

DOI: 10.18372/2310-5461.43.13822

УДК 621.37.037

Д. П. Кучеров, д-р техн. наук, старш. наук. співроб.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-4334-4175
e-mail: d_kuchеров@ukr.net;

А. Л. Березкін, аспірант
Інститут проблем моделювання в
енергетиці, імені Г.Є. Пухова НАН України
orcid.org // 0000-0003-3087-1184
e-mail: abis1999@ukr.net

РАДІОКАНАЛ LORA В СИСТЕМІ ОХОРОННОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ

Вступ

Захист периметру — важливий елемент комплексу заходів безпеки об'єктів військового, стратегічного та народно-господарського значення [1]. До останніх відносять нафтопереробні підприємства та термінали нафти, газокompresорні станції та підприємства хімічного виробництва, теплоенергетичні та гідроенергетичні станції, аеропорти, військові арсенали, об'єкти військово-промислового комплексу та ін.

Система охорони периметру дозволяє отримати первісну інформацію про порушення зовнішніх кордонів території, що охороняється, на підставі чого приймаються оперативні заходи за своєчасною нейтралізацією протиправних дій на території об'єкта, що охороняється. Периметрові засоби — складова частина всіх комплексів технічних засобів охорони (ТЗО), що являє собою основу будь-якої системи фізичної захищеності об'єкта. Призначення цієї системи, складається в оперативному і точному встановленні місця проникнення порушника, що виявляється дуже важливим для своєчасного реагування та запобігання порушення [2].

Умови експлуатації пристроїв цього типу відрізняються різноманітністю і діапазоном впливу кліматичних і географічних факторів, їх робота здійснюється в умовах чисельних завод різного походження: акустичних і вібраційних, створених транспортом, електромагнітними, що отримуються від електрообладнання і ліній електропередавання. У зоні контролю можуть знаходитись тварини і птахи, дії яких можуть сприйматися як порушення.

Сигнал порушення виникає в умовах величезного числа зовнішніх чинників, що заважають, характеристики корисних і сигналів, які заважають, можуть перекриватися, що потребує

застосування відповідних алгоритмів оброблення. Складно знайти галузь приладобудування, де є таке розмаїття заводових факторів. Ця обставина визначає важливість розроблення саме периметрових засобів охорони на ринку охоронних технологій.

Різноманітність умов застосування засобів охорони периметру унеможливує використання будь-якого одного або декількох типів апаратури. Дистанційне попередження про порушення периметру, що охороняється за будь-якого часу доби та погодних умов є основним завданням охоронних систем. Вибір комплексу засобів виявлення для охорони периметра визначається також конфігурацією і конструкцією огорожі периметру, наявністю і розмірами так званої «зони відчуження», поведінковими моделями потенційного порушника: його можливостями подолання кордону, що охороняється, характером зовнішніх факторів, техногенними умовами роботи системи охорони, вимогами маскованості сигналізаційних систем і фінансовими можливостями замовника. Ці умови і визначають широку номенклатуру засобів виявлення за периметром.

Найбільшу популярність останнім часом отримали оптичні засоби завдяки їх високій достовірності. Але їх суттєвим недоліком є обмежена дальність виявлення цілей та залежність від часу доби та погодних умов. Альтернативними засобами є радіотехнічні засоби, які мають більшу тривалість роботи, менше залежать від погодних умов, мають більшу дальність виявлення, але вимагають підтвердження достовірності та підлягають впливу радіоперешкод.

Інші засоби, такі як звукові, контактні обмежуються параметрами чутливих сенсорів та мають на даний час незадовільні тактико-

технічні характеристики, але їх комплексне застосування дозволяє отримати бажаний ефект.

Як правило, попередження про порушення периметру здійснюється на відстані 2–3 м з очікуваного напрямку [1; 2]. Вразливим місцем комплексу є радіоканал передавання корисної інформації [3]. Розвиток радіоелектроніки та пов'язаних з нею промислових технологій, робить можливість запровадження нових підходів до створення охоронно-попереджувальних комплексів, що суттєво поширює можливості системи охорони з виконання завдань за призначенням. Серед нових технологій слід зазначити можливість стільникового зв'язку та технологію LoRa [4], які є корисними для «Інтернету речей».

