

УДК 621.396.946.2, 004.75

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЕФЕКТУ ДОППЛЕРА НА ФУНКЦІОНУВАННЯ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ LORAWAN

DOI 10.36994/2788-5518-2021-01-01-08⁸

Наритник Т.М., к.т.н., проф., Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна, director@mitris.com

Капштик С.В., к.т.н., національний центр управління та випробувань космічних засобів, Київ, Україна, s.kapshtyk@spacecenter.gov.ua

Новіцька А.О., Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна, grinova.ann@gmail.com

Анотація. Розглянуто застосування низькоорбітальних супутникових систем для надання послуг Інтернету речей в сенсорних мережах. Показано перспективність застосовування в супутникових низькоорбітальних системах Інтернету речей технології LoRaWAN. Описана розроблена авторами модель для проведення аналізу впливу ефекту Допплера на функціонування протоколу LoRaWAN. Показано наслідки негативного впливу ефекту Допплера на передачу інформації в системі LoRaWAN за допомогою модуляції LoRa. Визначено залежність помилки при визначенні інформаційного символу від величини зсуву частоти, зумовленого впливом ефекту Допплера. Запропоновано метод компенсації впливу ефекту Допплера в супутниковій низькоорбітальній системі, що використовує протокол LoRaWAN. Показано, що структура кадру фізичного рівня протоколу LoRaWAN, що передається у висхідній лінії, надає можливість виміряти зсув частоти, який зумовлений ефектом Допплера, та підстроїти приймальний тракт шлюзу мережі LoRaWAN, що розташований на борту супутника, до цього зсуву для виключення потрапляння спотвореного радіосигналу на обробку в приймач-демодулятор LoRa. Запропоновано застосувати упереджувальний зсув частоти сигналу, що передається по низхідній лінії, для компенсації поточного значення зсуву частоти. Запропонований метод дозволяє не ускладнювати приймальне обладнання терміналу Інтернету речей - прикінцевого вузла мережі LoRaWAN.

Ключові слова: сенсорна мережа, Інтернет речей, протокол LoRaWAN, низькоорбітальна супутникова система, ефект Допплера.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DOPPLER EFFECT ON THE OPERATION OF THE LORAWAN SATELLITE SYSTEM

Teodor Narytnyk, Ph.D. prof. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, director@mitris.com

Sergii Kapshtyk, Ph.D., National Space Facility Control and Test Center, Kyiv, Ukraine, s.kapshtyk@spacecenter.gov.ua

⁸ Наритник Т.М., Капштик С.В., Новіцька А.О.

Інфокомунікаційні та комп'ютерні технології, № 1 (01), 2021

Anna Novitska, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, grinova.ann@gmail.com

Abstract. The application of low-Earth-orbit satellite systems for the provision of Internet of Things services in sensor networks is considered. The prospects of using LoRaWAN technology in satellite low-Earth-orbit Internet systems are shown. The model developed by the authors for the analysis of the influence of the Doppler effect on the functioning of the LoRaWAN protocol is described. The consequences of the negative effect of the Doppler effect on the transmission of information in the LoRaWAN system by LoRa modulation are shown. The dependence of the error in determining the information symbol on the magnitude of the frequency shift due to the influence of the Doppler effect is determined. A method of compensating for the effect of the Doppler effect in a satellite low-orbit system using the LoRaWAN protocol is proposed. It is shown that the structure of the physical layer frame of the LoRaWAN protocol transmitted in the uplink makes it possible to measure the frequency shift caused by the Doppler effect and adjust the receiving path of the LoRaWAN network gateway on board the satellite to this shift to avoid distortion. processing in the receiver-demodulator LoRa. It is proposed to use a predictive frequency offset of the signal transmitted on the downlink to compensate for the current value of the frequency offset. The proposed method allows not to complicate the receiving equipment of the Internet of Things terminal - the final node of the LoRaWAN network.

Keywords: sensor network, Internet of Things, LoRaWAN protocol, low-Earth-orbit satellite system, Doppler effect.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭФФЕКТА ДОППЛЕРА НА ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ LORAWAN

Наритник Т.М., к.т.н., проф. Национальный технический университет «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина, director@mitris.com

Капитик С.В., к.т.н. Национальный центр управления и испытаний космических средств, Київ, Украина, s.kapshytk@spacecenter.gov.ua

Новицкая А.А. Национальный технический университет «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина,, grinova.ann@gmail.com

