12$ ). На рис. 3 наведено порівняння модуляції *LORA* з іншими видами модуляцій.

Рис. 3. Порівняння модуляції *LORA* з іншими видами модуляцій

На рис. 3 зображена залежність зміни частоти сигналу від часу. Модуляція *LORA* значно відрізняється від інших модуляцій. Це *CSS*, що складається з так званих *chirp*, які змінюють частоту з часом. Кожен *chirp* (рис. 4) – це миттєва зміна частоти з подальшим продовженням послідовності з нової позиції в циклі. Сама послідовність залишається незмінною, але постійно змінюється точка, з якої вона починається. Саме в цих змінах знаходяться дані, що передаються завдяки модуляції *LORA*. Завдяки цьому сигнал *LORA* можливо демодулювати нижче рівня шуму.

**Синхронізація приймача та передавача.** Технологія *LORA* використовує асинхронний режим прийому-передачі при якому передавач може розпочати генерацію сигналу в будь-який проміжок часу. В такому випадку використовується преамбула, що

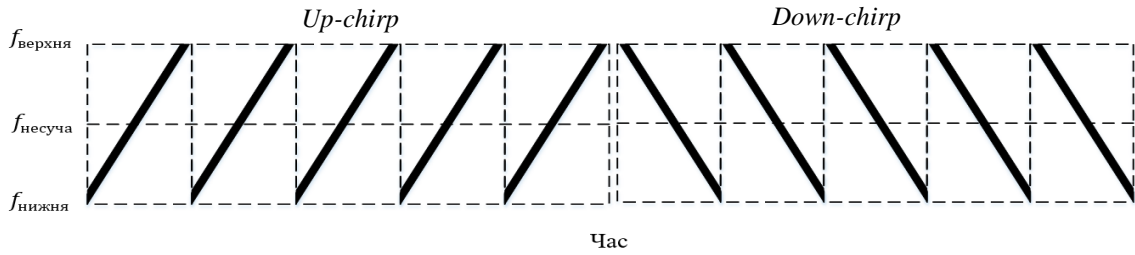


Рис. 4. Миттєве збільшення та зменшення частоти з часом (*chirp*)

*Синхронізація приймача та передавача.* Технологія *LORA* використовує асинхронний режим прийому-передачі при якому передавач може розпочати генерацію сигналу в будь-який проміжок часу. В такому випадку використовується преамбула, що дозволяє приймачу детектувати активність передавача. По завершенню преамбули слідує параметр синхронізації та блок даних фізичного рівня (рис. 5).

*Детектування CSS сигналу.* Процес детектування (1) преамбули базується на наявності узгоджуючого фільтру, який в частотній області має його зворотне відображення в часі.

$$h(t) = A_1 \cos \left( \omega_H (T_{sym} - t) - \frac{\mu}{2} (T_{sym} - t)^2 \right), 0 \leq t < T_{sym} \quad (1)$$

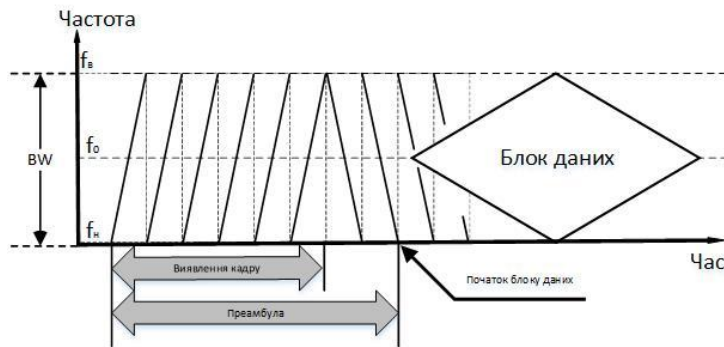


Рис. 5. Загальна структура кадру для передачі одного блоку даних

Принцип передачі символів інформації блоку даних фізичного рівня (2) полягає в частотному зсуві  $e^{j\Delta\omega kt}$  відповідно опорної ЛЧМ  $e^{j(\omega_H t + \mu t^2)}$ , де  $k=0, 1, 2, \dots, 2^{SF}$  – інформаційний символ розмірністю  $SF$  біт (рис. 6).

