

УДК 621.396.62

# Метод автоматичного визначення параметрів радіосигналів сформованих за стандартом LoRa

*Нагорнюк О. А.*

Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, м. Житомир, Україна

E-mail: *Nahorniuk@i.ua*

Радіосигнали сформовані за стандартом LoRa (далі – радіосигнали LoRa) широко використовуються в телекомунікаційних системах як цивільного, так і військового призначення, що обумовлено насамперед їх високою перешкодостійкістю. В статті удосконалено математичну модель радіосигналу LoRa, показано взаємозв'язок між модуляційними параметрами радіосигналу, параметрами кодування та швидкістю передачі даних і перешкодостійкістю. Проаналізовано характеристики сучасних радіоелектронних компонентів, які підтримують технологію LoRa, та встановлено межі діапазонів зміни модуляційних параметрів, що можуть бути застосовані в радіосигналі. Запропоновано метод автоматичного визначення параметрів радіосигналів LoRa, який складається із 4-х етапів. На першому етапі розраховуються несуча частота та ширина спектра за характеристиками амплітудно-частотного спектра сигналу. На другому етапі обчислюється тривалість інформаційного символу шляхом аналізу особливостей автокореляційної функції. Отримані модуляційні параметри округлюються до найближчих сталих значень відповідно до методу мінімальної метрики. На третьому етапі обчислюється фактор розширення, який аналітично пов'язаний із шириною спектра та тривалістю інформаційного символу. На четвертому етапі визначається напрямок зміни частоти радіосигналу LoRa. Для цього синтезуються два узгоджені фільтри (для up-chirp та down-chirp символів), налаштування яких відповідають обчисленим на попередніх трьох етапах параметрам радіосигналу LoRa. Рішення про напрямок зміни частоти приймається за максимальною амплітудою сигналів на виході узгоджених фільтрів. Ефективність запропонованого методу перевірено шляхом моделювання в програмному середовищі MATLAB та технічного аналізу радіосигналів відомих протоколів передачі даних стандарту LoRa. Показано, що метод дозволяє правильно визначити параметри радіосигналів LoRa із ймовірністю близькою до 1 при відношенні сигнал/шум від -5 дБ.

*Ключові слова:* метод; радіосигнал; LoRa; лінійна частотна модуляція; параметр; ширина спектра; фактор розширення; автоматизація

DOI: [10.20535/RADAP.2024.95.23-30](https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.95.23-30)

## 1 Постановка проблеми в загальному вигляді

Радіосигнали сформовані за стандартом LoRa (далі – радіосигнали LoRa) широко використовуються в радіоелектронних засобах як цивільного, так і військового призначення, що обумовлено рядом їх переваг, серед яких: велика дальність радіозв'язку (до 15 км на відкритій місцевості, до 5 км у міській забудові) при низькій потужності передавача; висока перешкодостійкість, скритність та розвідзахищеність; варіативна пропускна здатність (можна вибрати меншу відстань, вищу пропускну здатність або більшу відстань, меншу пропускну здатність); можливість використання нелінійних підсилювачів класу С; низька вартість розгортання радіомережі [1–3]. Враховуючи вказані переваги радіосигнали LoRa застосовуються в мережах Інтернету речей (Internet of things), в командно-телеметричних ра-

діолініях безпілотних авіаційних та наземних систем, в радіомережах обміну короткими повідомленнями, в пристроях дистанційного радіокерування (в тому числі і радіоканалах керування вибуховими пристроями) тощо [1–3].

Встановлення факту застосування радіоелектронних засобів із радіосигналами LoRa та визначення їх параметрів є важливим завданням, яке вирішується в процесі радіомоніторингу та радіорозвідки. Отримані значення параметрів використовуються для ідентифікації радіоелектронного засобу, формування прицільних за частотою та узгоджених за структурою радіоперешкод тощо. Тому актуальним науково-практичним завданням є удосконалення існуючих та розроблення нових підходів до автоматичного визначення параметрів радіосигналів LoRa.

## 2 Аналіз останніх досліджень і публікацій

Переважає більшість опублікованих наукових праць за стандартом LoRa присвячена дослідженням спектральної та енергетичної ефективності, перешкодостійкості радіосигналів, а також дальності радіозв'язку [4–11]. В [12] розроблено метод підвищення спектральної ефективності шляхом одночасної передачі на одному часовому/частотному ресурсі радіосигналів, призначених для різних приймачів. У [13] створено багатовузлову систему виявлення сигналу LoRa на основі технології програмно-визначеного радіо та нейронної мережі. У [14] здійснюється класифікація радіосигналів LoRa на основі апаратного забезпечення Xilinx radio frequency system-on-chip. У [15] запропоновано підхід до оцінювання параметрів однокомпонентного сигналу з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ), що ґрунтується на відношенні максимальної правдоподібності та методі глибокого навчання. В ряді робіт наводяться математичні моделі радіосигналів LoRa [5–9, 12, 14]. Аналіз показав, що в доступних наукових дослідженнях і публікаціях приділяється мало уваги визначенню параметрів радіосигналів LoRa в умовах апіорної невизначеності, а відомі підходи обмежені можливостями технічних засобів [14] та діапазоном можливих значень параметрів [15]. Наявні математичні моделі переважно описують радіосигнал на часовому відрізку, що дорівнює одному символному періоду.

