к.т.н. Панченко І.В. (ВІТІ)
к.т.н. Восколович О.І. (ВІТІ)
Колтовсков Д.Г. (ВІТІ)

СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОСТІ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ В БЕЗПРОВОДОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ З ВИКОРИСТАННЯМ *LORA*

В роботі розглядається залежність між ступенем перекриття та міжсимвольною інтерференцією (МСІ) в системі широкосмугового зв'язку LORA.

Панченко И.В., Восколович А.И., Колтовсков Д.Г. Увеличение скорости передачи данных в беспроводных сенсорных сетях с использованием LORA. *В работе рассматривается зависимость между степенью перекрытия и межсимвольной интерференцией (МСИ) в системе широкополосной связи LORA.*

I. Panchenko, O. Voskolovich, D. Koltovskov Increasing the speed of data transmission in wireless sensor networks using LORA. *The paper regards relationship between the degree of overlap and intersymbol interference (ISI) in the broadband LORA system.*

Ключові слова: *LORA, міжсимвольна інтерференція, безпроводові сенсорні мережі.*

Постановка завдання. Проведений аналіз технічної літератури щодо використання збройними силами провідних країн світу безпроводових сенсорних мереж (БСМ) показав високу ефективність застосування даного обладнання під час планування та проведення бойових операцій в зонах конфлікту [1]. БСМ можуть бути використані військовими для різних цілей, таких як моніторинг та відстеження ворогів і захист власних підрозділів.

Сенсори військового призначення можуть бути побудовані за допомогою використання технології *LORA* (від англ. *Long Range*) [2], яка здатна забезпечити значну дальність передачі даних в сукупності з дуже тривалим часом автономної роботи (місяці і навіть роки). Однак дана технологія характеризується низькою швидкістю передачі. Тому задача збільшення швидкості передачі при реалізації технології *LORA* в сенсорних мережах є актуальною.

Аналіз останніх публікацій. В роботі [3] проведено огляд та порівняння 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 [4] 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 роботах [5, 6] проводилось дослідження щодо наявності міжсимвольної інтерференції (МСІ) при використанні каналів *LORA*. Але в даних роботах не розглядається залежність швидкості передачі даних від ступеню перекриття.

Тому **метою** роботи є дослідження способів підвищення швидкості передачі даних в безпроводових сенсорних мережах з використанням *LORA*.

Виклад основного матеріалу. Один із методів підвищення швидкості побітової передачі у внутрішньоімпульсній лінійній ЧМ (ВЛЧМ) полягає у тому що більше одного символу передається за час, який коротший ніж тривалість одного символу. Більша кількість ВЛЧМ сигналів за проміжок часу здатна значно підвищити пропускну здатність. Але збільшення коефіцієнта перекриттів для одночасної передачі декількох ВЛЧМ сигналів, у свою чергу, призводить до МСІ, яка веде до збільшення ймовірності бітової помилки (BER). Таким чином, для використання методу перекриття у ВЛЧМ є необхідність більш детального дослідження МСІ.

Припускаючи, що МСІ, яка викликана внаслідок перекриття, лише двома співпадаючими символами поруч із символом, який представляє інтерес, не досліджено в повному обсязі та не відображує чіткого зв'язку між ступенем перекриття і МСІ, а було лише зазначено, що більше перекриттів не завжди викликає велику МСІ [6 – 8]. В даній роботі маємо змогу отримати достеменний вираз МСІ внаслідок співпадіння в DM-BPSK і чіткого опису взаємозв'язку між МСІ і перекриттям, який дозволяє ефективно використовувати метод перекриття в DM-BPSK

Аналіз МСІ внаслідок перекриття. Комплексний еквівалент базової смуги сигналу $c(t)$ ВЛЧМ виражається як [5 – 7]

$$c(t) = \sqrt{\frac{1}{T_c}} \exp(j\pi\mu t^2), \quad |t| < \frac{T_c}{2}, \tag{1}$$

де T_c і μ $(\neq 0)$ позначають тривалість і швидкість ВЛЧМ відповідно. Швидкість лінійної ЧМ визначається як швидкість зміни миттєвої частоти. Сигнал ВЛЧМ називається up-ВЛЧМ (Down- ВЛЧМ), якщо μ позитивний (негативний), тобто миттєва частота збільшується (зменшується).

