

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ FREESPACE OPTICAL У БЕЗПРОВОДОВИХ МЕРЕЖАХ П'ЯТОГО ПОКОЛІННЯ 5G

Токар Л.О., Рязанов С.С.

Харківський національний університет радіоелектроніки,
кафедра інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського
Україна

Е-mail: liubov.tokar@nure.ua,
serhii.riazanov@nure.ua

Abstract

It is shown that the advantage of FSO optical wireless communication over traditional technologies lies in high-bandwidth data transmission. The FSO channel consisting of a transmitter, an atmospheric channel, and a receiver is analyzed. It has been proven that the main physical phenomena during signal propagation using FSO technology are phenomena related to optical scattering, propagation and radiation on the Earth's surface. The general attenuation of the signal passing through the FSO communication line is given. The decision to use FSO channels in the context of wireless networks of the fifth generation 5G - wireless backhaul/fronthaul channel, as cost-effective and easy to deploy, is considered and analyzed.

Широкий спектр технологій оптичного зв'язку відповідає потребам високошвидкісної передачі, що є основною перевагою оптичного безпроводового зв'язку перед традиційними технологіями. З появою нових технологій, таких як Інтернет речей, великі дані, хмарні обчислення, віртуальна реальність та штучний інтелект, зростає потреба у передачі даних із високою пропускну здатністю, що підвищує планку для технологій оптичного безпроводового зв'язку й визначає актуальність роботи.

Для успішної передачі оптичних сигналів системи зв'язку Free Space Optical (FSO) використовується вільний простір як канал зв'язку між приймачами, що знаходяться в зоні прямої видимості Line of Sight (LOS). Канал може бути атмосферним, космічним або вакуумним, а його характеристики визначають обмін даними з використанням технології FSO шляхом поширення світла по атмосферним або космічним маршрутам, що дозволяє здійснювати оптичне з'єднання. Зв'язок FSO забезпечує високу швидкість передачі для задоволення швидкозростаючого попиту на широкосмуговий трафік [1]. FSO забезпечує набагато більшу свободу при створенні проєктів оптичних мереж на дуже високих швидкостях у десятки та сотні Гбіт/с порівняно з волоконно-оптичними технологіями.

Канал FSO складається з передавача, атмосферного каналу та приймача. Як показано на рис. 1, передавач у каналі FSO використовується для передачі інформаційного сигналу у вільному просторі шляхом модуляції електричного інформаційного сигналу в оптичний сигнал. Передавальний модуль складається з генератора імпульсів, модулятора, аналізатора спектра та передавача. Генератор імпульсів, який використовується в каналі, генерує імпульси, де передача ведеться в електричній формі. Аналізатор спектру використовується для відображення масштабу вхідного сигналу в залежності від частоти в межах повного частотного діапазону пристрою. Оптичний сигнал проходить вільний простір, приймається приймачем і перетворюється на електричний сигнал [2]. Приймач складається з підсилювача, фотодетектора, фільтра, аналізатора бітових помилок Bit Error Ratio (BER) та спектрального аналізатора для правильного вилучення інформаційного сигналу. Підсилювач, що використовується в каналі, покращує потужність сигналу, фотодетектор виявляє вхідний оптичний сигнал і після перетворення його в електричну форму передає сигнал на фільтр.

Фільтр зменшує шум навколишнього середовища та дозволяє пропускати через нього потрібну довжину хвилі сигналу. Аналізатор BER використовується для визначення точності сигналу [3].

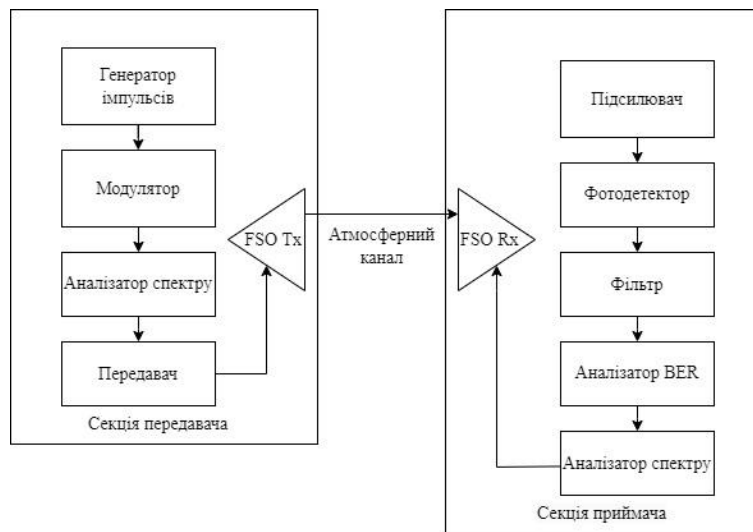


Рис. 1. Канал FSO

У якості основних фізичних явищ при поширенні сигналу з використанням технології FSO слід назвати явища, пов'язані з оптичним розсіюванням, поширенням і випромінюванням на поверхні Землі. Результати досліджень свідчать про те, що значно знижують можливість передачі даних такі явища: дощ, дим, пил, туман та водяний пар [4].