## 3 Формулювання завдання дослідження

Технічний аналіз сигналів відомих протоколів передачі даних, які ґрунтуються на стандарті LoRa (ExpressLRS, FrSky R9M Crossfire тощо), показав, що в більшості із них ЛЧМ комбінується із розширенням спектра методом псевдовипадкової перестройки робочої частоти (ППРЧ). Тому, виникає потреба в удосконаленні математичної моделі радіосигналу та розробленні методу визначення параметрів радіосигналу LoRa в умовах апіорної невизначеності, що і є **метою** даних досліджень.

Вважається, що радіосигнал на передавальній стороні сформовано відповідно до визначених стандартом LoRa вимог. Параметри модуляції на ділянці сигналу, що аналізується, постійні, а попередня інформація про їх можливі значення відсутня, що відповідає умовам апіорної параметричної невизначеності. При розповсюдженні сигнал зазнає впливу каналу, що описується гаусівською моделлю. В такому разі сигнал на проміжній частоті  $r(t)$  для одного пакету даних (часового слоту, частотного елемента

ППРЧ) можна записати у вигляді:

$$r(t) = s(t) e^{j2\pi f_c t} + \xi(t), \quad (1)$$

де  $f_c$  – несуча частота;  $\xi(t)$  – адитивний гаусівський шум;  $s(t)$  – послідовність ЛЧМ сигналів на нульовій частоті:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \left( e^{j\phi_k(t-kT_c)} \right), \quad (2)$$

де  $k \in \{0, 1, \dots, K-1\}$ ;  $K$  – кількість інформаційних символів, що передаються в пакеті даних;  $T_c$  – тривалість інформаційного символу;  $\phi_k(t)$  – залежність повної фази  $k$ -го інформаційного символу від часу:

$$\phi_k(t) = 2\pi \int_{-\infty}^t f_k(t') dt', \quad (3)$$

де

$$f_k(t) = \begin{cases} k_v \left( \frac{B_c}{T_c} t + \frac{m(k)}{T_c} - \frac{B_c}{2} \right), & t \in T_a \\ k_v \left( \frac{B_c}{T_c} t + \frac{m(k)}{T_c} - \frac{3B_c}{2} \right), & t \in T_b \end{cases}, \quad (4)$$

де  $B_c$  – ширина амплітудно-частотного спектра (АЧС);  $m(k) \in \{0, 1, \dots, 2^{SF}-1\}$  –  $k$ -й інформаційний символ розмірністю  $SF$  біт;  $SF$  – фактор розширення спектра;  $k_v \in \{-1, 1\}$  – коефіцієнт, що характеризує зростання (up-chirp) або спадання (down-chirp) частоти в часі.

Часові межі  $T_a$  та  $T_b$  розраховуються за формулами:

$$\begin{aligned} T_a &= [kT_c, (k+1)T_c - \gamma(k)]; \\ T_b &= [(k+1)T_c - \gamma(k), (k+1)T_c]; \\ \gamma(k) &= \frac{m(k)}{B_c}. \end{aligned} \quad (5)$$

Підставивши вираз (4) в (3), отримуємо:

$$\phi_k(t) = \begin{cases} 2\pi k_v \left( \frac{B_c}{2T_c} t^2 + \left( \frac{m(k)}{T_c} - \frac{B_c}{2} \right) t \right), & t \in T_a \\ 2\pi k_v \left( \frac{B_c}{2T_c} t^2 + \left( \frac{m(k)}{T_c} - \frac{3B_c}{2} \right) t \right), & t \in T_b \end{cases}. \quad (6)$$

Після здійснення операції аналого-цифрового перетворення сигналу  $r(t)$  з частотою дискретизації  $F_s$  отримуємо масив комплексних відліків  $r[i]$ . Необхідно визначити несучу частоту  $f_c$ , ширину спектра  $B_c$ , тривалість інформаційного символу  $T_c$ , фактор розширення спектра  $SF$  та коефіцієнт  $k_v$ .

## 4 Виклад основного матеріалу

### Основні параметри стандарту LoRa

Бітова  $R_b$  та символна швидкість  $R_s$  стандарту LoRa залежить від ширини АЧС та фактору розширення [5]:

$$R_b = \frac{SF \cdot B_c}{2^{SF}}; \quad R_s = \frac{B_c}{2^{SF}}. \quad (7)$$

Для підвищення перешкодостійкості в протоколі LoRa передбачена можливість перешкодостійкого кодування із змінною швидкістю кодування  $C_R \in \{\frac{4}{5}, \frac{4}{6}, \frac{4}{7}, \frac{4}{8}\}$ . Бітова швидкість передачі даних з врахуванням перешкодостійкого кодування  $R_{bc}$  визначається як [9,10]:

$$R_{bc} = \frac{SF \cdot B_c}{2^{SF}} C_R. \quad (8)$$

Виграш в перешкодостійкості за рахунок розширення спектра методом ЛЧМ визначається коефіцієнтом  $G$ , який розраховується за формулою [4]:

$$G = 10 \log \left( \frac{2^{SF}}{SF} \right), \quad (9)$$

де  $G$  – коефіцієнт в дБ, що визначає виграш в перешкодостійкості за рахунок розширення спектра у порівнянні із сигналом без розширення.