Аннотация. Рассмотрено применение низкоорбитальных спутниковых систем для предоставления услуг Интернета вещей в сенсорных сетях. Показана перспективность применения в спутниковых низкоорбитальных системах Интернета вещей технологии LoRaWAN. Описана разработанная авторами модель для проведения анализа влияния эффекта Доплера на функционирование протокола LoRaWAN. Показаны последствия негативного влияния эффекту Доплера на передачу информации в системе LoRaWAN с помощью модуляции LoRa. Определена зависимость ошибки при определении информационного символа от величины смещения частоты, обусловленная влиянием эффектом Доплера. Предложен метод компенсации влияния эффекта Доплера в спутниковой низкоорбитальной системе, которая использует протокол LoRaWAN. Показано, что структура кадру физического уровня протокола LoRaWAN, который передается по восходящей линии, предоставляет возможность измерить смещение частоты, которое обусловлено эффектом Доплера, и подстроить приемный тракт шлюза сети LoRaWAN, который размещен на борту спутника, к

этому смещению для исключения попадания искаженного радиосигнала на обработку в приемник-демодулятор LoRa. Предложено применить упреждающее смещение частоты сигнала, который передается в восходящей линии, для компенсации текущего значения смещения частоты. Предложенный метод позволяет не усложнять приемное оборудование терминала Интернета вещей – оконечного узла сети LoRaWAN.

Ключевые слова: сенсорная сеть, Интернет вещей, протокол LoRaWAN, низкоорбитальная спутниковая система, эффект Допплера.

Вступ

Важливою складовою впровадження систем та послуг Інтернету речей є формування необхідної для передачі інформації телекомунікаційної інфраструктури. Розробники систем Інтернету речей приділяють окрему увагу вузькосмуговим технологіям передачі інформації Інтернету речей на великі відстані з низькою швидкістю. В англійській літературі ця група технологій отримала назву «Системи передачі інформації на великі відстані із малим споживанням енергії», англійською мовою «Low Power Wide Area Network», або скорочено LPWAN [1]. На рис. 1 представлено графік, який показує місце, що займають технології LPWAN в порівнянні із іншими технологіями радіодоступу, що використовуються системами Інтернету речей. Як видно з рис. 1, до особливостей технологій LPWAN відносяться:

- низьке енергоспоживання датчиків та кінцевих пристроїв;
- здатність забезпечувати передачу інформації на велику відстань;
- масштабованість створюваних мереж;
- низька вартість розгортання мереж.

Завдяки цим перевагам сегмент ринку LPWAN відноситься до найбільш динамічних ринків. Так світові ірландська консалтингова компанія в своїх прогнозах зазначає, що до 2027 року технологія LPWAN займатиме до 20% європейського ринку завдяки зростаючому впровадженню «розумних міст» та державної підтримки цифрової трансформації «розумного виробництва». Компанія Global Market Insights, Inc. Оприлюднила результати власних досліджень ринку мереж великої дальності із низьким енергоспоживанням, згідно з якими оцінка загальносвітового ринку LPWAN до 2027 року становитиме більше \$80 млрд [2].

Технологія LoRaWAN відноситься до групи технологій LPWAN. В основі технології покладено особливий тип лінійної частотної модуляції (ЛЧМ) – модуляція LoRa. Назва модуляції походить від скорочення словосполучення «Велика відстань», або англійською Long Range. Станом на початок 2020 року саме стандарт LoRaWAN є драйвером розвитку Інтернету речей у світі [3]. До переваг стандарту LoRaWAN відносяться:

- завадостійка модуляція;
- тривалий час роботи абонентських пристроїв;
- існування трьох класів абонентських терміналів з різниці швидкостями с відгуку на повідомлення;

- автоматичний роумінг між мережами різних операторів;
- можливість дистанційного оновлення програмного забезпечення абонентських терміналів.