На рис. 1 показана модель каналу за умови застосування двійковій фазової маніпуляції (BPSK) з up-ВЛЧМ з коефіцієнтом перекриття, що змінюється. Вхідні дані спочатку модулюються кожні $\tau = T_c/L$ секунд в BPSK модуляторі, де $L \in \{1,2,\cdots\}$ та τ це кількість перекриттів та інтервал перекриття, відповідно.

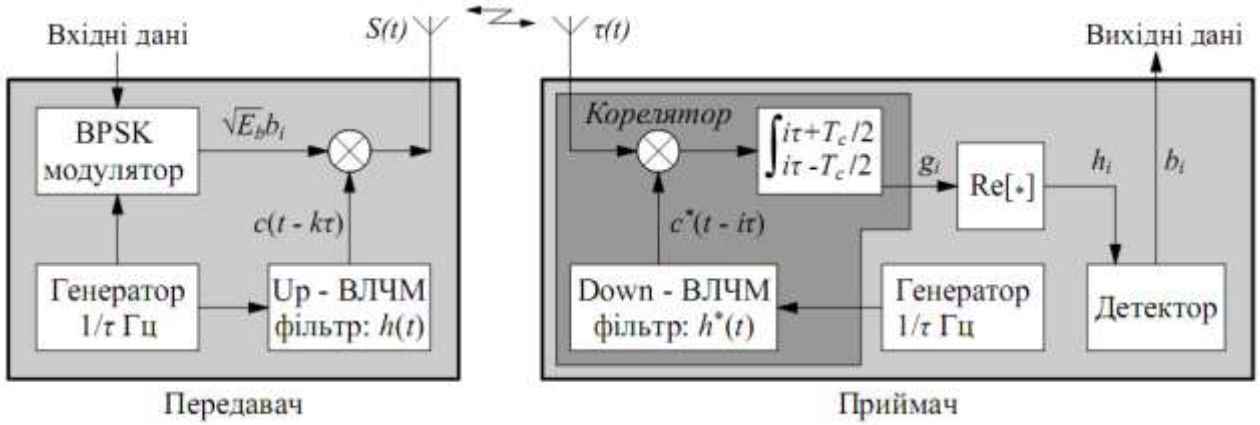
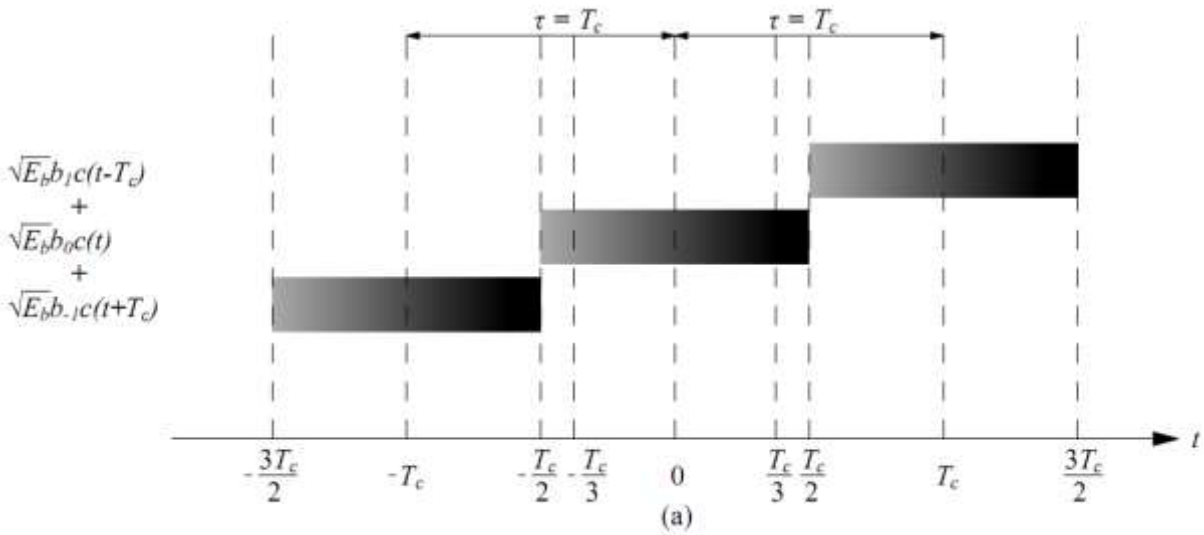