Із (9) видно, що використовуючи більші значення  $SF$  можна забезпечити роботу радіолінії LoRa при нижчих відношеннях сигнал/шум (ВСШ). Так при  $SF = 5$ , коефіцієнт  $G = 8,1$  дБ, а при  $SF = 12$  досягає значення  $G = 25,3$  дБ. Сумісне використання великих значень  $SF$  та перешкодостійкого кодування з значною надлишковістю, дозволяє приймачеві LoRa працювати при рівні вхідного сигналу до -148 дБм [16].

Платою за перешкодостійкістю при високих значеннях  $SF$  є зменшення швидкості передачі даних (обчислюється за виразом (8)), яка залежно від встановлених параметрів варіюється в межах від 180 біт/с до 62,5 кбіт/с [17].

Таким чином, змінюючи три параметри радіосигналу LoRa ( $SF$ ,  $B_c$ ,  $C_R$ ) можна регулювати пропускну здатність каналу, потужність передавача (зменшувати при великих значеннях  $SF$  і малих  $C_R$ ) та час перебування в ефірі, який впливає на час автономної роботи пристрою.

Слід відмітити, що радіосигнали LoRa передані із різними факторами розширення, є ортогональними між собою і не викликають зіткнень, якщо передаються одночасно [12, 18].

На початку кожного пакету радіосигналу LoRa передається набір символів преамбули кількістю  $n_p$ , яка для відомих протоколів заходиться в межах –  $n_p \in \{5, 6, \dots, 14\}$ .

Аналіз технічної документації на радіоелектронні компоненти [16–25], які підтримують технологію LoRa, показав, що вони дозволяють формувати радіосигнали у широкому діапазоні частот, обмеженому лише характеристиками синтезатора частот, наприклад трансивери:

SX1272/73 працюють в діапазоні 860-1020 МГц із кроком перестройки 61 Гц [19];

SX1276/77/78/79 працюють в діапазоні 137-1020 МГц із кроком перестройки 61 Гц [20, 21];

SX1261/62 працюють в діапазоні 150-960 МГц із кроком перестройки 0,95 Гц [17];

LLCC68 працюють в діапазоні 150-960 МГц із кроком перестройки 0,95 Гц або 122 Гц [22];

SX1280/81 працюють в діапазоні 2400-2500 МГц із кроком перестройки 198 Гц [18].

Однак в готових технічних рішеннях, реалізованих у вигляді окремих модулів, діапазон частот суттєво зменшується. Наприклад, робочий частотний діапазон модуля E32-900T30D на основі трансивера SX1262 обмежений від 850,125 МГц до 930,125 МГц [16], модуля E32-900T30D на основі трансивера SX1276 – від 862 МГц до 930 МГц [23], модуля E32-433T30D на основі трансивера SX1278 – від 410 МГц до 441 МГц [21], а модуля ELRS 2.4G Diversity на основі трансивера SX1280 – від 2400 МГц до 2480 МГц.

Ширина АЧС радіосигналу LoRa в частотному діапазоні 137-1020 МГц може приймати значення в межах 7,8-500 кГц [17–21], але на практиці переважно застосовуються лише декілька її сталих значень  $B_c \in \{125, 250, 500\}$  кГц [3, 9].

Ширина АЧС радіосигналу LoRa в частотному діапазоні від 2400–2500 МГц може приймати 4 значення –  $B_c \in \{203, 125, 406, 25, 812, 5, 1625\}$  кГц [6, 18].

Фактор розширення знаходиться в межах від 5 до 12 –  $SF \in \{5, 6, \dots, 12\}$  [16–25].

Ширина АЧС, тривалість інформаційного символу та фактор розширення аналітично пов'язані між собою виразом:

$$T_c = \frac{2^{SF}}{B_c}. \quad (10)$$

Використавши формулу (10) обчислено можливі сталі значення тривалості інформаційних символів:

для діапазону 137-1020 МГц –  $T \in \{64, 128, \dots, 64 \cdot 2^n\}$  мкс,  $n = 9$ ;

для діапазону 2400-2500 МГц –  $T \in \{19, 6923, 39, 3846, \dots, 19, 6923 \cdot 2^n\}$  мкс,  $n = 10$ .

Отже низка параметрів радіосигналів LoRa є елементами множин сталих значень, що дозволяє використовувати їх як ознаки для розпізнавання даного класу сигналів, а також приймати рішення про значення модуляційних параметрів в процесі їх визначення.