Метою статі є оцінювання можливості побудови радіоканалу передавання даних для охоронно-попереджувальних комплексів з використанням сучасних технологій передачі та прийому інформації, які працюють за протоколом LoRa.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Приклади побудови попереджувальних комплексів охорони периметру наводяться у працях [1–3] та надається структура радіоканалу цих комплексів. У праці [5] проведено аналіз існуючих методів вимірювання радіосигналів та запропоновано сучасний метод вимірювання радіочастоти, який показує легкість виявлення

робочих частот радіопередавальної апаратури. Математичні основи вирішення проблеми передавання інформації, у тому числі з використанням технології LoRa надається у праці [4]. У працях [5; 8] розглядається проблема багатопроблемного розповсюдження радіохвиль та пропонуються шляхи для її вирішення. Монографія [6] містить опис ряду Інтернет-протоколів. У праці [8] описані особливості застосування технології LoRa. При цьому залишається актуальним оцінювання технології LoRa в умовах оброблення великої кількості пакетної інформації з урахуванням реальних втрат інформації.

Обговорення протоколів

Передавання інформації в інформаційних мережах здійснюють пакетами, які можуть слідувати у синхронному та асинхронному режимах (протоколах) [6]. Передавання даних синхронним протоколом потребує одночасну роботу передатчика та приймача в такт або синхронно за рахунок застосування сигналів синхронізації. В асинхронному режимі передавання даних здійснюється у вільний час, але пакет даних обрамляє старт-стопові символні послідовності. Відмінності між протоколами за найбільш важливими характеристиками наведені в таблиці.

Таблиця 1

Порівнювальна характеристика протоколів

Протокол	Енерговитрати	Швидкість передачі	Часові втрати	Реалізація
синхронний	витратний	значна	незначні	складна
асинхронний	економний	повільна	можливі втрати	проста

Із аналізу таблиці не бачимо однозначної переваги одного протоколу над іншим, можливим є комплексне їх застосування, але вважається доцільним детальне обговорення сучасних радіомережових технологій.

Для передавання даних від кінцевих пристроїв сьогодні є декілька спеціалізованих стандартів. Стандарт eMTC (enhanced Machine-Type Communication) розгортається на основі мобільних мереж LTE, а EC-GSM-IoT (Extended Coverage — GSM — Internet of Things) діє поверх мережі GSM. Але найбільш популярним є стандарт NB-IoT (Narrowband IoT). Його особливість виявляється в тому, що він може бути розгорнутий, як в мережах GSM чи LTE, так і незалежно, окремою мережею.

Основними вимогами до пристроїв IoT є низька вартість та мінімальне енергоспоживання. Альтернативою вказаним мережам є технологія LoRaWAN, яка з'явилась у 2015 році та рішуче

впроваджується у життя. Але є істотне обмеження: засоби, що випромінюють, створюють перешкоди у нормальній роботі. Радіоефір погіршується з віддаленістю від центру, які функціонують на великих підприємствах та наявністю інтерференційних перешкод.

Поганий стільниковий зв'язок, далека відстань від населених пунктів, віддаленість мереж Інтернету, потреби обслуговування, електроживлення ускладнює, або робить неможливим використання вищезгаданих технологій передачі даних. Усе це надає перевагу LoRa.

Кінцеві пристрої формують «зіркову» мережеву архітектуру, центральним елементом якої є прийомо-передатчик на пункт управління. Мережева безпека забезпечується подвійним шифруванням. Низьке споживання енергії досягається за рахунок короткого часу передачі інформації у відносно великому часовому інтервалі, більшість з яких — кінцевий пристрій

знаходиться в режимі «сну». Передача може здійснюватися в синхронних і асинхронних режимах, в останньому випадку використовується підтвердження.