Рис.1. Структурна схема каналу зв’язку ВЛЧМ сигналу зі змінюємим перекриттям

На рис.2 зображено ВЛЧМ сигнал з L = 1 (сигнали без перекриття), та з різними ступенями перекриття L = 2 та 3 відповідно.



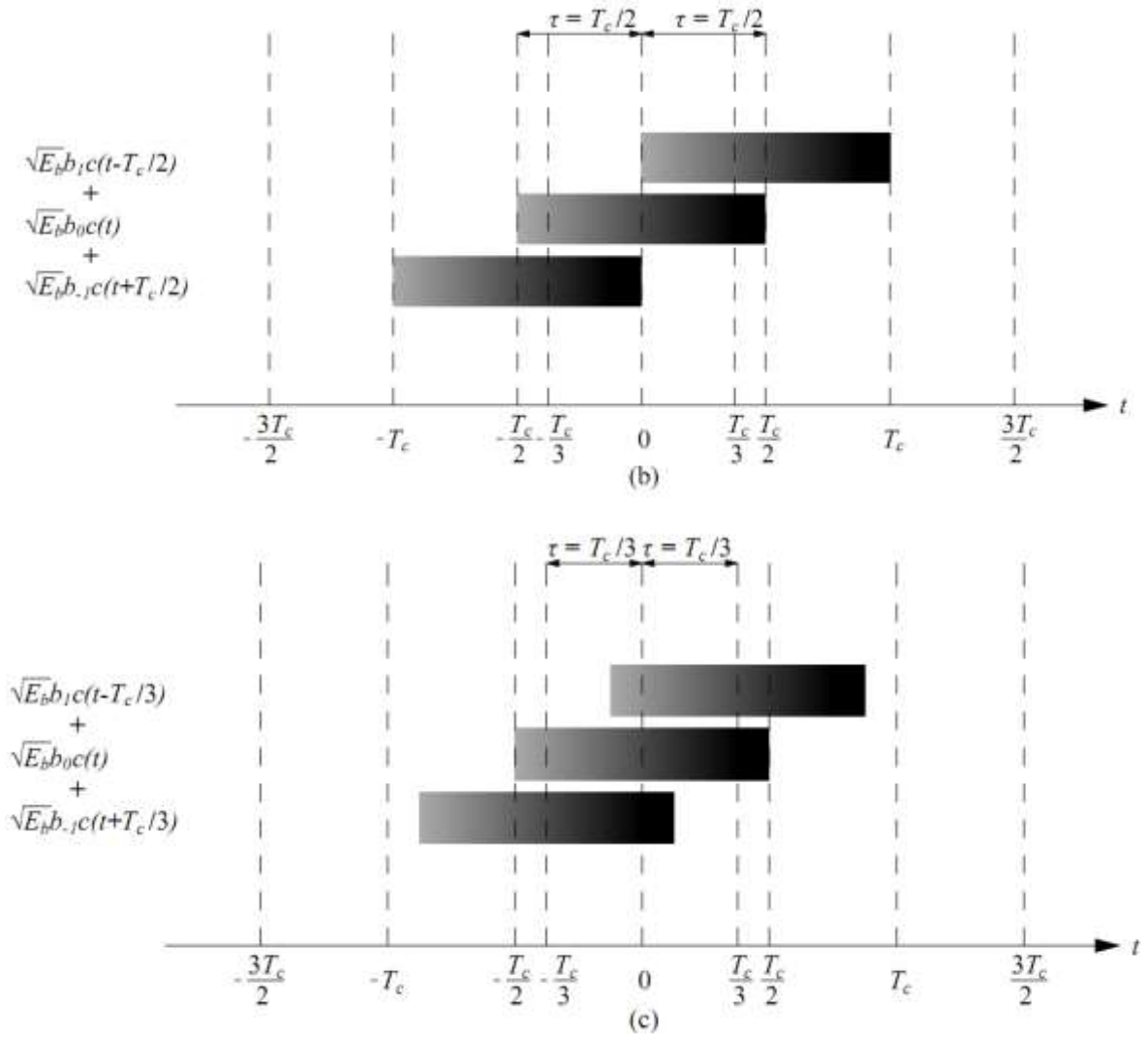


Рис.2. Приклади сигналів ВЛЧМ з перекриттям L = 1 (a), L = 2 (b), L = 3 (c)