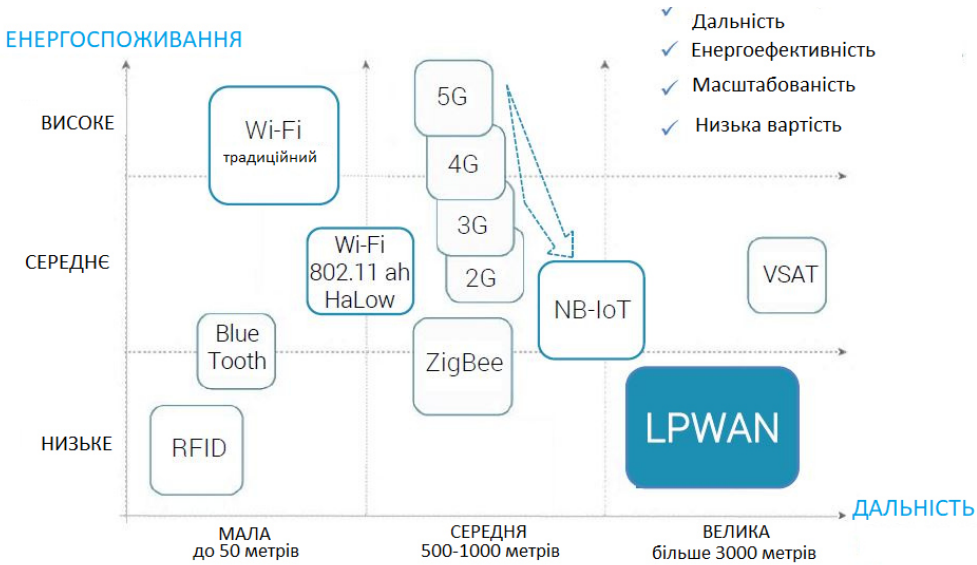


Рис.1. Позиціонування сегменту LPWAN

Переваги технології LoRaWAN привернули увагу розробників супутникових низькоорбітальних систем Інтернету речей, що в переважній більшості створюються із використанням космічних апаратів класу куб-сат (масою 1-10 кг). Зокрема, компанія SWARM розробляє супутникову систему, що буде побудована із використанням куб-сатів, і буде використовувати протокол LoRaWAN [4].

Для низькоорбітальних супутникових систем характерним є вплив ефекту Допплера, що полягає в зсуві частоти сигналу, що приймається, в смугу більш високих, або більш низьких частот, в залежності від того, чи наближається супутник до спостерігача, чи віддаляється від нього. На рис.2 показана ситуаційна схема, що дозволяє розрахувати величину зсуву частоти, зумовленого впливом ефекту Допплера.

При входженні супутника до зони радіобачення наземних пристроїв, що на рис.2 показано як точка S_2 , вектор відносної швидкості V_r спрямований до наземного пристрою, що знаходиться в точці А. Тому вплив ефекту Допплера проявляється у вигляді зростання частоти сигналу, що приймається, в порівнянні із частотою сигналу, що передавався супутником. В точці S_1 супутник виходить із зони радіобачення наземного пристрою, і вектор відносної швидкості спрямований від наземного пристрою, що супроводжується зменшенням частоти сигналу, що приймається наземним пристроєм, в порівнянні із сигналом, що передавався супутником.

Проведені розрахунки показали, що для частотних діапазонів 868МГц та 433 МГц, які використовуються в Європі для роботи систем LoRaWAN, величина зсуву частоти становить відповідно до $\pm 19,7$ кГц та $\pm 9,8$ кГц, що є суттєвим впливом на умови прийому сигналів LoRa. Тому важливим є дослідження впливу Допплерівського зсуву частоти на функціонування протоколу LoRaWAN з метою розробити принцип його компенсації.

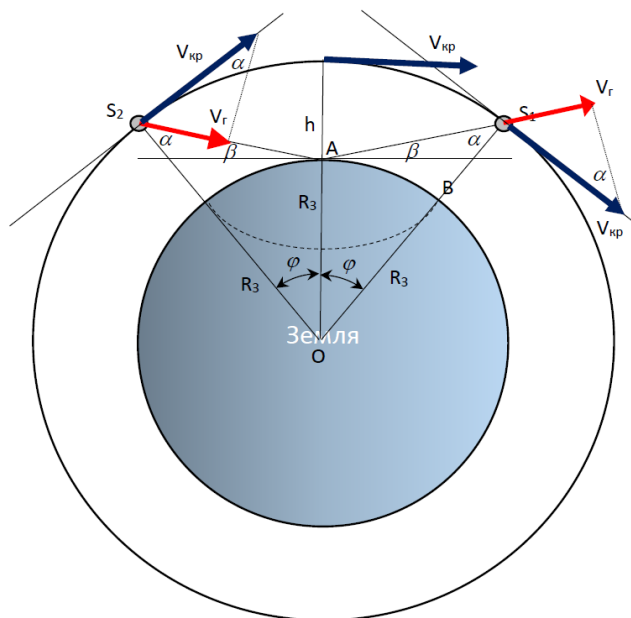


Рис.2. Схема до розрахунку зсуву частоти, зумовленого ефектом Доплера

Опис математичної моделі впливу ефекту Доплера на прийом сигналів LoRa

Для проведення аналізу використаємо наступну математичну модель: частотний зсув, обумовлений впливом ефекту Доплера, позначимо як $\omega_d = 2\pi f_d$, де f_d – Допплерівський зсув частоти. Таким чином миттєве значення частоти сигналу із модуляцією LoRa становить:

$$f(t) = f_n + f_d(t) + \mu \cdot t \quad (1)$$

Широкопasmовий сигнал модуляції LoRa $x(t)$ на тривалості передачі одного символу T_{sym} визначається наступним чином:

$$A_0 \cdot \cos\left(\omega_n t + \omega_d t + \frac{\mu}{2} \cdot t^2\right) \quad (2)$$