Основою технології LoRa є сигнали з лінійною частотною модуляцією з інтегрованою передньою корекцією помилок. Перевагами цієї технології є краща чутливість приймального пристрою, висока стійкість до шуму каналу і нечутливість до частотних зрушень кварцових резонаторів.

Рішення на основі технології LoRa передбачають передачу невеликої кількості даних від великої кількості сенсорів. Вони характеризуються гарантованою передачею-отриманням інформації, тобто, якщо за якої-небудь причини інформацію від сенсора не отримано, то дані будуть оновлені під час наступного сеансу передавання інформації.

Постановка проблеми

Розглядається система передавання повідомлень від сенсорів до пункту оброблення інформації по радіоканалу в обраному діапазоні частот. Дані передаються з певною швидкістю, яка залежить від діапазону і ширини смуги пропускання і відповідно до коефіцієнта розповсюдження.

Основним випромінюваним сигналом є лінійний частотно-модульований імпульсний сигнал, який в даний час є стандартом в області бездротових систем близького зв'язку (IEEE 802.15.4a). Цей сигнал математично записується у формі

$$y(t) = A(t) \cos(2\pi f_0 t + \pi \mu t^2). \quad (1)$$

У виразі (1) $A(t)$ — амплітуда сигналу, $A = 0$, якщо $|t| > \tau/2$, де τ — тривалість пакета; t — час; f_0 — початкова частота випромінювання; μ — параметр, що визначає швидкість зміни частоти в часі.

Корисний сигнал має двійкову форму, значення сигналу логічне «1» відповідає збільшенню частоти, тоді у цьому випадку $\mu > 0$, в іншому випадку, тобто коли маємо сигнал логічний «0», що відповідає зменшенню частоти і $\mu < 0$. Припускаємо, що сигнали в системі відповідають технології LoRa [5; 8].

Прийом сигналів здійснюється в умовах перешкод різних типів, наприклад, можливі перешкоди від зовнішніх або близьких випромінювачів. Сигнал на вході приймального пристрою виглядає так:

$$s(t) = y(t) + n(t) + w(t) = y(t) + n'(t), \quad (2)$$

де $n(t)$ — білий шум з нульовим середнім; $w(t)$ — інтерференція, зумовлена відбиттям, $n'(t) = n(t) + w(t)$ — гаусівський шум з нульовим середнім.

Вважається, що інформація, яка передається, утворює пакет, що відповідає технології LoRa. Подальшою метою є розгляд технології LoRa в умовах пакетної передачі даних.

Ставиться завдання визначення ефективності дії радіоканалу LoRa за показниками ймовірності передавання пакетів та дальності дії в умовах перешкод.

Прийом пакетів

Ефективним показником якості прийнятого пакету даних у заводовому або шумовому середовищі є ймовірність помилки передачі пакету даних p_p , яка може бути виражена відношенням

$$p_p = 1 - (1 - p_e)^N, \quad (3)$$

де p_e — ймовірність бітової помилки інформаційного біта або швидкості бітових помилок (BER); N — кількість бітів в пакеті.

Припускаючи p_e малим, отримуємо

$$p_p \approx p_e N. \quad (4)$$

Для зменшення помилок при передачі інформаційних пакетів, якщо вони мають однакову довжину пакета N , необхідно зменшити значення бітової помилки p_e , як випливає з виразу (4).

Відомо [4], що для оцінки BER при поданні каналу передачі адитивною моделлю є доцільним застосування білого гаусівського шуму. Отже, BER модуляції бінарної фазової маніпуляції (Binary Phase Shift Keying, BPSK) є

$$p_e = 0,5 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right), \quad (5)$$

для двійкової частотної маніпуляції (Frequency Shift keying, 2FSK) модуляції

$$p_e = 0,5 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}} \right), \quad (6)$$

для двійкової маніпуляції несучої (Binary Offset Carrier, BOC)

$$p_e = 0,5 \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{4N_0}} \right). \quad (7)$$

У рівняннях (5)–(7) E_b — енергія біта, N_0 — спектральна щільність білого шуму, і

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt. \quad (8)$$

Ураховуючи, що коефіцієнт E_b/N_0 еквівалентний відношенню сигнал/шум, вирази підтверджують фізично очевидний зв'язок, коли збільшення відношення E_b/N_0 призводить до зменшення помилок при передачі пакету даних і відповідно зростає зі збільшенням шуму в каналі (рис. 1). Розрахунок кривих на рис. 1 виконано для модуляції BPSK.