#### *Метод автоматичного визначення параметрів радіосигналів LoRa*

Запропонований метод автоматичного визначення параметрів радіосигналів LoRa складається із 4-х етапів.

На першому етапі визначається несуча частота та ширина АЧС радіосигналу шляхом аналізу характеристик АЧС. Приклад АЧС радіосигналу LoRa, сформованого відповідно до протоколу ExpressLRS ( $B_c = 500$  кГц,  $SF = 9$ ,  $T_c = 1024$  мкс), зображено на Рис. 1.

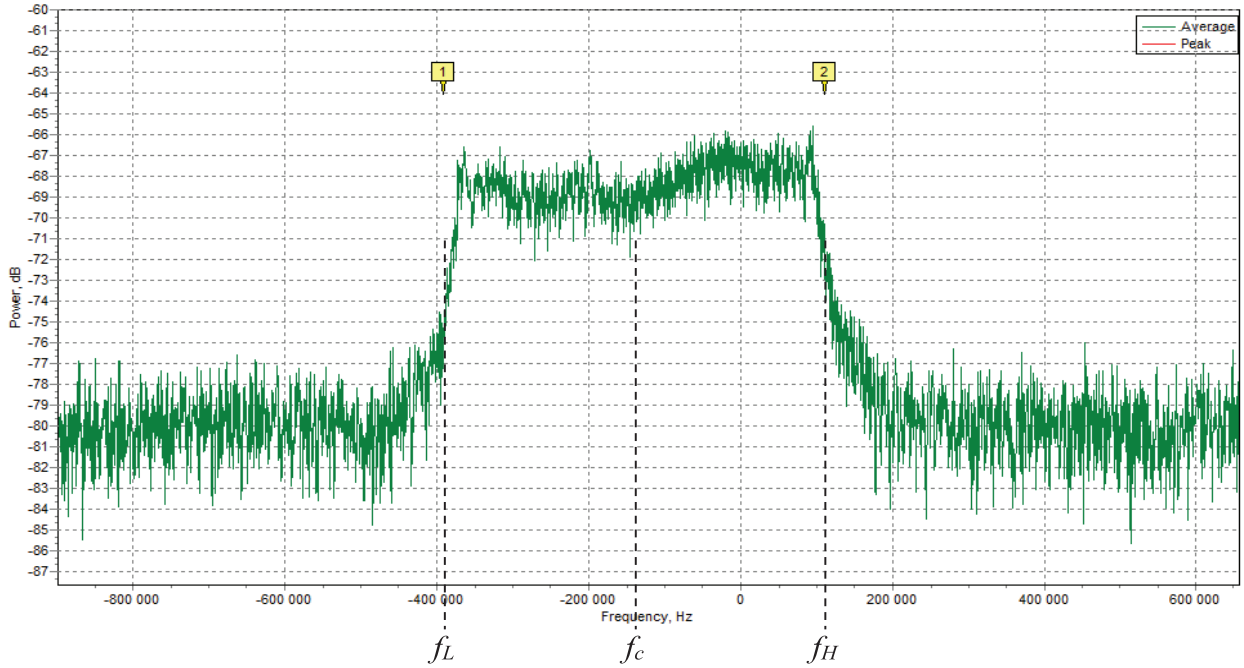


Рис. 1. АЧС радіосигналу LoRa, сформованого відповідно до протоколу ExpressLRS

Із Рис. 1 видно, що АЧС має круті спади, які відповідають частотам  $f_L$  та  $f_H$ , тоді несуча частота  $f_c^e$  та ширина АЧС  $B_c^e$  розраховуються за формулами:

$$f_c^e = 0,5(f_L + f_H); \quad B_c^e = f_H - f_L, \quad (11)$$

де  $f_L$ ,  $f_H$  – нижня та верхні межі АЧС радіосигналу, визначені за рівнем -3 дБ.

Отримана ширина спектра  $B_c^e$  округляється до найближчого сталого значення, перелік яких подано вище, відповідно до методу мінімальної метрики [26]:

$$d_n^B = \left( \sum_{n=1}^N |B_c^e - B_c^p[n]| \right), \quad (12)$$

де  $B_c^e$  – розраховане значення ширини АЧС;  $B_c^p[n]$  – масив можливих значень ширини АЧС.

Рішення про ширину АЧС  $B_c^e$  приймається за мінімумом значення  $d_n^B$ .

Застосування методу мінімальної метрики дозволяє додавати нові можливі сталі значення ширини АЧС без зміни алгоритму прийняття рішення.

На другому етапі визначається тривалість інформаційного символу шляхом аналізу автокореляційної функції (АКФ). Оскільки радіосигнал LoRa має циклостационарні властивості, то в його АКФ буде ряд піків, часові положення яких кратні тривалості  $T_c$ . Приклад АКФ радіосигналу LoRa, сформованого відповідно до протоколу ExpressLRS ( $B_c = 500$  кГц,  $SF = 9$ ,  $T_c = 1024$  мкс), зображено на Рис. 2.

