

УДК 621.396.93

**ОПТИМАЛЬНІ НАЛАШТУВАННЯ LORA-МОДЕМУ
ДЛЯ СУПУТНИКОВОЇ РАДІОЛІНІЇ LEO
З УРАХУВАННЯМ ДОПЛЕРОВСЬКИХ ЕФЕКТІВ**

Дмитренко В.В., Ликов Ю.В., Ликова Г.О.

e-mail: yurii.lykov@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. ІРТЗІ
м. Харків, Україна

This paper addresses the selection of LoRa modem parameters for low-Earth-orbit (LEO) satellite links, where large Doppler frequency offsets and, more importantly, rapid Doppler variation can degrade packet reception. A practical engineering procedure is proposed to choose bandwidth and spreading factor under combined constraints: carrier frequency offset budget (Doppler and oscillator tolerance) and Doppler-rate tolerance that depends on the receiver generation. For legacy SX12xx/SX1301-class receivers the limiting factor is packet-level drift over the time-on-air, which may create a near-zenith ‘dead zone’, while LR11xx/SX1302-class receivers show improved robustness due to symbol-level tracking. The recommendations are validated using packet statistics collected from a community ground-station network. The results provide parameter ranges and visibility windows that can be used for planning LEO LoRa downlinks and configuring gateways.

Супутникові системи з малою вартістю абонентського обладнання активно використовують технології класу LPWAN. Серед них LoRa вирізняється високою завадостійкістю та гнучкістю налаштувань, однак у каналі зв'язку із супутниками на низьких навколосемних орбітах (LEO) з'являється специфічне обмеження: значний доплерівський зсув несучої частоти та висока швидкість його зміни під час прольоту. Як наслідок, параметри, що є оптимальними для наземних мереж, можуть призводити до зниження імовірності прийому пакетів або появи «мертвих зон» у видимості.

Метою роботи є формування практичних рекомендацій щодо вибору смуги пропускання (BW) та коефіцієнта розширення спектра (SF) для супутникової LoRa-радіолінії з урахуванням частотного бюджету (carrier frequency offset, CFO) та обмежень за швидкістю зміни частоти Доплера (Doppler rate), які залежать від покоління приймача. На вході алгоритму задаються: робоча частота f_0 , висота орбіти h , допустимий діапазон кута місця ϵ , сумарна похибка опорних генераторів (ppm) та розмір корисного навантаження.

Обмеження за CFO формулюється як вимога, щоб сумарний зсув частоти (доплерівський внесок і похибка опорних генераторів передавача та приймача) не виходив за межі, що допускаються демодулятором LoRa для заданої BW. З практичного погляду це означає, що надто вузька смуга BW

може бути непридатною для LEO навіть при використанні ТСХО з похибкою одиниці–десятки ppm. Оціночні значення максимального доплера в LEO для діапазонів 433 та 868 МГц мають порядок десятків кГц, тому для забезпечення частотного запасу доцільно використовувати BW не нижче 62,5 кГц (для 433 МГц) та 125 кГц (для 868 МГц) як базову інженерну рекомендацію.

Другий критичний фактор – Doppler rate. Навіть якщо миттєвий CFO знаходиться в допустимих межах, швидка зміна частоти під час прольоту може перевищувати можливості внутрішніх механізмів відстеження в приймачі. Для модемів першого покоління SX12xx/SX1301 ліміт задається дрейфом частоти протягом усього пакета, тобто прямо залежить від часу в ефірі (Time-on-Air). В таких системах підвищення SF або збільшення розміру корисного навантаження збільшує тривалість пакета, зменшує допустиму швидкість дрейфу та може формувати область поблизу зеніту, де прийом стає малоімовірним. Для новіших приймачів класу LR11xx/SX1302 обмеження наближається до дрейфу за тривалість символу, що підвищує стійкість до Doppler rate і розширює допустимий діапазон SF при тих самих орбітальних умовах.

Запропонована процедура вибору параметрів для балансування між бюджетом радіолінії та можливістю модема декодувати сигнал із певним Доплерівським зміщенням і швидкістю зміни частоти. Не оптимально підібрані параметри LoRa модему сприятимуть утворенню «мертвої» зони у формі кола навколо наземної станції що до швидко рухомих супутників. Розміри цієї зони більш за все залежать від перевищення можливостей модему опанувати швидкість зміни частоти супутника, що пролітає повз. У практичній постановці критерій вибору може задаватися як: максимізувати SF (бюджет радіолінії) за умови уникнення утворення «мертвих» зон прийому, та обрати BW відповідно до довжини корисного навантаження щоб не перебільшити допустиму зміну частоти за період часу пакету (для нових модемів – символу) у ефірі.

Для валідації рекомендацій використано статистику прийому пакетів із мережі аматорських наземних станцій, що дозволяє зіставити розрахункові межі з реальними даними прольотів. Порівняння двох груп супутників/передавачів демонструє, що у випадках з більш жорсткими обмеженнями за Doppler rate частка прийнятих пакетів у зоні великих кутів місця суттєво зменшується, тоді як для більш стійких конфігурацій «мертва зона» не проявляється або має значно меншу ширину. Отримані результати узгоджуються з теоретичним очікуванням: близько до зеніту Doppler rate максимальний, але одночасно енергетика каналу зазвичай найкраща; тому оптимальні налаштування мають бути результатом балансу цих двох груп факторів.

Практичні рекомендації для проектування супутникової LoRa-лінії такі:

–по-перше, за можливості обирати нижчі частотні діапазони, оскільки доплерівський зсув у герцах пропорційний робочій частоті;

–по-друге, забезпечувати достатній частотний запас: для LEO-сценаріїв використовувати BW від 62,5 кГц (433 МГц) або від 125 кГц (868 МГц) з урахуванням сумарної похибки опорних генераторів;

–по-третє, для приймачів SX12xx/SX1301 мінімізувати Time-on-Air (менший SF, менший payload, більший BW) у тій частині траєкторії, де Doppler rate найбільший, або вводити планування сеансів зв'язку за кутом місця, уникаючи області, де прогнозовано перевищуються межі дрейфу;

–по-четверте, для приймачів LR11xx/SX1302 можливе використання вищих SF без втрати працездатності за Doppler rate, що покращує бюджет лінії і розширює дальність прийому.

Подальший розвиток роботи доцільно спрямувати на поєднання частотних критеріїв з повним бюджетом зв'язку (діаграма спрямованості, поляризаційні втрати, втрати в тракті, рівень завад), а також на реалізацію компенсації частоти Доплера (pre-compensation або супровід частоти) у шлюзі/SDR-приймачі для максимального використання області високих кутів місця.

Список використаних джерел:

1. Semtech Corporation. LoRa Modem Design Guide. Application Note AN1200.22. Rev. 2. 2013.

2. Semtech Corporation. SX1272/73 LoRa Modem Datasheet. Rev. 6. 2019.

3. Semtech Corporation. LR11xx Long Range Transceiver Datasheet. Rev. 3. 2022.

4. Semtech Corporation. SX1302/SX1303 LoRa Gateway Baseband Datasheet. Rev. 1. 2020.

5. TinyGS. Community Ground Station Network for Satellites. Офіційний вебсайт.