де змінна t приймає значення $-\frac{T_{sym}}{2} \leq t < \frac{T_{sym}}{2}$

Із врахуванням передачі інформаційного символу k , вираз, що описує сигнал з модуляцією LoRa приймає вигляд:

$$x(t) = \begin{cases} A_0 \cdot \cos\left(\omega_H t + \omega_D t + \Delta\omega kt + \frac{\mu}{2} t^2\right) & 0 \leq t < T_0 \\ A_0 \cdot \cos\left(\omega_H t + \omega_D t + \Delta\omega kt - BWt + \frac{\mu}{2} t^2\right) & T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (3)$$

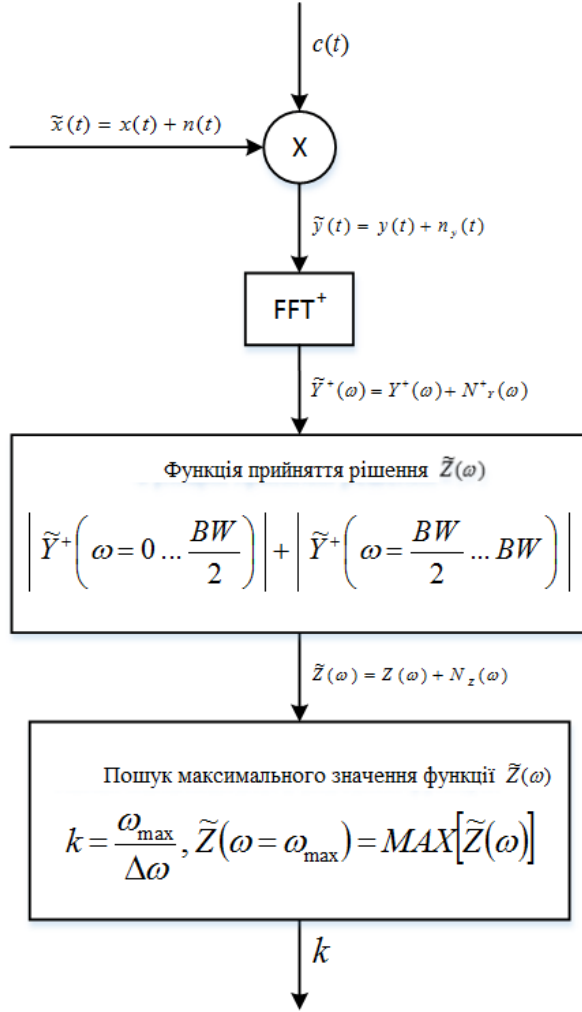


Рис.3 Модель приймального пристрою радіосигналів із модуляцією LoRa.

На рис.3 наведено модель приймального пристрою радіосигналів із модуляцією LoRa [5]. Сигнал на виході перемножувача (див. рис.3) із врахуванням зсуву частоти приймає вигляд:

$$y'(t) = x(t) \cdot y(t) = \frac{A_0 A_1}{2} \cdot \begin{cases} \cos(\Delta\omega kt + \omega_D t) + \cos(2\omega_H t + \Delta\omega kt + \omega_D t + \mu t^2) & 0 \leq t < T_0 \\ \cos(BWt - \Delta\omega kt - \omega_D t) + \cos(2\omega_H t + \Delta\omega kt - BW + \omega_D t + \mu t^2) & T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (4)$$

В наведеному виразі $c(t)$ – опорний сигнал ЛЧМ,

$$c(t) = A_1 \cdot \cos(\omega_H t + \mu^2 t/2)$$

Низькочастотна складова сигналу на виході перемножувача має вигляд:

$$y'(t) = \frac{A_0 A_1}{2} \cdot \begin{cases} \cos(\Delta\omega k t + \omega_n t) & 0 \leq t < T_0 \\ \cos([BW - \Delta\omega k - \omega_n]t) & T_0 \leq t < T_{sym} \end{cases} \quad (5)$$