Із Рис. 2 видно, що часові положення піків АКФ кратні значенню  $T_c$ , тоді тривалість інформаційного

символу визначається за виразами:

$$T_c^e = t_a^1; \quad T_c^e = t_a^i - t_a^{i-1}, \quad (13)$$

де  $t_a^i$  –  $i$ -й пік АКФ;  $T_c^e$  – розрахована тривалість інформаційного символу.

Для зменшення обчислювальної складності використовується швидкий алгоритм розрахунку АКФ, що ґрунтується на теоремі Вінера-Хинчина [27]: АКФ є зворотнім перетворенням Фур'є від спектральної щільності потужності. Вираз для обчислення АКФ  $R_a(k)$  з використанням алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) можна записати як:

$$R_a(k) = FFT^{-1} \left( |FFT(r(k))|^2 \right), \quad (14)$$

де  $FFT()$  – оператор ШПФ.

Обчислена тривалість  $T_c^e$  округлюється до найближчого сталого значення відповідно до методу мінімальної метрики (12).

На третьому етапі розраховується фактор розширення спектра  $SF^e$  за виразом:

$$SF^e = \log_2(B_c^e T_c^e). \quad (15)$$

На четвертому етапі визначається коефіцієнт  $k_v$ , що характеризує напрямок зміни частоти. Для цього синтезуються два узгоджені фільтри УФ (для up-chirp та down-chirp символів), налаштування яких відповідають обчисленим на попередніх трьох етапах параметрам радіосигналу LoRa.

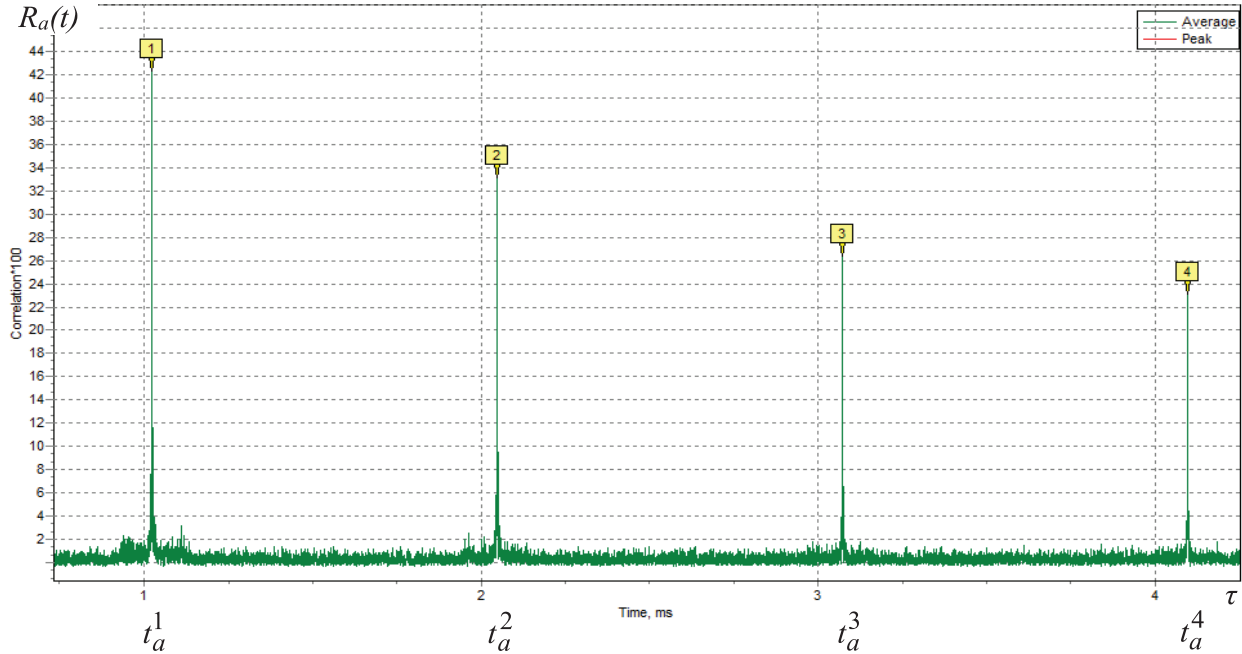


Рис. 2. АКФ радіосигналу LoRa, сформованого відповідно до протоколу ExpressLRS

Відомо, що імпульсна характеристика (ІХ) УФ для ЛЧМ радіосигналу комплексно спряжена із ним в частотній області та має дзеркальне відображення в часовій [27]. Тому для радіосигналу LoRa з  $k_v = 1$  ІХ УФ буде співпадати із радіосигналом LoRa, що має такі ж параметри та  $k_v = -1$ . Враховуючи (2)–(6) вираз для розрахунку ІХ УФ  $h_u(t)$  можна записати у вигляді:

$$h(k) = e^{j\pi k_x \frac{k B_c^e}{F_s} \left( \frac{k}{T_c^e F_s} - 1 \right)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, T_c^e F_s, \quad (16)$$

де  $k_x \in \{-1, 1\}$  – коефіцієнт, який визначає тип УФ, при  $k_x = -1$  отримуємо ІХ УФ для радіосигналу LoRa зі зростанням частоти  $h_u(k)$ , а при  $k_x = 1$  – зі спаданням частоти  $h_d(k)$ .

