

УДК 004.94:621.396.946

DOI: 10.31673/2412-9070.2023.041020

Н. В. РУДЕНКО, канд. техн. наук, доцент;

А. О. МАКАРЕНКО, доктор техн. наук, професор;

Н. С. ХАБ'ЮК,

Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ

ОЦІНЮВАННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

Статтю присвячено дослідженню та оцінюванню пропускної здатності супутникових систем зв'язку. Важливим кроком для підвищення ефективності будь-якої супутникової системи є застосування посиленних методів кодування з виправленням помилок під час передавання даних. Цей підхід дає змогу забезпечити більшу надійність та стійкість зв'язку, особливо за умов погіршеної погоди або інших завад, що можуть впливати на якість сигналу.

Застосування кодування з виправленням помилок полягає у вставленні додаткової інформації в передавання даних, яка дає можливість відновлювати втрачену інформацію у разі її пошкодження або втрати під час передавання. Цей процес потребує обчислювальних ресурсів і спеціальних алгоритмів, але він значно підвищує надійність зв'язку.

Завдяки кодуванню з виправленням помилок Starlink може забезпечувати стабільний інтернет навіть за умов, коли інші супутникові системи можуть втрачати зв'язок через інтерференцію або погодні умови. Це особливо важливо для користувачів, які розраховують на надійний доступ до мережі в будь-який момент.

Ключові слова: Starlink; імітаційне комп'ютерне моделювання; передавання даних; супутниковий інтернет; завадостійкість; кодування; пропускна здатність.

Вступ

Сьогодні існує велика різноманітність варіантів побудови каналів передавання інформації. Супутниковий інтернет став важливим засобом зв'язку і доступу до інтернету, особливо у сферах, де інфраструктура проводового інтернету обмежена або відсутня. Ширококутний інтернет дуже важливий для сучасного суспільства, яке все більше стає залежним від цифрових технологій і мережного зв'язку. Супутникові технології дають змогу забезпечити доступ до інтернету в будь-якому куточку планети, де є можливість встановити приймальну антену та обладнання. Це особливо актуально для сільських та віддалених районів, де проводовий інтернет не завжди є доступним.

Ширококутний супутниковий інтернет вирішує проблему обмеженої пропускної здатності, яка часто виникає в проводових мережах. Це дає змогу користувачам не лише отримувати доступ до інтернету, а й використовувати його для потокового відео, онлайн-ігор, відеоконференцій та інших вимогливих застосунків.

Завдяки постійному розвитку супутникових технологій і щораз більшої кількості операторів, які надають послуги супутникового інтернету, цей вид зв'язку стає все доступнішим та ефективнішим для різних категорій користувачів.

Основна частина

Пропускна здатність є однією з найважливіших характеристик будь-якої системи передавання даних. Застосування методів багатопозиційної модуляції дає змогу забезпечити високі швидкості передавання завдяки збільшенню кількості рівнів сигналу, але обмежене пропускною здатністю системи [1]. Відомо, що зростання кількості рівнів сигналу призводить до зниження завадостійкості сигналу, тому виникає потреба в розробленні інших способів нарощення пропускної здатності, які можуть зумовлювати менші втрати сигнал/шум. Підвищення пропускної здатності та спектральної ефективності дає змогу знизити витрати на використання виділеної смуги частот.

Однак зі зростанням пропускної здатності системи передавання та швидкості передавання даних збільшується і загальна вартість компонентів системи, а також імовірність помилок під час передавання даних. Оптимальне співвідношення між значеннями цих параметрів — найважливіший фактор для операторів і виробників обладнання.

Сьогодні одним із найбільших у світі операторів і виробників обладнання для телекомунікаційних послуг є SpaceX, що розвиває мережу супутників Starlink [2], через які надає послуги швидкого ширококутного доступу до інтернету.

Супутникова система Starlink — це провідний гравець на ринку супутникового інтернету, котрий надає кілька важливих переваг:

- **глобальне охоплення:** пропонує послуги інтернету практично на всій планеті;
- **широка пропускна здатність:** завдяки великій кількості супутників у констеляції може надавати велику пропускну здатність, що дає змогу користувачам використовувати послуги високошвидкісного інтернету для потокового відео, онлайн-ігор і багатьох інших застосунків;
- **низька затримка (латентність):** це робить його більш придатним для вимогливих застосунків, зокрема відеоконференцій та онлайн-ігор;
- **мобільність:** здатність використовувати під час подорожей, на відпочинку або в будь-якому іншому місці, де є можливість встановити антену;
- **загальна доступність:** розширення і покращення сервісу, що робить його доступним для ще більшої кількості людей у майбутньому;
- **конкурентоспроможні ціни:** порівняно з іншими супутниковими інтернет-постачальниками відносно конкурентоспроможні ціни за високошвидкісний інтернет.