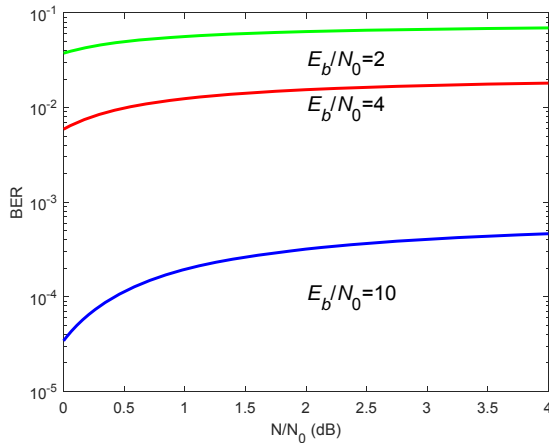


Рис. 1. Показник BER за різних значень співвідношення E_b/N_0

Як можна бачити з рис. 1, збільшення співвідношення E_b/N_0 у п'ять разів призводить до зменшення ймовірності бітової помилки в 1000 разів. Аналогічна ситуація відбувається і в модульованні сигналу з лінійно-частотною модуляцією.

Управління потоком пакетів

Розглянемо метод управління потоком даних з автоматичним повтором запиту (ARQ) [6]. У цьому випадку, якщо вибіркове відхилення повторюється, то повторюються тільки ті пакети, які були пошкоджені, і пакети, час очікування яких минув.

Нехай джерело інформації передає пакети фіксованої довжини $T_{\text{пак}}$, приймальний бік підтверджує отримання запиту. Позначимо час передавання даних в одному напрямку є $T_{\text{напр}}$. Вважається, що тривалість часу оброблення пакетів і підтвердження передачі дуже мала, тому ними можна знехтувати, а тоді час, необхідний для передачі одного пакета

$$T = T_{\text{пак}} + T_{\text{напр}}. \quad (9)$$

За необхідності, повторити передачу одного пакету до успішного прийому N -разів, тоді цей час збільшується до значення

$$T = N(T_{\text{пак}} + 2T_{\text{напр}}). \quad (10)$$

Уведемо також ймовірність пошкодження пакету p . Розглянемо запропоновану схему передачі пакетів.

Будемо оцінювати пропускну здатність каналу C кількістю переданих пакетів в одиницю часу. У нашому випадку пропускну здатність обчислюється так

$$C = \frac{T_{\text{пак}}}{T} = \frac{T_{\text{пак}}}{T_{\text{пак}} + 2T_{\text{напр}}}. \quad (11)$$

Позначимо $\bar{t} = T_{\text{напр}} / T_{\text{пак}}$, тоді вираз (11) можна записати у вигляді

$$C = \frac{1}{1 + 2\bar{t}}. \quad (12)$$

Пропускна здатність C у виразі (12) подана в нормованому вигляді та приймає значення в інтервалі $[0; 1]$. Якщо $\bar{t} < 1$, тоді $C \rightarrow 1$, що відповідає високопродуктивному каналу, а якщо $\bar{t} > 1$, тоді $C \rightarrow 0$, що відповідає каналу з низькою продуктивністю.

Якщо виникає помилка передавання, і виникає необхідність повторення передавання даних, пропускну здатність каналу погіршується в N -разів

$$\tilde{N}(\bar{t}) = \frac{1}{N(1 + 2\bar{t})}. \quad (13)$$

У загальному випадку N у виразі (13) є випадковим значенням, яке для тривалого інтервалу передачі визначається ймовірністю

$$N = \sum_{k=1}^{\infty} kp^{k-1}(1-p), \quad (14)$$

де k — кількість повторів передавання для $p < 1$.