Використовуючи апріорну інформацію щодо можливих значень параметрів LoRa, для зменшення обчислювальної складності методу значення ІХ УФ розраховуються заздалегідь та зберігаються в пам'яті обчислювального пристрою.

Оскільки ІХ УФ визначається для сигналу на нульовій частоті, то перед фільтрацією здійснюється компенсація залишкових значень несучої частоти:

$$r_c(k) = r(k) e^{-\frac{j2\pi f_c^e k}{F_s}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, K_s, \quad (17)$$

де  $r_c(k)$  – масив відліків сигналу із компенсованими значеннями несучої частоти;  $K_s$  – кількість відліків в масиві аналізованого сигналу.

Для визначення параметра  $k_v$  реалізується узгоджена фільтрація шляхом згортки  $r_c(k)$  із ІХ УФ та обчислюються максимальні значення модулів сиг-

налів на виході УФ:

$$\begin{aligned} G_u &= \max(|h_u(k) * r_c(k)|); \\ G_d &= \max(|h_d(k) * r_c(k)|), \end{aligned} \quad (18)$$

де  $G_u, G_d$  – максимальні значення модулів сигналів на виході УФ з ІХ  $h_u(k)$  та  $h_d(k)$ ;  $*$  – оператор згортки.

За максимальною амплітудою на виході УФ приймається рішення про значення коефіцієнта  $k_v$ :

$$k_v^e = \begin{cases} 1, & G_u > G_d \\ -1, & G_u \leq G_d \end{cases}. \quad (19)$$

Таким чином, виконавши чотири етапи методу, отримуємо параметри радіосигналів LoRa:  $B_c^e, T_c^e, SF^e, k_v$ .

Працездатність та ефективність запропонованого методу перевірено шляхом моделювання в програмному середовищі MATLAB та технічного аналізу радіосигналів відомих протоколів передачі даних, що оснований на стандарті LoRa. Як показники ефективності методу використано ймовірності правильного визначення параметрів радіосигналу.

Комп'ютерне моделювання здійснювалось відповідно до вимог статистичного моделювання та методів Монте-Карло [26] в програмному середовищі MATLAB. Сигнальні суміші формувались шляхом генерування радіосигналів сформованих за стандартом LoRa та додавання до них шуму, ймовірнісна модель якого описувалась нормальним законом розподілу, для забезпечення ВСШ від -15 дБ до 5 дБ. Кожна модуляційна послідовність на початку містила преамбулу із 5–14 символів, що відповідає символним послідовностям відомих протоколів

командно-телеметричних радіоліній безпілотних літальних апаратів (БпЛА) та модулів передачі даних із радіосигналами LoRa. Ширина спектра сигналу  $B_c$ , фактор розширення  $SF$  та коефіцієнт  $k_v$  для кожної реалізації обирались за випадковим законом із множин можливих сталих значень. Для кожного ВСШ проведено 5000 розрахунків параметрів радіосигналів та обчислено ймовірність їх правильного визначення. У результаті статистичного моделювання отримано графічні залежності ймовірності правильного визначення тривалості інформаційного символу  $T_c$ , ширини спектра  $B_c$ , фактору розширення  $SF$  та коефіцієнта  $k_v$  від ВСШ, які зображені на Рис. 3.

З Рис. 3 видно, що запропонований метод дозволяє правильно визначити параметри радіосигналів LoRa із ймовірністю близькою до 1 при ВСШ від -5 дБ. При цьому ймовірність правильного визначення тривалості інформаційного символу перевищує 0,93 при ВСШ від -10 дБ, що пов'язано із застосуванням кореляційних методів обробки сигналу. Ймовірність визначення ширини АЧС та фактору розширення, що обчислюється за її значенням, перевищує 0,93 лише при ВСШ від -6 дБ, що обумовлено значним рівнем спектральної щільності шуму при низьких ВСШ.

Технічний аналіз радіосигналів LoRa відомих протоколів передачі даних здійснювався з використанням створеного на основі запропонованого методу спеціального програмного забезпечення. Радіосигнали LoRa генерувалися передавачами командно-телеметричних радіоліній БпЛА та реєструвалися програмно визначеним трансивером "HackRF One". Практичні дослідження підтвердили працездатність методу при визначенні параметрів

радіосигналів LoRa протоколів ExpressLRS, FrSky R9M та Crossfire.

Порівняно із відомим методом визначення параметрів та класифікації радіосигналів LoRa [14], запропонований метод не потребує апіорної інформації, має меншу розрахункову складність та враховує всі можливі значення параметрів радіосигналів LoRa. Крім того, при зміні модуляційних параметрів радіосигналів LoRa (у разі удосконалення стандарту), для забезпечення працездатності методу необхідно лише додати їх до множин сталих значень.