У статті розглядатиметься оцінювання пропускної здатності на прикладі глобальної супутникової системи Starlink. Додано підсилення коду завдяки додаванню кодування з виправленням помилок до розрахунку. На високих частотах висоту орбіти обмежено 340 км. На такій висоті планується розмістити більшість супутників. Для нижчих частот можна використовувати вищі орбіти: 550 і 1110 км. Сьогодні спектральну ефективність можливих варіацій Starlink обмежено 4,5 біт/Гц.

На момент написання цієї статті на орбіті перебуває приблизно 3300 супутників Starlink, що теоретично забезпечує пропускну здатність майже 33 Тбіт/с завдяки зниженому рівню модуляції і використанню тільки однієї поляризації. Після закінчення першого етапу виведення супутників на орбіту потужність системи становитиме 88,5 Тбіт/с на більшій частині досліджуваного діапазону частот, і він розширюватиметься, коли на нижню орбіту буде запущено більше супутників.

У 2017 році стало відомо, що угруповання супутників SpaceX матиме у своєму складі 11 943 супутники. Крім початкових 4425 апаратів на висотах 550 і 1110 км, в угруповання планується додати 7518 супутників на більш низьких орбітах — від 335 до 346 км. Згідно з проектом усі пристрої будуватимуться в режимі однорангового з'єднання. Кожен супутник у мережі буде самостійною одиницею, одночасно виконуючи функції і клієнта, тобто учасника мережі, і сервера, який керує її сегментами. Це має розширити канали зв'язку і збільшити швидкість доступу в густонаселених районах — істотно нижче розташування супутників знизить затримку сигналу до 25 мс [3; 4]. Для порівняння, в стільникових мережах стандарту 4G затримка становить у середньому від 7...8 мс, але може бути і більшою залежно від навантаження на мережу і віддаленості веж стільникового зв'язку. SpaceX вивела на орбіту 3449 супутників Starlink під час 65 запусків Falcon 9, із них приблизно 3300 працюють нормально.

Пропускна здатність супутника [5; 6] Starlink становитиме 20 Гбіт/с під час роботи в двох поляризаціях і з 64-QAM (квадратурною амплітудною модуляцією) [7]. При цьому швидкість коду виправлення помилок досягає 0,95, а спектральна ефективність 7,45 дБ. Це значення майже вдвічі вище, ніж в інших супутникових методах ширококутового доступу до інтернету. Але сьогодні мережа може використовувати лише одну поляризацію. Для роботи з 64-QAM модуляцією потрібно мати відношення сигнал/шум більш як 17 дБ. Однак цей параметр на терміналі УТ-1 становить від 11 до 12,5 дБ, що відповідає 16-32-APSK (амплітудна і фазова маніпуляція) і має спектральну ефективність максимум 4,5 біт/Гц.

Отже, характеристики системи будемо оцінювати за енергетичним бюджетом ланки [7]. Потужність, отриману на терміналі користувача, можна подати у вигляді:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - L_{tx} - L_{rx} - L_{atm} - L_p \quad (1)$$

де P_{tx} — потужність передавача; G_{tx} і G_{rx} — коефіцієнти підсилення відповідно передавача і приймача; L_{tx} і L_{rx} — втрати відповідно на передавач і приймач; L_{atm} — втрати в атмосфері; L_p — втрати, внесені на шляху поділом між передавачем і приймачем.

Варто зауважити, що потужність передавача P_{tx} залежить від динамічного розподілу, а коефіцієнт підсилення передавача G_{tx} — від технології антени (діаметр антени d , довжина хвилі λ). Отже, маємо:

- параболічний: $G_{tx} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{\eta_a \pi d}{\lambda} \right)$;
- фазова решітка: $G_{tx} = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4 \eta_a \pi \sqrt{m^2}}{\lambda} \right)$.

Підсилення приймача на шумі G_{rx} на основі типу терміналу користувача:

- параболічний: $G_{rx} = 5,24$ дБ;
- фазова решітка: $G_{rx} = 10,8$ дБ.