$$x(t) = \begin{cases} A_0 \cos \left( \omega_H t + \Delta\omega kt + \frac{\mu}{2} t^2 \right), & 0 \leq t < T_0 \\ A_0 \cos \left( \omega_H t + \Delta\omega kt - BWt + \frac{\mu}{2} t^2 \right), & T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (2)$$

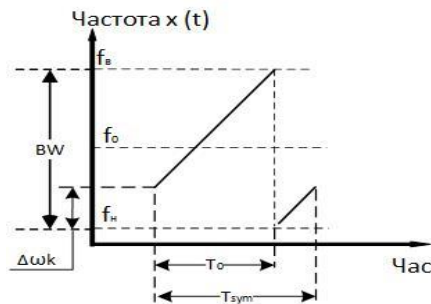


Рис. 6. Візуальне представлення інформаційного символу

Приклад залежності зсуву частоти від часу наведений на рис. 7.

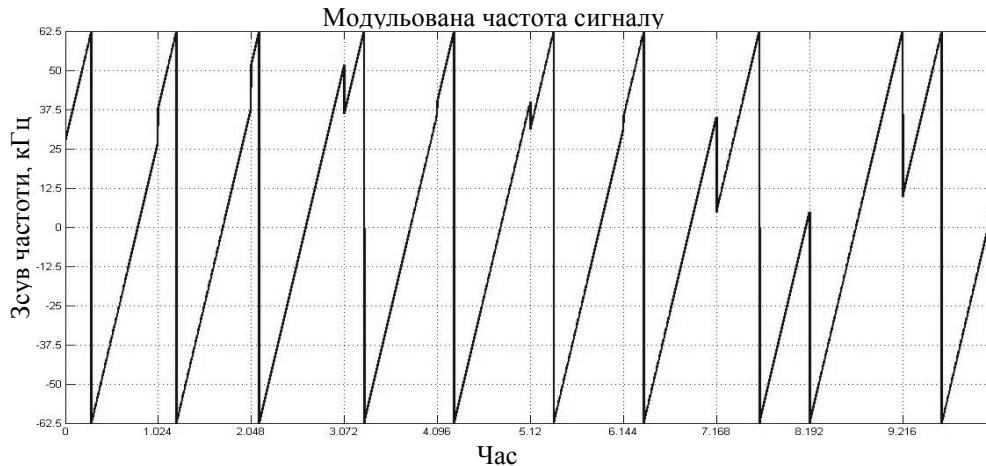


Рис. 7. Залежність зсуву частоти від часу

В цілому, на вхід приймача надходить модульований сигнал, що описується наступним виразом:

$$y(t) = x(t) c(t) =$$

$$= \frac{A_0 A_1}{2} \begin{cases} \cos(\Delta \omega t k) + \cos(2\omega_H t + \Delta \omega k t + \mu t^2), 0 \leq t < T_0 \\ \cos(BW - \Delta \omega k t) + \cos(2\omega_H t + \Delta \omega k t - BW t + \mu t^2), T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases}$$

та має вигляд, наведений на рис. 8.