## Висновки

Проаналізовано характеристики сучасних радіоелектронних компонентів, які підтримують технологію LoRa, та встановлено межі діапазонів зміни модуляційних параметрів, що можуть бути застосовані в радіосигналі. Запропонований метод автоматичного визначення параметрів радіосигналу LoRa дозволяє розрахувати ширину АЧС, тривалість інформаційного символу, фактор розширення спектра, напрямок зміни частоти із ймовірністю близькою до 1 при ВСШ від -5 дБ.

Наукова новизна полягає в удосконаленні математичної моделі радіосигналу LoRa, розроблені методу визначення параметрів радіосигналів LoRa, що використовує в процесі прийняття рішення інформацію про сталі значення параметрів та забезпечує визначення напрямку зміни частоти ЛЧМ. Подальші дослідження в даному напрямку доцільно спрямувати на удосконалення методу з метою підвищення ймовірності правильного визначення ширини АЧС та фактору розширення спектра радіосигналу LoRa при ВСШ менше -5 дБ.

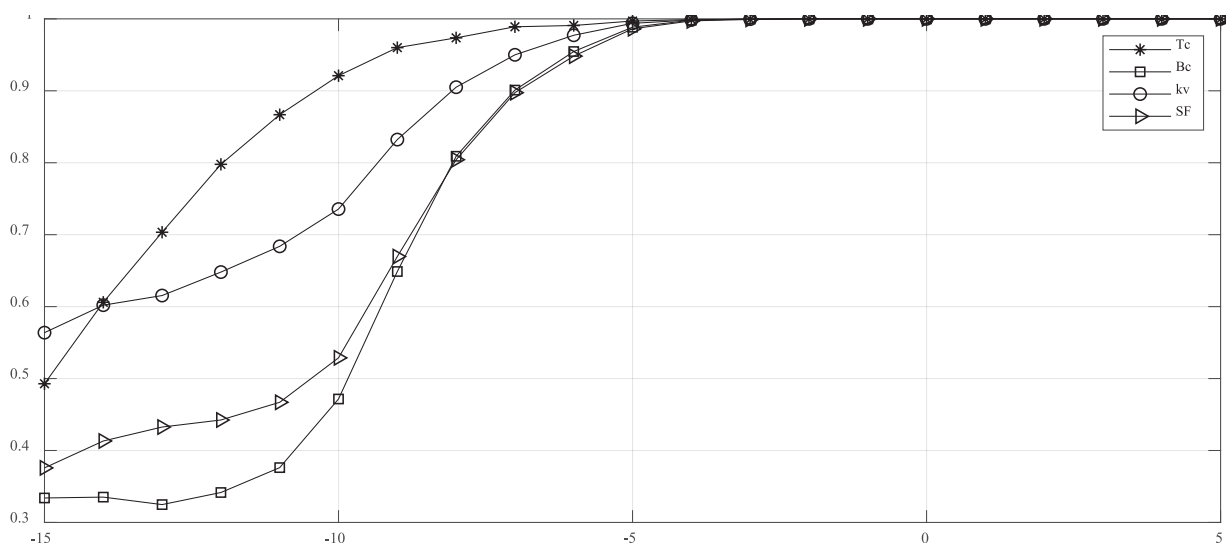


Рис. 3. Залежності ймовірності правильного визначення параметрів радіосигналу LoRa від ВСШ