Атмосферні втрати L_{atm} залежать від діапазону частот і атмосферного тиску P_{atm} , середні значення такі:

- X-діапазон $L_{atm} = 0,61$ дБ/км;
- Ку/Ка- діапазон $L_{atm} = 0,97$ дБ/км;
- V-діапазон $L_{atm} = 7,42$ дБ/км.

Для моделювання атмосферних втрат було використано Matlab, результати якого зображено на рис. 1.

На графіку (див. рис. 1) показано сплеск параметра L_{atm} на 60 ГГц. Для зменшення впливу атмосферних втрат бажано застосовувати діапазон частот до 53 ГГц, що відповідає частотному плану. Для передавання за висхідною лінією зв'язку було використано частоти 14...52,4 ГГц, а для передавання за низхідною лінією зв'язку — частоти 10,7...42,5 ГГц.

Отже, втрати L_p на шляху вільного простору, у децибелах, визначатимуться за виразом

$$L_p = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right).$$

Для розрахунків було взято вихідні дані (таблиця).

Втрати на шляху вільного простору є основним фактором втрати потужності (рис. 2). На висотах, розрахованих для супутників Starlink, це значення становить 160...175 дБ. Загальні втрати від втрат на шляху вільного простору та атмосферних втрат становлять 165...185 дБ.

Коли сигнал проходить через атмосферу, він поступово слабшає. Загасання також відбувається на передавальних і приймальних пристроях. Ступінь послаблення залежить від багатьох параметрів і обмежує висоту орбіти супутників. Для підвищення завадостійкості систем прийнято використовувати код виправлення помилок. Для забезпечення мінімальної ймовірності помилки необхідний запас відношення сигнал/шум на прийманні, який залежить від типу модуляції. На високих частотах висота орбіти обмежена 340 км, тому на такій висоті планується розмістити більшість супутників, а для нижчих частот можна використовувати вищі орбіти 550 і 1110 км.

Ємність системи згідно з теоремою Шеннона є максимальна швидкість передавання інформації в системі. Система зв'язку зазнає впливу шуму, причому шум Джонсона надає найбільшу потужність діапазонам.

Отже, маємо:

- спектральна густина потужності шуму Джонсона:

$$N_0 = k \cdot T,$$

де $k = 1,3806 \cdot 10^{-23}$ — постійна Больцмана; T — температура;

- відношення сигнал/шум:

$$SNR = \frac{P_{rx}}{P_n} = \frac{P_{rx}}{k \cdot T \cdot BW},$$

де P_n — потужність шуму; BW — пропускна здатність;

- інформаційна швидкість DR розраховуватиметься за допомогою формули Шеннона-Хартлі:

$$DR = BW \cdot \log_2(1 + SNR).$$

Швидкість передавання даних на супутник становить 10 Гбіт/с із використанням лише однієї поляризації. Ємність системи в цілому [7] обчислюється як добуток швидкості інформації на супутник і кількості супутників n_{sat} :

$$C_{ch} = DR \cdot n_{sat}.$$

Підвищення рівня модуляції призводить до збільшення потужності, однак у разі досягнення певного рівня подальше збільшення потужності значно сповільнюється або навіть спостерігається її зменшення (рис. 3).

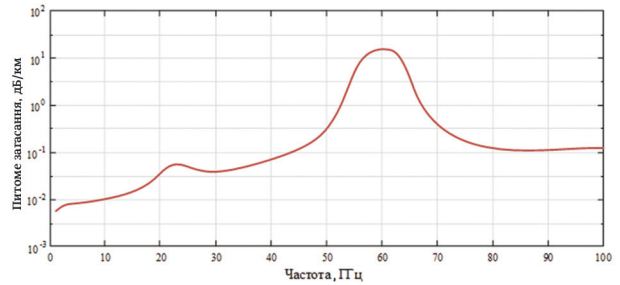


Рис. 1. Моделювання атмосферних втрат

Параметри моделювання бюджету посилення

| Параметр | Значення | Параметр | Значення |
|----------|----------|-----------|-----------|
| η_a | 1 | d | 5 м |
| m | 400 кг | P_{atm} | 101,3 кПа |
| L_{tx} | 0,5 дБ | L_{rx} | 0,5 дБ |