Комплексний сигнал – результат прямого перетворення Фур'є:

$$Y(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} y'(t) e^{-i\omega t} dt = \frac{A_0 A_1}{4} \times e^{-j(\omega - [\Delta\omega k + \omega_n]) \cdot \frac{T_0}{2}} T_0 \cdot \frac{\sin\left\{[\omega - (\Delta\omega k + \omega_n)] \cdot \frac{T_0}{2}\right\}}{[\omega - (\Delta\omega k + \omega_n)] \cdot \frac{T_0}{2}} + \frac{A_0 A_1}{4} \times e^{-j(\omega - [BW - \Delta\omega k - \omega_n]) \cdot \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} (T_{sym} - T_0) \cdot \frac{\sin\left\{[\omega - (BW - \Delta\omega k - \omega_n)] \cdot \frac{(T_{sym} - T_0)}{2}\right\}}{[\omega - (BW - \Delta\omega k - \omega_n)] \cdot \frac{(T_{sym} - T_0)}{2}} + \frac{A_0 A_1}{4} \times e^{-j(\omega + \Delta\omega k + \omega_n) \cdot \frac{T_0}{2}} T_0 \cdot \frac{\sin\left\{(\omega + \Delta\omega k + \omega_n) \cdot \frac{T_0}{2}\right\}}{(\omega + \Delta\omega k + \omega_n) \cdot \frac{T_0}{2}} + \frac{A_0 A_1}{4} \times e^{-j(\omega + (BW - \Delta\omega k - \omega_n)) \cdot \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} (T_{sym} - T_0) \cdot \frac{\sin\left\{[\omega + (BW - \Delta\omega k - \omega_n)] \cdot \frac{(T_{sym} - T_0)}{2}\right\}}{[\omega + (BW - \Delta\omega k - \omega_n)] \cdot \frac{(T_{sym} - T_0)}{2}} \quad (6)$$

Дві складові, що відносяться до області позитивних частот, визначаються наступним чином:

$$Y^+(\omega) = Y_1(\omega) + Y_2(\omega) \quad (7)$$

$$Y_1(\omega) = \frac{A_0 A_1}{4} \times e^{-j(\omega - [\Delta\omega k + \omega_n]) \cdot \frac{T_0}{2}} T_0 \cdot \frac{\sin\left\{[\omega - (\Delta\omega k + \omega_n)] \cdot \frac{T_0}{2}\right\}}{[\omega - (\Delta\omega k + \omega_n)] \cdot \frac{T_0}{2}} \quad (7.1)$$

$$Y_2(\omega) = \frac{A_0 A_1}{4} \times e^{-j(\omega - [BW - \Delta\omega k - \omega_n]) \cdot \frac{T_0 + T_{sym}}{2}} (T_{sym} - T_0) \cdot \frac{\sin\left\{[\omega - (BW - \Delta\omega k - \omega_n)] \cdot \frac{(T_{sym} - T_0)}{2}\right\}}{[\omega - (BW - \Delta\omega k - \omega_n)] \cdot \frac{(T_{sym} - T_0)}{2}} \quad (7.2)$$

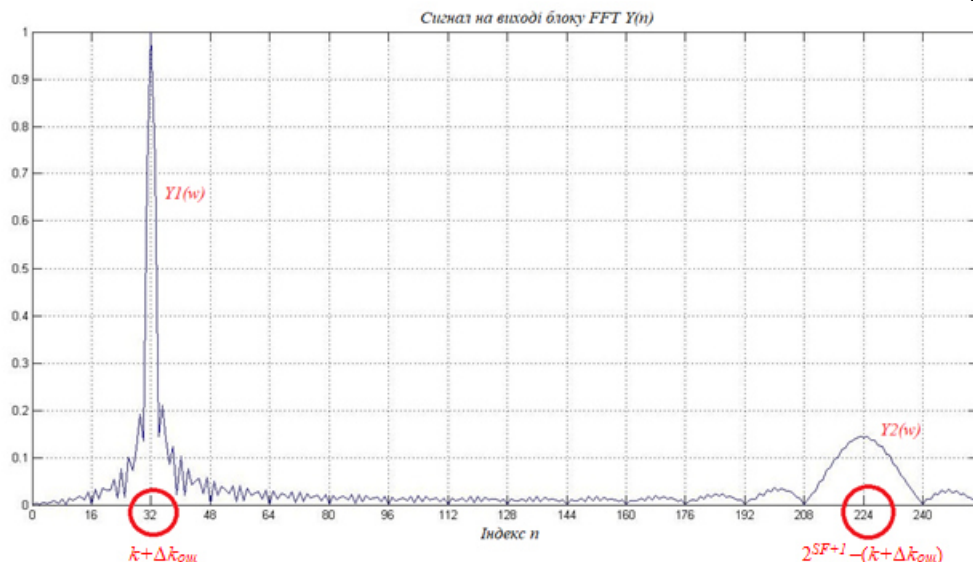


Рис.4. Вплив ефекту Доплера на помилку у визначенні інформаційного символу ЛЧМ-сигналу LoRa

Функція прийняття рішення $Z(\omega)$ приймає вигляд:

$$Z(\omega) = Y_1(\omega) + Y_2(BW - \omega) \approx Y^+(\omega) + Y^+(BW - \omega) \quad (8)$$