Згідно з [7, формула (21.2-39)] рівність (14) перетворюється у

$$N = \frac{1}{1-p}, \quad (15)$$

тоді (13) записується виразом

$$C(\bar{t}) = \frac{1-p}{1+2\bar{t}} \quad (16)$$

Оцінимо канал за виразом (16), розглянемо випадок, коли передача помилок відсутня.

Нехай час зв'язку отримання інформації складає $M \geq 1 + 2\bar{t}$, тоді канал працює без перевантаження пакетів та відповідає випадку ідеального проходження пакетів, тоді відповідно до виразів (12), (16) приймає граничне значення $C = 1$.

Тепер розглянемо випадок, коли за N кроків повторно передаються L пакетів. Представимо повернену кількість кроків N функцією числа переданих пакетів

$$N = \sum_{k=1}^{\infty} f(k)p^{k-1}(1-p). \quad (17)$$

У (17) $f(k)$ — загальна кількість повторно переданих пакетів, що передаються k разів. Представимо функцію $f(k)$ як [6]

$$f(k) = 1 + (k-1)L. \quad (18)$$

Після підстановки виразу (18) у (17) отримуємо кількість повторюваних пакетів

$$N = \frac{1-p + Lp}{1-p}. \quad (19)$$

Для отримання виразу (19) суттєво використано результати (21.2-38) і (21.2-39) у праці [7].

Підставляючи вираз (19) у формулу (13) і вважаючи, що розмір часу передавання узгоджений з кількістю переданих пакетів, тобто $M = L$, мож-

на отримати пропускну здатність випадку з поверненням на N кроків

$$C(\bar{t}) = \begin{cases} \frac{1-p}{1-p+Mp}, & \text{if } M \geq 1+2\bar{t}, \\ \frac{M(1-p)}{(1+2\bar{t})(1-p+Mp)}, & \text{if } M < 1+2\bar{t}. \end{cases} \quad (21)$$

Якщо кількість втрачених пакетів $M = 1$, отримуємо вихідний результат (16).

Проведемо аналіз отриманих результатів. Нехай ймовірність помилок при передачі пакетів даних становить $p = 10^{-3}$. Значення кількості байтів M вибираємо рівними 1, 7, 127 переданого пакету. Результати моделювання (21) подано на рис. 2.

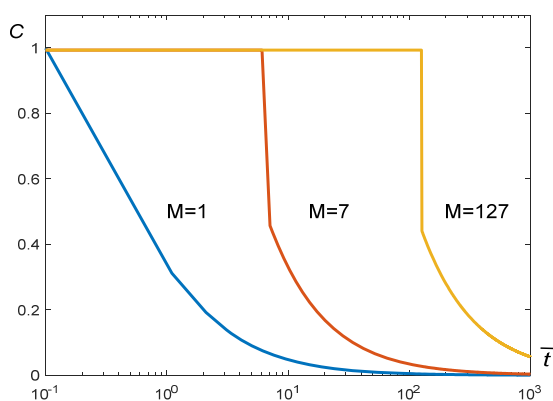


Рис. 2. Пропускна здатність каналу з повторення передачі пакетів розмірами $M = 1$, $M = 7$ та $M = 127$ байтів

Значення числа \bar{t} визначається часом передачі і часу розповсюдження пакетів до точки управління. Враховуючи різні швидкості передачі даних і різні пакети передач, значення цієї змінної знаходяться в інтервалі від 0 до 1000. Збільшення часу передавання-приймання пакетів призводить до збільшення пропускну здатності системи.