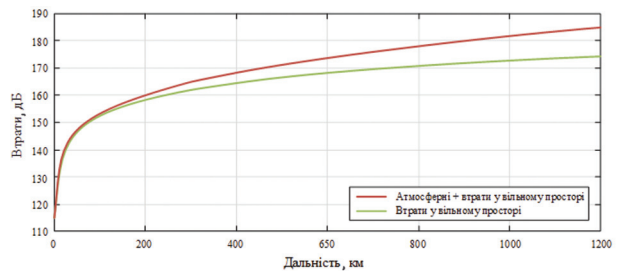


Рис. 2. Втрати на шляху вільного простору та атмосферні втрати

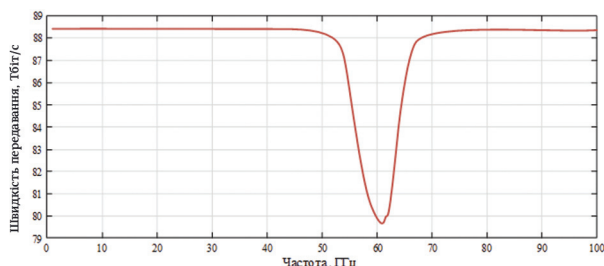


Рис. 3. Залежність потужності системи від смуги частот

раза менше, ніж заявлена пропускна здатність на момент закінчення першого етапу виведення супутників на орбіту.

Висновки

Отже, за результатами проведених експериментів можна дійти висновку, що затребувана в усьому світі супутникова система Starlink зможе забезпечити доступ до інтернету в будь-якій точці світу з високою пропускною здатністю та спектральною ефективністю.

Для забезпечення мінімальної ймовірності помилки потрібний запас відношення сигнал/шум на прийманні, який залежить від типу модуляції. Однак використовуються двійкові та четвертинні методи модуляції. На високих частотах висота орбіти обмежена 340 км. Тому пропускна здатність угруповання супутників досягає лише 20 Тбіт/с, що приблизно в 4,5 рази менше, ніж заявлена пропускна здатність наприкінці першого етапу виведення супутників на орбіту.

Слід також зазначити, що радіус дії терміналу Starlink може залежати від погоди. Пролітний дощ, сніг і сильний вітер можуть зменшити радіус дії терміналу. Якщо ви зіткнулися з будь-яким із цих станів, важливо вжити заходів, щоб захистити термінал і переконатися, що він здатний отримувати найсильніший сигнал.

Список використаної літератури

1. Sklar B. *Digital Communications, Fundamentals and Applications*. 2nd ed. Prentice Hall PTR, 2001.
2. *World's most advanced broadband satellite internet. Starlink*. URL: <https://www.starlink.com/technology>
3. Cakaj S. *The Parameters Comparison of the 'Starlink' LEO Satellites Constellation for Different Orbital Shells // Communications and Networks*. 2021. Vol. 2, no. 7.
4. *Broadband LEO constellations for navigation / T. G. Reid [et al.] // Navigation, Journal of the Institute of Navigation*. 2018. Vol. 65, no. 2. P. 205–220.
5. *Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications / T. G. Reid [et al.] // Wiley-IEEE*. 2020. Vol. 1. ch. *Navigation from Low Earth Orbit: Part 1: Concept, Capability, and Future Promise*. P. 1359–1380.
6. *Kassas Z. M. Position, Navigation, and Timing Technologies in the 21st Century: Integrated Satellite Navigation, Sensor Systems, and Civil Applications // Wiley-IEEE*. 2020. Vol. 1. ch. *Navigation from Low Earth Orbit: Part 2: Models, Implementation, and Performance*. P. 1381–1412.
7. *Tradespace exploration of the next generation communication satellites / A. Aguilar, P. Butler, J. Collins, M. Guerster // AIAA Scitech 2019 Forum*, 2019.
8. Proakis J. G., Salehi M. *Digital Communications, 5th ed. McGraw-Hill*, 2007.

N. V. Rudenko, A. O. Makarenko, N. S. Khabiuk

EVALUATION OF THE BANDWIDTH OF SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS

The article is devoted to research and evaluation of the bandwidth of satellite communication systems. An important step to improve the efficiency of any satellite system is the use of enhanced coding techniques with error correction during data transmission. This approach makes it possible to ensure greater reliability and stability of communication, especially in conditions of bad weather or other obstacles that can affect the quality of the signal.

The application of error-correcting coding consists in inserting additional information into the data transmission, which allows the recovery of lost information in the event that it is damaged or lost during transmission. This process requires computing resources and special algorithms, but it significantly increases the reliability of communication.

Thanks to error-correcting coding, Starlink can provide stable Internet even in conditions where other satellite systems may lose communication due to interference or weather conditions. This is especially important for users who rely on reliable access to the network at any time.

Keywords: Starlink; simulated computer modeling; data transfer; satellite Internet; interference resistance; coding; bandwidth.