Згідно методу визначення інформаційного символу k , що передавався, на підставі аналізу функції прийняття рішення $Z(\omega)$ обирається частота ω_{max} , для якої функція прийняття рішення приймає максимальне значення :

$$Z(\omega = \omega_{max}) = MAX[Z(\omega)] \quad (9)$$

Але, враховуючи вплив Допплерівського зсуву частоти, значення обраної частоти ω_{max} містить й складову ω_d . Тобто для частоти ω_{max} справедливою є наступна формула:

$$\omega_{max} = \Delta\omega k + \omega_d \quad (10)$$

Наявність в Допплерівського зсуву частоти ω_d спричиняє помилку $\Delta k_{ош}$ при визначенні інформаційного символу k , яка показує відміну від істинного значення переданого символу

$$k = \frac{(\omega_{max} - \omega_d)}{\Delta\omega} = \frac{\omega_{max}}{\Delta\omega} - \frac{\omega_d}{\Delta\omega} = k_{ист} - \Delta k_{ош} \quad (11)$$

На рис. 4 показано, яким чином Допплерівський зсув частоти впливає на визначення інформаційного символу. Потрібно відзначити, що результат обчислення частоти ω_{max} та визначення інформаційного символу k залежить від знаку зсуву частоти, тобто значення у виразі (10) може перейти в область негативних частот.

Впровадження упереджувального зсуву частоти для компенсації впливу ефекту Допплера на прийом сигналів LoRa

Вирішити питання можливо шляхом визначення величини зсуву частоти, зумовленого ефектом Допплера, на інтервалі часу передачі преамбули кадру фізичного рівня LoRa. Преамбула складається з послідовності ЛЧМ-імпульсів, аналіз яких дозволяє приймальній системі шлюзу визначити частоту передачі, коефіцієнт розширення SF, забезпечити тактову синхронізацію, визначити за допомогою прийому SyncWord початок передачі інформаційної частини кадру фізичного рівня. Вимірювання зсуву частоти Допплерівського на інтервалі передачі преамбули дозволяє компенсувати цей зсув частот при обробці ЛЧМ-сигналу LoRa в шлюзі системи LoRaWAN, та ввести упереджувальний зсув частоти, при передачі ЛЧМ-сигналів LoRa в низхідній лінії. Принцип компенсації Допплерівського зсуву частоти показано на рис.5.

На рис.6 показано принцип реалізації метода упереджувального частотного зсуву на прикладі шлюзу виробництва компанії Semtech S□1301 [6]. Шлюз S□1301 використовується в комплекті із приймально-передавальними пристроями, або трансиверами серії S□125x (знак x в індексі пристрою означає можливість використання будь-якого пристрою ряду S□1250÷S□1257). Високочастотний вхід/вихід трансиверів S□125x підключений до приймально-передавальної антени. Зі сторони шлюзу трансивери S□125x мають цифровий інтерфейс.