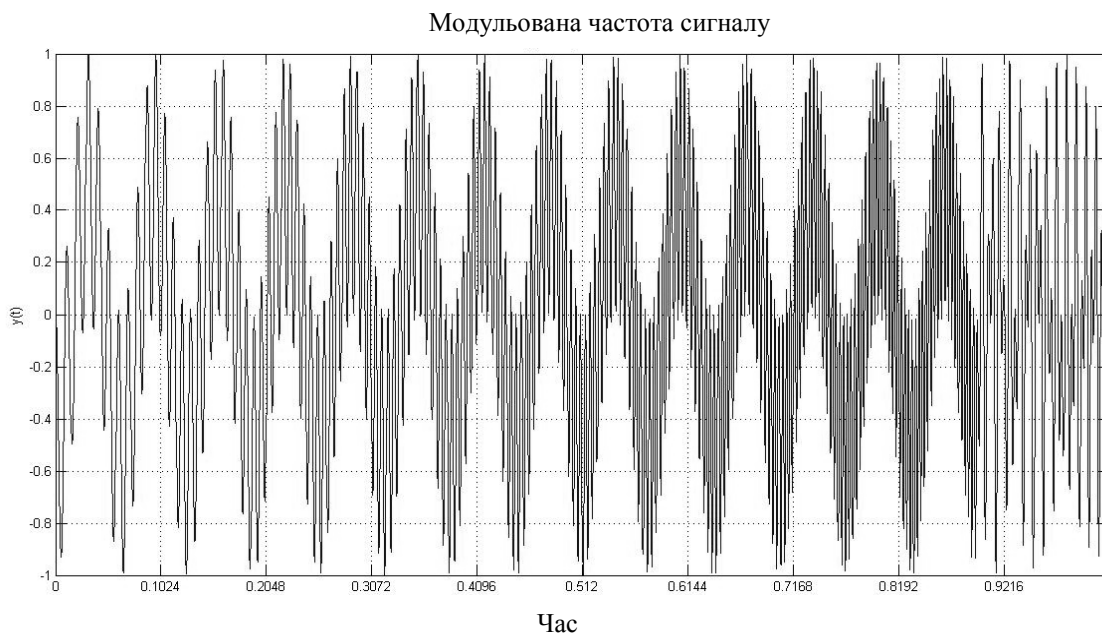


Рис. 8. Загальний вигляд *LORA* модульованого сигналу на вході приймача

Вищезазначені перетворення сигналу на фізичному рівні передавачів *LORA* являють собою ключову особливість модульованого сигналу *LORA* таку як його завадостійкість та високе функціонування детектору сигналу в умовах приймання нижче рівня шумів.

Завдяки даному виду модуляції прийомо-передавачі *LORA* [7] мають високі показники чутливості, що приведені в табл. 1.

Основні характеристики передавачів LORA серії SX

Найменування	Діапазон робочих частот, МГц	Коефіцієнт розширення спектру SF	Ширина смуги пропускання BW (Bandwidth) кГц	Бюджет радіоканалу зв'язку, дБ (макс)	Швидкість передачі даних при використанні модуляції LORA	Чутливість приймача в залежності від SF, дБм	Вихідна потужність, дБм	Коефіцієнт шуму NF (Noise Figure), дБ
SX1272	860-1020	6-12	125-500	157	0,24-37,5	-117...-137	20	6
SX1273	860-1020	6-9	125-500	150	1,7-37,5	-117...-130		
SX1276	137-1020	6-12	7,8-500	168	0,018-37,5	-111...-148		
SX1277	137-1020	6-9	7,8-500	159	0,11-37,5	-111...-139		
SX1278	137-525	6-12	7,8-500	168	0,018-37,5	-111...-148		
SX1279	137-960	6-12	7,8-500	168	0,018-37,5	-111...-148		

Виходячи з розрахунку втрат у вільному просторі (3) на частоті 870 МГц та при втратах 150 дБ розрахункова максимально можлива дальність зв'язку буде дорівнювати близько 800 км

$$FSPL_{dB} = 10 \lg \left( \frac{4\pi df}{c} \right)^2. \quad (3)$$

Але в (3) не враховуються жодні втрати сигналу, що присутні в реальних умовах. Для опису процесу розповсюдження радіосигналу LORA в даній роботі пропонується застосувати математичну модель Окамура-Хата [8]. Дана модель дозволяє розрахувати втрати радіосигналу в урбанізованих районах без урахування рельєфу місцевості (місто, приміська зона, сільська місцевість) з наступними обмеженнями:

частота радіосигналу  $f = 100 \dots 1500$  МГц;

дальність зв'язку  $d = 1 \dots 100$  км;

висота підйому базової станції ( $h_t$ ) та абонентської станції ( $h_r$ ) – 20...200 м та 1...10 м відповідно.

Для великих та середніх міст ( $L_{\text{місто}}$ ) втрати розраховуються за наступним виразом:

$$L_{\text{місто}} = 69,55 + 26,16 \lg(f) - 13,82 \lg(h_r) + (44,9 - 6,55 \lg(h_t) \lg(d) - a(h_r)),$$

де  $a(h_r)$  – поправочний коефіцієнт висоти абонентської станції, що розраховується за (4).

$$a(h_r) = 3,2 [\lg(11,75 h_r)]^2 - 4,97, \text{ при умові } f \geq 300 \text{ МГц} \quad (4)$$

Для приміської зони ( $L_{\text{пр}}$ ) та сільської місцевості ( $L_c$ ) втрати розраховуються відповідно (5) та (6).