Дальність дії радіоканалу

Бюджет каналу зв'язку, що розглядається, складається з урахуванням складових, що включають фактори підвищення і втрати в каналі поширення, до цільового приймача. Тоді бюджет зв'язку мережевої бездротової лінії зв'язку може бути розрахований так [8]:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_s - L_s - L_{ch} - M, \quad (22)$$

де P_{RX} — очікувана потужність на вході приймача; P_{TX} — потужність передавача; G_s — підсилення, що пов'язане з використанням спрямованих антен; L_s — втрати, пов'язані з системою, такі як лінії живлення, антени (у випадку електричних), короткі антени, пов'язані з багатьма

віддаленими пристроями тощо; L_{ch} — втрати, пов'язані з каналом поширення; M — рівень затухання, розрахований, або з емпіричних даних.

Усі величини рівняння повинні бути виражені в дБ.

Визначимо тепер розрахункову дальність каналу радіозв'язку для прийомо-передатчика на основі LoRa сконструйованого на мікросхемі SX1276, яка працює на частоті 868 МГц зі швидкістю передавання даних 27 кбіт/с та рівнем чутливості — 104 дБм. Для потужності передатчика 1 мВт, ідеального передавального та приймального диполів з коефіцієнтом підсилення 2,1 дБ бюджет каналу становить 108,2 дБ.

Максимальна відстань радіозв'язку прямого бачення для висот приймальної та передавальної антен 1 м в умовах нормальної рефракції дорівнюється приблизно 8,24 км.

Розрахунок потужності приймального сигналу залежно від відстані r в умовах без завад проведено за формулою Введенського [9]. Відстань, що відповідає реальній чутливості за умовами розрахунку, становить 700 м, рис. 3.

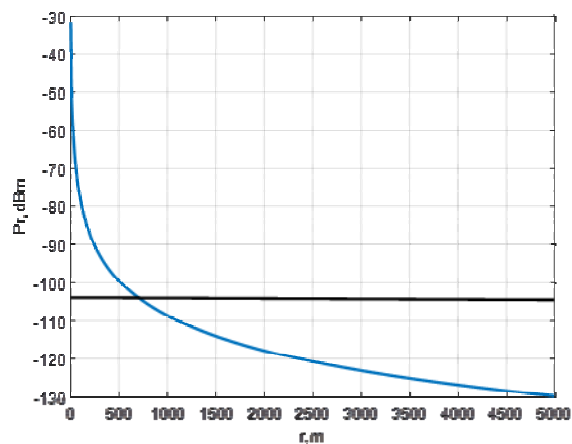


Рис. 3. Оцінка відстані приймального пристрою

Аналіз рис. 3 показує більшу мінімальну дальність попередження, ніж ту, що забезпечується виробами, описаними у праці [1].

Висновки

На перший погляд, здається, що завдання охорони можуть бути ефективно вирішені шляхом віддалення зовнішньої огорожі, оскільки у цьому випадку зловмисникові потрібно більше часу для подолання відстані до цілі і, відповідно, більше часу залишається для дій сил охорони. Однак у цьому випадку подовжується периметр об'єкта.

Відповідно збільшуються витрати на технічні засоби і їх експлуатацію, а також необхідна чисельність сил охорони.

Для багатьох підприємств є актуальною проблема розкрадання матеріальних цінностей, що перекидаються через периметрову огорожу. Збільшення висоти огорожі або відстані до перешкоди з внутрішнього боку не завжди кращий спосіб для її вирішення. Найчастіше доцільніше використовувати з цією метою периметрові ЗО, розташовані з внутрішнього боку огорожі на максимальній відстані від нього.

Організація єдиної периметрової охорони підприємства, до складу якого входить декілька розташованих на виділеній території об'єктів, пов'язаних єдиним технологічним циклом, економічно доцільна в тому випадку, якщо захист окремих об'єктів в сумі обходиться дорожче загального периметра.