Таким чином, сигнал $s(t)$ DM-BPSK можна представити як

$$s(t) = \sqrt{E_b} \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k c(t - k\tau), \tag{2}$$

де E_b – енергія розряду, а b_k – k-ий переданий сигнал, що приймає значення {1, – 1} з рівною ймовірністю. На вхід приймача сигнал DM-BPSK надходить разом з завадами, в якості яких у роботі розглядається адитивний білий гаусівський шум (AWGN) $w(t)$ з середнім нулем та спектральною густиною потужності $N_0/2$. В приймачі DM-BPSK-символ з завадами корелює з сигналом down-ВЛЧМ $c^*(t - i\tau)$, створюючи i-ий результат корелятора g_i. Таким чином,

$$h_i = \int_{i\tau - \frac{T_c}{2}}^{i\tau + \frac{T_c}{2}} \mathrm{Re}\left[\{s(t) + w(t)\} c^*(t - i\tau)\right] dt = \sqrt{E_b} b_i + \sqrt{E_b} z_i + n_i \tag{3}$$

вихідного сигналу корелятора g_i є достатнім, оскільки статистика рішення [6], де завади

$$n_i = \int_{i\tau-\frac{T_c}{2}}^{i\tau+\frac{T_c}{2}} \mathrm{Re}\left[w(t)c^*(t-i\tau)\right]dt \tag{4}$$

є гаусівською випадковою величиною з середнім нулем та дисперсією $N_0/2$ та

$$z_i = \sum_{\substack{k=i-L+1 \\ k\neq i}}^{i+L-1} b_k p_{i,k} \tag{5}$$

представляє нормовану МСІ через співпадіння з

$$p_{i,k} = \int_{i\tau-\frac{T_c}{2}}^{i\tau+\frac{T_c}{2}} \mathrm{Re}\left[c(t-i\tau)c^*(t-i\tau)\right]dt = \int_{\max\left(\frac{T_c}{2},\frac{T_c}{2}+(k-i)\tau\right)}^{\min\left(\frac{T_c}{2},\frac{T_c}{2}+(k-i)\tau\right)} T_c^{-1} \times \mathrm{Re}\left\{\exp\left(j\pi\mu\left[\left\{y-(k-i)\tau\right\}^2 - y^2\right]\right)\right\} =$$

$$= \frac{\sin\left\{(k-i)\pi S\left(1-\frac{|k-i|}{L}\right)\right\}}{(k-i)\pi S} \tag{6}$$

В (6) $S = BT_c / L = B\tau$ – коефіцієнт обробки за одне перекриття з $B = |\mu| T_c$ шириною смуги пропускання ВЛЧМ. Наприкінці, *i*-ий вивід даних b_i визначаються шляхом порівняння змінної рішення h_i з порогом нуля.

З виразу (6) видно, що якщо L^2 – коефіцієнт підсилення обробки BT_c, ми маємо $p_{i,k} = 0$ для будь-якого ненульового цілого $k - i \in \{-L+1, -L+2, \cdots, L-1\}$ так як $S\left(1-\frac{|k-i|}{L}\right) = \left(L-|k-i|\right)\frac{BT_c}{L^2}$ є цілим числом в такому випадку: важливе значення факту $p_{i,k} = 0$ для всіх $k \neq i$ – це нормалізоване значення МСІ z_i, показаний в (5), становиться рівним нулю, і відповідно, перекриття не несе ніякої МСІ. Наприклад, перекриття не мають МСІ для $L \in \{1, 5,\}, \{1, 2, 5, 10\}$ та $\{1, 2, 3, 4, 6, 12\}$, коли $BT_c = 75$, 100 та 144 відповідно.