$$L_{\text{пр}} = L_{\text{місто}} - 2 \left[ \lg \frac{f}{28} \right]^2 - 5,4 \quad (5)$$

$$L_c = L_{\text{місто}} - 4,78 \lg(f)^2 + 18,33 \lg(f) - 40,94 \quad (6)$$

В табл. 2 приведено та на рис. 9 зображено порівняння розрахункових показників втрат для різних типів місцевості з результатами, отриманими при проведенні випробувань прийомо-передавачів *Semtech SX1276* [9] в умовах міста. Розрахунки та реальні випробування проводилися для частоти 870 МГц, висота базової та абонентської станції – 20 м та 5 м відповідно. Залежність швидкості передачі даних та дальності зв'язку (в умовах міста) від вибору коефіцієнту розширення *SF* наведено на рис. 10.

Таблиця 2

Розрахункові та реальні показники втрат

Відстань, км	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_{\text{місто}}$ , дБ	123,88	135,43	142,18	146,97	150,69	153,73	156,3	158,52
$L_{\text{пр}}$ , дБ	114,03	125,58	132,33	137,12	140,84	143,87	146,44	148,67
$L_{\text{с}}$ , дБ	95,52	107,07	113,82	118,61	122,33	125,37	127,94	130,16
Вільний простір, дБ	91,23	97,25	100,78	103,27	105,21	106,80	108,14	109,30
Результати випробувань, дБ	116	128	133	132	141	146	145	147

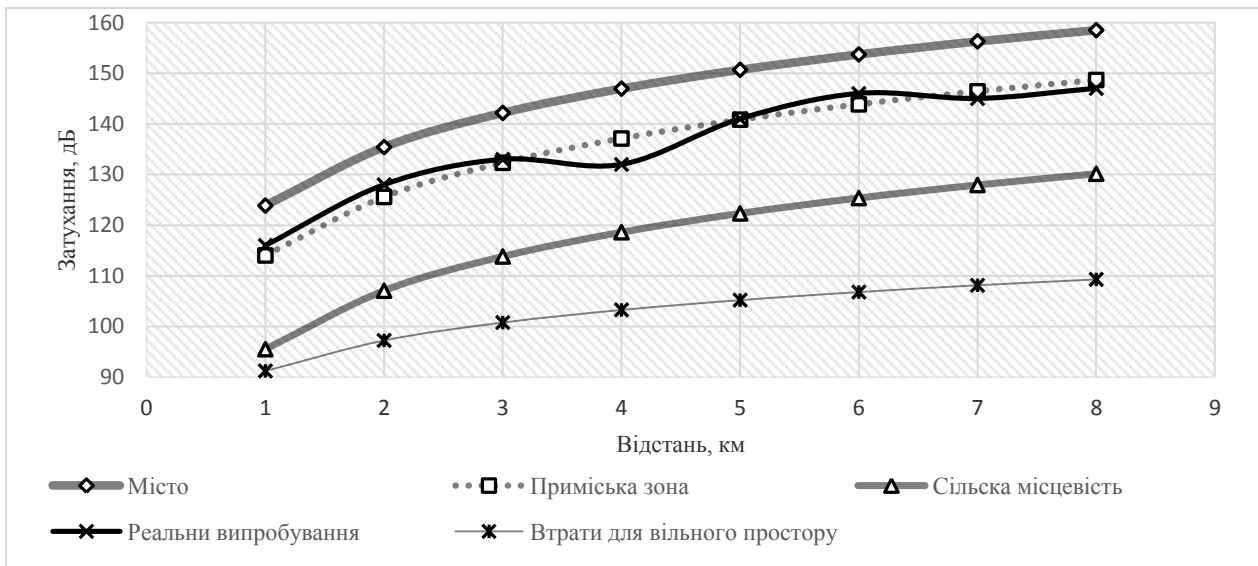
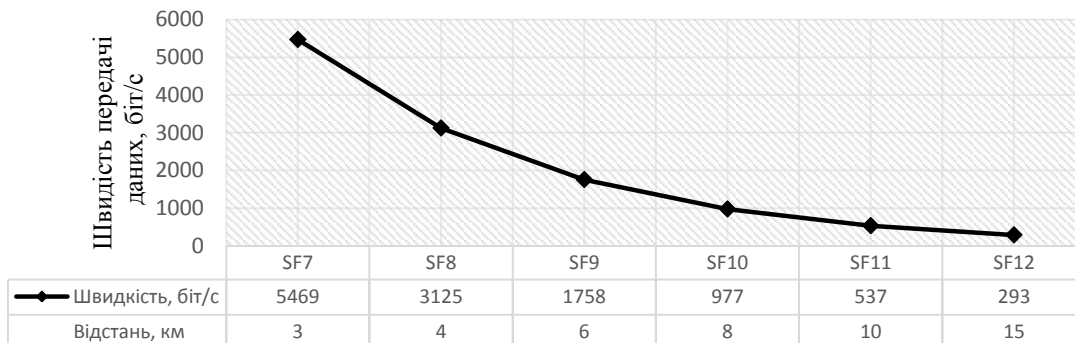