На підставі проведеного аналізу встановлено, що охоронно-попереджувальні засоби, які використовуються для попередження про дії порушника використовують радіоканал для передавання даних від інформаційних сенсорів є більш ефективними ніж інші. Застосування сучасних технологій може значно підвищити захищеність радіоканалу від завад та збільшити дальність попередження. В якості такої технології пропонується LoRaWAN для побудови радіомережі передавання розвідувально-сигнальної інформації, яка може передаватися як в синхронному, так і асинхронному режимах. Передавання пакетами краще здійснювати в асинхронному режимі, завдяки чому зменшується ймовірність помилок в пакеті та збільшується пропускна здатність радіоканалу, завдяки застосуванню механізму ARQ. Окрім цього, в останньому випадку досягається значна економія ресурсів прийомо-передавальних пристроїв. Розрахунки мінімальної відстані показали, що навіть незначна висота

розміщення антен приймально-передавальних пристроїв (1 м) за технологією LoRa дозволяє досягти більшої потрібної мінімальної відстані.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Магауєнов Р. Г.** Системы охранной сигнализации: основы теории и принципы построения. М. : Горячая линия-Телеком, 2004. 367 с.
2. **Иванов И. В.** Охрана периметров. М. : ПАРИТЕТ ГРАФ, 2000.
3. **Губин С. Г.** Синхронно сетевой протокол разведывательно-сигнализационного комплекса «Радиобарьер». Труды XVII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона» (20–22 апреля 2016, Новосибирск, Россия). С. 35–40.
4. **Berezkin A. L., Onikienko L. S., Kucherov D. P.** Detection of Signals from a LoRa System Under Interference Conditions. 2018 International Scientific-Practical Conference *Problems of Infocommunications. Science and Technology (PICS&T-2108)* (October 9–12, 2018, Kharkov, Ukraine). P. 437–441.
5. **Березкін А. Л., Кучеров Д. П.** Визначення несучої частоти радіосигналу за цифровими технологіями. *Вісник інженерної академії України*. 2016. Вип. 4. С. 80–85.
6. **Столлинс В.** Современные компьютерные сети. СПб. : Питер, 2003. 784 с.
7. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М. : Наука, 1968. 832 с.
8. **AN1200.22.** LoRa™ Modulation Basics. Revision 2, May 2015. 2015 Semtech Corporation, Wireless Sensing and Timing Products Division. Pp. 1–26.
9. **Долуханов М. П.** Дальнее тропосферное распространение ультракоротких волн. М. : Связьиздат, 1962. 177 с.

Кучеров Д. П., Березкін А. Л.

РАДІОКАНАЛ LORA В СИСТЕМІ ОХОРОННОЇ СИГНАЛІЗАЦІЇ

У статті обґрунтовується важливість застосування охоронно-попереджувальних засобів для побудови периметрової охорони «великих» промислових об'єктів, таких як нафтопереробні та металургійні комбінати, військові склади і арсенали, атомні електростанції та інші стратегічні об'єкти на нових принципах побудови радіоканалу, який вважається кращим для великих площ охорони і задовольняє умові все-погодності. Оскільки радіоканал виявляється схильним до впливу перешкод, як новий підхід пропонується використання Інтернету речей за LoRa радіо-протоколом, де передбачається використання широкосмугових сигналів, а саме сигналів з лінійною-частотною модуляцією в пакетному режимі. В основі аналізу знаходиться припущення про адитивність прийому корисного сигналу на тлі гаусових перешкод з нульовим середнім, що дозволяє інтерференційні перешкоди і шум вважати як один сигнал перешкоди. Пакетний режим передачі інформації аналізується з точки зору ймовірності помилок в пакеті і пропускної здатності. Встановлено залежності ймовірності бітової помилки від довжини пакета для різних відносин сигнал-шуму і типів двійкової фазової модуляції, що дозволяє поширити ці співвідношення на ЛЧМ-сигнали. Отримано також співвідношення для ефективного механізму передачі потоку з повторенням в умовах втрати інформації і дана оцінка пропускної здатності каналу. Надаються оцінки відстані передачі інформації для реального каналу радіозв'язку для прийомо-передавача на основі модуля LoRa сконструйованого на мікросхемі SX1276. Оцінка дальності дії радіоканалу проведена з урахуванням прогнозованих втрат передачі і прийому, а також проведена її оцінка за реальною чутливістю прийомо-передавача, для отримання якої суттєво використана формула Введенського. Отримані співвідношення підтверджуються моделюванням.