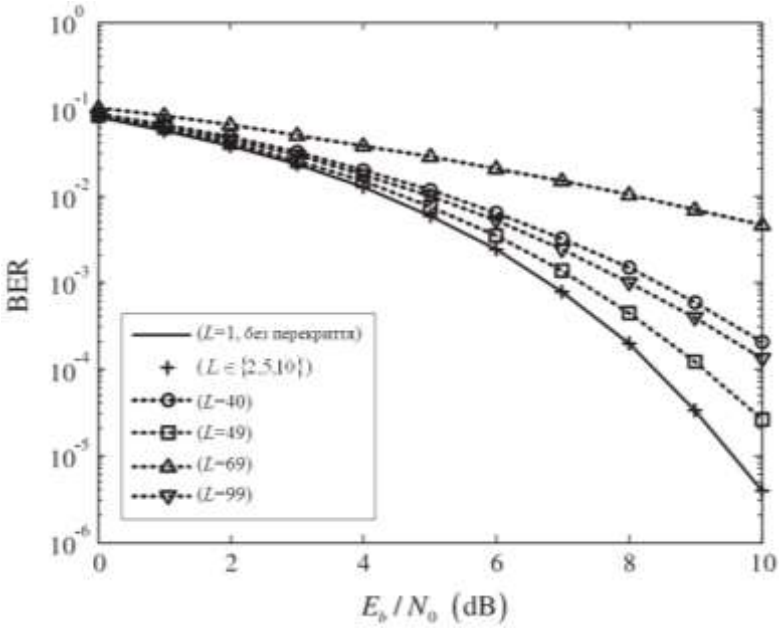


Рис.4. ВСЗ ВЛЧМ сигналу з DM-BPSK для різних значень *L* при $BT_c = 100$

На рис.4 показані криві ВСЗ ВЛЧМ сигналу з DM-BPSK для різних значень L при $BT_c = 100$, де тривалість ВЛЧМ сигналу (T_c), швидкість (μ) та смуга перепускання (B) встановлені на $0.5\mu s$, $400 МГц/\mu s$, та 200 МГц відповідно. З графіку видно, що ідеальним з точки зору ВСЗ є ВЛЧМ сигнал без перекриття при L=1, ситуація також не змінюється при $L \in \{2, 5, 10\}$. Також відмічається, що збільшення L не обов'язково означає зменшення ВСЗ.

Висновки. Швидкість передачі даних в безпроводових сенсорних мережах з використанням *LORA* залежить від коефіцієнта перекриття ВЛЧМ символів. Збільшення коефіцієнта перекриття призводить до виникнення міжсимвольної інтерференції що в свою чергу, веде до збільшення вірогідності помилки, яка значно зменшує швидкість передачі даних. В роботі отримані аналітичні залежності щодо побудови структури ВЛЧМ сигналу з врахуванням коефіцієнту перекриття та МСІ.

Напрямком подальших досліджень є розробка методики збільшення швидкості передачі даних в БСМ з використанням *LORA* з допустимим ВСЗ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гепко И.А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития / И.А. Гепко, В.Ф. Олейник, Ю.Д. Чайка, А.В. Бондаренко // Киев: ЭКМО, 2009. – 672 с.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements. Jetmir Haxhibeqiri, Floris Van den Abeele, Ingrid Moerman, and Jeroen Hoebeke Sensors (Basel). 2017 Jun; 17(6): 1193.

6. 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.

7. T. Yoon. Bit-Error-Rate Performance Analysis of an Overlap-based CSS System / T.Yoon, D.Chong, S.Ahn, S.Yoon / World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering Vol:3, No:2, 2009, p.357 – 361.

8. Кирилов С.Н. Повышение устойчивости радиолиний передачи информационно-управляющих сигналов к мешающим факторам. / С.Н. Кирилов, И.В. Лукашин, Ю.И. Полтавец, А.В. Поляков, С.А. Круглов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы: Радиотехника и космическая связь. Том 2, выпуск 4, с. 55 – 58, 2015 г.