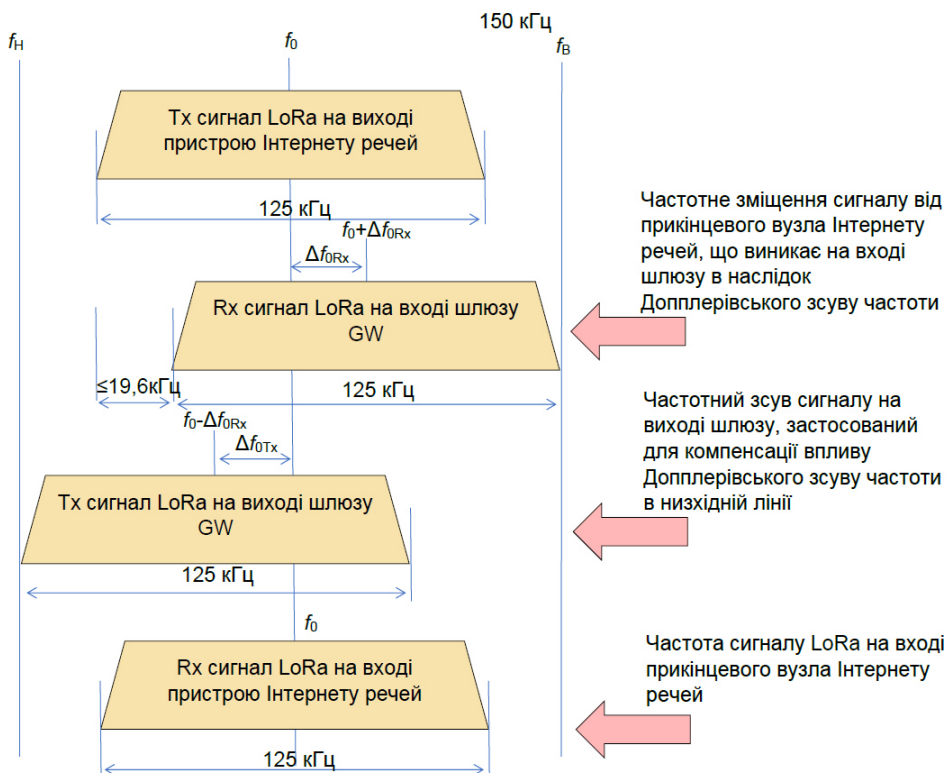


Рис.5. Принцип компенсації Допплерівського зсуву частоти.

В каналі прийому шлюз приймає цифровий потік в форматі I/Q (синфазний та квадратурний канали). Прийнятий цифровий потік після процедури децимації поступає на обробку на 8-канальний цифровий приймач LoRa. Кожен канал здійснює обробку сигналу в цифровій формі в окремій смузі частот. З виходу цифрових приймачів інформація поступає на вхід блоку обробки пакетів, де формується прийнятий пакет фізичного рівня, і цей пакет передається через інтерфейс SPI до мікроконтролера для подальшої обробки згідно протоколу LoRaWAN. При передачі пакетів по лінії донизу DL інформація від мікроконтролера МК через інтерфейс SPI поступає до формувача пакетів, де в цифровій формі здійснюється формування сигналу LoRa. Сформований сигнал в цифровому форматі I/Q передається до перетворювача та передавача трансивера S \square 125x.

Для реалізації упереджувального частотного зсуву до схеми шлюзу S \square 1301 додано цифровий аналізатор спектру, який використовує алгоритм швидкого перетворення Фур'є FFT⁺ для обрахування енергетичного спектру прийнятого сигналу в кожному каналі. На вхід цифрового аналізатора спектру подаються в цифровому форматі I/Q сигнали усіх 8 каналів LoRa. Аналізатор спектру обраховує енергетичний спектр для сигналів в кожному каналі і формує оцінку F_{DR} / N_{CH} Допплерівського зсуву для кожного частотного каналу N_{CH} . Сформована оцінка передається до кожного цифрового каналу приймача

LoRa для врахування при обробці інформації і зведення показника $\Delta k_{\text{ош}}$ до 0. Це досягається зміщенням частоти цифрового гетеродину на вході каналу приймача на величину, протилежну Допплерівському зсуву частоти $F_{\text{др}\square}/N_{\text{CH}}$. Таким чином на вході приймача ми маємо $\Delta f_{\text{д}} = 0$.

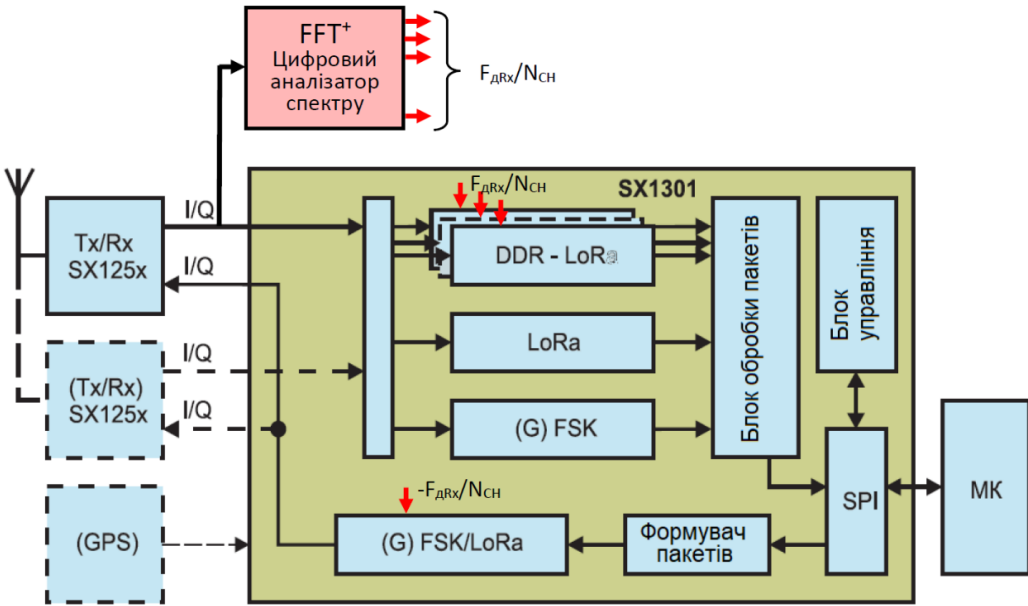


Рис.6 Реалізація методу попереджувального частотного зсуву на прикладі шлюзу виробництва компанії Semtech S□1301