Рис. 9. Порівняння розрахункових показників затухань з показниками, отриманими при проведенні випробувань



Коефіцієнт розширення, швидкість та дальність зв'язку

Рис. 10. Залежність швидкості передачі даних та відстані від коефіцієнту розширення *SF*

Застосування моделі Окамура-Хата показує результати, наближені до реальних випробувань, але слід зауважити, що дана модель може бути використана лише при умові застосування коефіцієнту розширення  $SF12$ . В даному випадку ми отримуємо максимально можливу дальність зв'язку з найменшою швидкістю передачі даних.

Виходячи з даних, зазначених на рис. 10 слід зауважити, що зміна коефіцієнту розширення  $SF$  на фізичному рівні суттєво впливає на дальність зв'язку та швидкість передачі даних. Модель Окамура-Хата не враховує цей критерій та не може бути застосована в повному обсязі для отримання балансу між швидкістю передачі даних та максимальною дальністю зв'язку.

**Висновки.** Таким чином, у роботі досліджено фізичний рівень модуляції *LORA*, що обумовлює високі показники чутливості та завадостійкості прийомо-передавачів *LORA*. Проведення випробувань прийомо-передавачів *LORA* в умовах міста показало, що найбільш точні розрахунки втрат *LORA* модульованого сигналу в різних умовах розповсюдження при заданих параметрах можливо отримати за математичною моделлю Окамура-Хата. Але дана математична модель не враховує коефіцієнт розширення спектру сигналу *LORA*.

Напрямок подальшої роботи є більш поглиблене дослідження військових БСМ з використанням модуляції *LORA* з метою розробки математичної моделі для розрахунків граничної дальності зв'язку між сенсорами на різній місцевості (місто, приміська зона, сільська місцевість) з врахуванням коефіцієнту розширення спектру сигналу *LORA* та швидкості передачі даних при умові знаходження сенсорів безпосередньо на ґрунті.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. IEEE Std 802.15.4a-2007. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE, 2007.
2. Восколович О.І. Технологія низькошвидкісної передачі даних LORA / О.І. Восколович, І.В. Панченко, І.О. Чурілов // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації. – Випуск № 2. – Київ: ВІТІ, 2017.
3. Панченко І.В. Модель розрахунку ймовірності бітової помилки в системах низькошвидкісної передачі даних LORA / І.В. Панченко, О.І. Восколович, І.О. Чурілов, Д.Г. Колтовсков // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації. – Випуск № 1. – Київ: ВІТІ, 2018.
4. Панченко І.В. Способи підвищення швидкості передачі даних в бездротових сенсорних мережах з використанням *LORA* / І.В. Панченко, О.І. Восколович, Д.Г. Колтовсков // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації. – Випуск № 3. – Київ: ВІТІ, 2018.
5. LoRa Performance under Variable Interference and Heavy-Multipath Conditions. Kamil Staniec and Michał Kowal. Wireless Communications and Mobile Computing. Volume 2018, Article ID 6931083, 9 pages.
6. LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements. Jetmir Naxhibeqiri, Floris Van den Abeele, Ingrid Moerman, and Jeroen Hoebeke Sensors (Basel). 2017 Jun; 17(6): 1193.
7. Semtech Wireless RF. Електронний ресурс <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-transceivers>.
8. Hata, M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services / M. Hata // IEEE Trans. Vehicular Technology, 1980. – Vol.29, №3 – P.317-325.3.
9. Mohamed Ibrahim Aref, Axel Sikora. Free space range measurements with Semtech Lora technology. Електронний ресурс <https://www.semanticscholar.org/paper/Free-space-range-measurements-with-Semtech-Lora>.