## References

- [1] LoRa technology. Applications. [www.semtech.com](http://www.semtech.com).
- [2] Khutsoane O., Isong B. and Abu-Mahfouz A. M. (2017) IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN. *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 6107-6112, doi: 10.1109/IECON.2017.8217061.
- [3] Kamal M., Alam M., Sajak A. et al. (2023) Requirements, Deployments, and Challenges of LoRa Technology: A Survey. *Computational Intelligence and Neuroscience*, Article ID 5183062, 15 p. doi: 10.1155/2023/5183062.
- [4] I. de Almeida, M. Chafii, A. Nimr et al. (2021) Alternative Chirp Spread Spectrum Techniques for LPWANs. *Electrical Engineering and Systems Science*, 15 p. doi: 10.48550/arXiv.2102.09250.
- [5] Janssen T., BniLam N., Aernouts M., Berkvens R. et al. (2020) LoRa 2.4 GHz Communication Link and Range. *Sensors*, Vol. 20, Iss. 16, 4366; doi:10.3390/s20164366.
- [6] Falanji R., Heusse M., Duda A. (2022) Range and Capacity of LoRa 2.4 GHz. *EAI Mobiquitous*, 20 p, hal-03868942.
- [7] Gbadoubissa J., Ari A., Radoi E., Gueroui A. (2023) M-Ary Direct Modulation Chirp Spread Spectrum for Spectrally Efficient Communications. *Information*, Vol. 14, Iss. 6, 15 p. doi: 10.3390/info14060323.
- [8] Courjault J., Vrigneau B., Berder O. and Bhatnagar M. R. (2020) How robust is a LoRa communication against impulsive noise? *IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, p. 1–6. doi: 10.1109/pimrc48278.2020.9217348.
- [9] Bor M., Roedig U. (2017) LoRa Transmission Parameter Selection. *13th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, p. 27–34. doi: 10.1109/dcoss.2017.10.
- [10] Turčinović F., Vuković J., Božo S., and Šišul G. (2020) Analysis of LoRa Parameters in Real-World Communication. *International Symposium ELMAR*, P. 87–90. doi: 10.1109/elmar49956.2020.9219028.
- [11] Silva E., Figueiredo L., de Oliveira A., et al. (2023) Adaptive Parameters for LoRa-Based Networks Physical-Layer. *Sensors*, Vol. 23, Iss. 10, 4597; doi: 10.3390/s23104597.
- [12] Araujo D. C., Ferre G., Cavalcante C. C. and Guerreiro I. M. (2020) A Spectral Efficiency Enhancement for Chirp Spread Spectrum Downlink Communications. *2020 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/LATINCOM50620.2020.9282266.
- [13] Yi Y., Zhao H., Wang Y. (2020) LoRa Signal Monitoring System of Multi-Node Software Define Radio. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, pp. 1-5. doi: 10.1109/wcncw48565.2020.9124898.
- [14] Horne C., Peters N., Ritchie M. (2023) Classification of LoRa signals with real-time validation using the Xilinx Radio Frequency System-on-Chip. *IEEE Access*, Vol. 11, pp. 26211-26223. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3252170.
- [15] Ben G., Zheng X., Wang Y., et al. (2021) Local Search Maximum Likelihood Parameter Estimator of Chirp Signal. *Applied Sciences*, Vol. 11, Iss. 2, 673, DOI: 10.3390/app11020673.
- [16] E32-900T30D 868MHz/915MHz 30dBm new LoRa wireless module. User manual. Ver. 1.1. (2020) *Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd.*, 32 p.
- [17] SX1261/62. Datasheet. Rev 1.1. (2017) *Semtech Corporation*, 107 p.
- [18] SX1280/1281. Datasheet. Rev 3.2. (2020) *Semtech Corporation*, 158 p.
- [19] SX1272/73. Datasheet. Rev 4. (2019) *Semtech Corporation*, 129 p.
- [20] SX1276/77/78/79. Datasheet. Rev 5. (2016) *Semtech Corporation*, 129 p.
- [21] SX1276/SX1278 wireless modules E32 series. User manual. Ver. 1.3. (2018) *Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd.*, 30 p.
- [22] LLCC68. Datasheet. Rev 1.0 (2019) *Semtech Corporation*, 106 p.
- [23] E32-900T30D. SX1276 868MHz/915MHz DIP wireless module. User manual. Ver. 1.2. (2023) *Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd.*, 20 p.
- [24] E220-900T30D 868MHz/915MHz 30dBm LoRa wireless module. User manual. Ver. 1.0 (2020) *Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., Ltd.*, 22 p.
- [25] *TBS CROSSFIRE R/C System. Adaptive Long Range Remote Control System* (2022) 88 p.
- [26] Kroese, D. P., Botev, Z., Taimre, T., & Vaisman, R. (2023) *Data Science and Machine Learning: Mathematical and Statistical Methods*, 513 p.
- [27] Benvenuto N., Cherubini G., Tomasin S. (2021) *Algorithms for Communications Systems and their Applications*, 2nd edition. Wiley, 960 p.

## Method of Automatic Parameters Estimation of Radio Signals Generated According to LoRa Standard

Nahorniuk O. A.

Radio signals generated according to the LoRa standard (hereinafter referred to as LoRa radio signals) are widely used in telecommunication systems for both civil and military purposes, which is due primarily to their high immunity to interference.

The mathematical model of the LoRa radio signal is presented in the article. The relationship between radio signal modulation parameters, coding parameters, data transmission speed and interference immunity is shown. The characteristics of modern radio electronic components that support LoRa technology are analyzed, and the limits of modulation parameters ranges that can be used in a radio signal are determined. A method of automatic estimation of LoRa radio signal parameters is proposed, which consists of 4 stages. At the first stage, the carrier frequency and bandwidth are calculated by using characteristics of the signal amplitude-frequency spectrum. At the second stage, the information symbol duration is calculated by analyzing the features of the autocorrelation function. The obtained modulation parameters are rounded to the nearest constant values according to the minimum metric method. At the third stage, the spreading factor is calculated, which is

analytically related to the bandwidth and the information symbol duration. At the fourth stage, the direction of the LoRa radio signal frequency change is determined. For this, two matched filters (for up-chirp and down-chirp symbols) are synthesized, the settings of which correspond to the LoRa radio signal parameters calculated in the previous three stages. The decision on the frequency change direction is made according to maximum signals amplitude at the output of the matched filters. The proposed method effi-

ciency was verified by modeling in the MATLAB software and technical analysis of known LoRa data transmission protocols radio signals. It is shown that the method allows to correctly estimate the LoRa radio signals parameters with a probability close to 1 when the signal-to-noise ratio is greater than -5 dB.

*Keywords:* method; radio signal; LoRa; linear frequency modulation; parameter; bandwidth; spreading factor; automation