Для компенсації Допплерівського зсуву частоти в низхідній лінії DL, яка використовує той же самий частотний канал, частота сформованого CSS-сигналу LoRa в тракці передачі зсунута на величину, що є протилежною по знаку Допплерівському зсуву частоти в каналі прийому з висхідної лінії DL. Для цього показник $-F_{\text{др}\square}/N_{\text{CH}}$ передається до цифрового формувача сигналу LoRa. На цифровий вхід трансивера S□125x сигнал LoRa поступає в цифровому I/Q форматі із зсувом частоти $-\Delta f_{\text{д}}$.

Застосування методу попереджувального зсуву частоти дозволяє не ускладнювати обладнання прикінцевих вузлів для компенсації Допплерівського зсуву частоти.

Висновки

1. На функціонування низькоорбітальних супутникових систем LoRaWAN негативно впливає ефект Доплера, що полягає в зсуві частоти прийому радіосигналу відносно частот його передачі. Вплив ефекту Доплера проявляється в помилці при визначенні інформаційного символу, який передавався ЛЧМ-сигналом LoRa, що суттєво впливає на якість передачі інформації в супутниковій системі.

2. Вимірювання зсуву частоти, зумовленого впливом ефекту Допплера, на тривалості передачі приамбули кадру фізичного рівня LoRaWAN дозволяє внести поправку до опорної частоти місцевого гетеродина шлюзу LoRaWAN при обробці ЛЧМ-сигналів LoRa для усунення невизначеності помилки при визначенні інформаційного символу ЛЧМ-сигналу LoRa.

3. Для спрощення умов прийому ЛЧМ-сигналів LoRa в обладнання прикінцевих пристроїв системи LoRaWAN, можливо компенсувати вплив ефекту Допплера шляхом упереджувального зсуву частоти ЛЧМ-радіосигналу LoRa, що випромінюється шлюзом LoRaWAN у складі корисного навантаження супутника низькоорбітальної системи Інтернету речей.

Література

1. Стандарт NB-IoT Low-Power and Wide-Area, LPWA. Энергоэффективная сеть дальнего радиуса действия / Электронный документ. Режим доступа: [https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82_NB-IoT_Low-Power_and_Wide-Area,_LPWAN_\(%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%8D%](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82_NB-IoT_Low-Power_and_Wide-Area,_LPWAN_(%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%8D%)

2. Перспективы развития рынка энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия / Электронный ресурс. Режим доступа: <http://vestnik-glonass.ru/news/tech/perspektivy-razvitiya-rynka-energoeffektivnykh-setey-dalnego-radiusa-deystviya/>

3. LoRaWAN как надежная и безопасная технология связи / Электронный документ. Режим доступа: <https://www.connect-wit.ru/lorawan-kak-nadezhnaya-i-bezopasnaya-tehnologiya-svyazi.html>

4. Semtech and Swarm Deliver Satellite Communications With LoRa® / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.semtech.com/company/press/semtech-and-swarm-deliver-satellite-communications-with-lora>

5. Обзор технологии LoRa / Электронный ресурс. Режим доступа: <https://itechinfo.ru/content/%D0%BE%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8-lora>

References

1. Standart NB-IoT Low-Power and Wide-Area, LPWA. Energoeffektivnaya set dalnego radiusa deystviya / Available from: [https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82_NB-IoT_Low-Power_and_Wide-Area,_LPWAN_\(%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%8D%](https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BD%D0%B4%D0%B0%D1%80%D1%82_NB-IoT_Low-Power_and_Wide-Area,_LPWAN_(%D0%AD%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%BE%D1%8D%)

2. Perspektivy razvitiya ryinka energoeffektivnykh setey dalnego radiusa deystviya / Available from: <http://vestnik-glonass.ru/news/tech/perspektivy-razvitiya-rynka-energoeffektivnykh-setey-dalnego-radiusa-deystviya/>

3. LoRaWAN kak nadezhnaya i bezopasnaya tehnologiya svyazi / Available from: <https://www.connect-wit.ru/lorawan-kak-nadezhnaya-i-bezopasnaya-tehnologiya-svyazi.html>

4. Semtech and Swarm Deliver Satellite Communications With LoRa® / Available from: <https://www.semtech.com/company/press/semtech-and-swarm-deliver-satellite-communications-with-lora>

5. Obzor tehnologii LoRa / Available from: <https://itechinfo.ru/content/%D0%BE%D0%B1%D0%B7%D0%BE%D1%80-%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D0%B8-lora>