Ключові слова: охоронно-попереджувальні засоби; протокол; лчм-сигнал; LoRa; радіоканал.

**Kucherov D., Berezkin A.
RADIO CHANNEL LORA IN THE ALARM SYSTEM**

The article substantiates the importance of using security and warning means for the construction of perimeter security for "large" industrial facilities, such as oil refineries and metallurgical plants, military depots and bases, nuclear power plants and other strategic facilities based on new principles for constructing a radio channel, which is considered more preferable for large areas protection and satisfies all-weather condition. Since the radio channel is exposed to radio interference, the use of the Internet of things using LoRa radio-protocol is proposed as a new approach, where it is assumed to use broadband signals, namely, signals with linear-frequency modulation in packet mode. The analysis is based on the assumption of the additivity of the reception of a useful signal against a background of Gaussian noise with a zero mean, which allows interference and noise to be presented as a single interference signal. The packet mode of information transmission is analyzed in terms of the probability of errors in the packet and throughput. The dependences of the probability of a bit error on the packet length for various signal-to-noise ratios and types of binary phase modulation are established, which makes it possible to extend these relations to the chirp - signals. Relations are also obtained for an effective mechanism for transmitting a stream with repetition under conditions of information loss and an estimate of the channel capacity is given. Estimates are provided of the information transmission distance for a real radio channel for a transmitter-receiver based on the LoRa module constructed on the SX1276 chip. The range of the radio channel was estimated taking into account the predicted transmission and reception losses, and it was also estimated based on the real sensitivity of the transmitter-receiver, for which the Vvedensky formula was essentially used. The obtained relations are confirmed by modeling.

Keywords: alarm systems; protocol; chirp signal; LoRa; radio channel.

**Кучеров Д. П., Березкин А. Л.
РАДИОКАНАЛ LORA В СИСТЕМЕ ОХРАННОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ**

В статье обосновывается важность применения охранно-предупредительных средств для построения периметровой охраны «больших» промышленных объектов, таких как нефтеперерабатывающие и металлургические комбинаты, военные склады и базы, атомные электростанции и другие стратегические объекты на новых принципах построения радиоканала, который считается более предпочтительным для больших площадей охраны и удовлетворяет условию всепогодности. Поскольку радиоканал оказывается подверженным воздействию радиопомех, в качестве нового подхода предлагается использование Интернета вещей по LoRa радио-протоколу, где предполагается использование широкополосных сигналов, а именно сигналов с линейной-частотной модуляцией в пакетном режиме. В основе анализа находится предположение об аддитивности приёма полезного сигнала на фоне гауссовых помех с нулевым средним, что позволяет интерференционные помехи и шум представить как один сигнал помехи. Анализируется пакетный режим передачи информации с точки зрения вероятности ошибок в пакете и пропускной способности. Установлены зависимости вероятности битовой ошибки от длины пакета для различных отношений сигнал-шум и типов двоичной фазовой модуляции, что позволяет распространить эти соотношения на лчм-сигналы. Получены также соотношения для эффективного механизма передачи потока с повторением в условиях потери информации и дана оценка пропускной способности канала. Предоставляются оценки расстояния передачи информации для реального канала радиосвязи для приёмопередатчика на основе модуля LoRa сконструированного на микросхеме SX1276. Оценка дальности действия радиоканала проделана с учётом прогнозируемых потерь передачи и приёма, а также произведена её оценка по реальной чувствительности приёмопередатчика, для получения которой существенно использована формула Введенского. Полученные соотношения подтверждаются моделированием.

Ключевые слова: охранно-предупредительные средства; протокол; лчм-сигнал; LoRa; радиоканал.

Стаття надійшла до редакції 02.08.2019 р.
Прийнято до друку 13.09.2019 р.