Атмосферні умови в каналі FSO загалом можна розділити на три категорії, а саме: ясна погода, хмари та дощ. Ясні погодні умови характеризуються великою видимістю та відносно низьким загасанням. Хмарні погодні умови коливаються від серпанку або туману до важких хмар і характеризуються низькою видимістю, високою вологістю та великим загасанням. Дощ характеризується наявністю крапель дощу різних розмірів, що може серйозно впливати в залежності від інтенсивності опадів. Присутність молекул води у повітрі вказує на те, що фотони (частки світла) можуть поглинатися за рахунок розсіювання, заломлення або поглинання, що призводить до повної втрати сигналу. Крім того, оптичний зв'язок у відкритому просторі може бути тимчасово заблокований птахами, безпілотними літальними апаратами або повітряними об'єктами. А високі будівлі та дерева можуть бути причинами тривалого блокування [4].

Загальне загасання сигналу, що проходить через лінію зв'язку FSO, відображено у формулі (1), дБ/км:

$$\alpha = \alpha_{\text{туман}}_{\gamma} + \alpha_{\text{дощ}}_{\gamma} + \alpha_{\text{розсіювання}}_{\gamma}, \quad (1)$$

де α – згасання;

γ – робоча довжина хвилі.

Таким чином, причини загасання сигналу обумовлені поглинанням атмосферними частинками і спостерігаються на певних довжинах хвиль, і тому вибір довжини хвилі для ліній зв'язку FSO має бути зроблено в діапазоні пропускання високого сигналу [5]. Оскільки змінити атмосферні умови неможливо, то відповідним чином вибирається довжина хвилі лазера, що використовується для оптичного зв'язку у вільному просторі. В даний час використовуються смуги з довжиною хвилі близько 0,8 мкм та 1,5 мкм [6].

Одним із цікавих рішень використання каналів FSO у контексті безпроводових мереж п'ятого покоління 5G у роботі розглянуто безпроводовий канал backhaul/fronthaul, як економічно ефективний та простий у розгортанні (рис.2) [7].

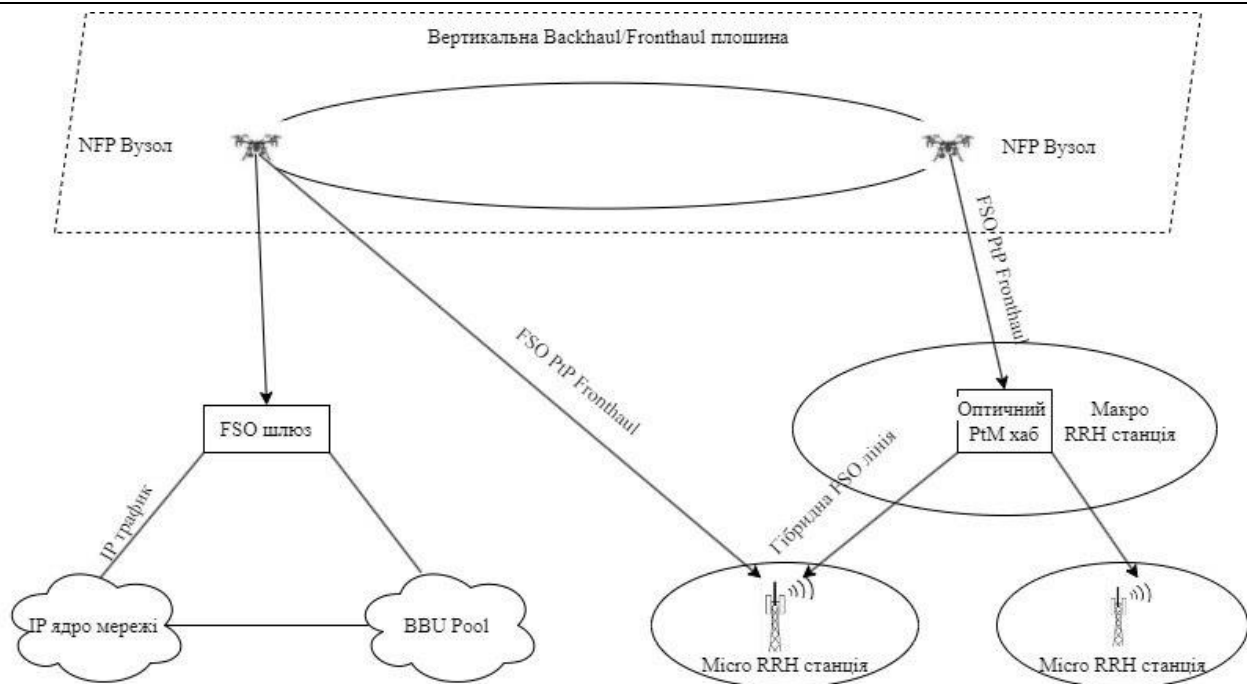


Рис. 2. Вертикальна структура fronthaul/backhaul для безпроводової мережі 5G

Рис. 2 характеризує графічну ілюстрацію системи, яка називається вертикальною backhaul/fronthaul структурою для безпроводових мереж 5G.

Фактично це багаторівнева Heterogenic Networks (HetNet), де надщільні мікросоти накладаються на макросоти в межах деякої географічної області. Таку систему можна назвати доповненням до наземної мережі backhaul/fronthaul, яка може бути розгорнута в багатьох складних умовах, наприклад, через збій у наземній транспортній мережі або тимчасовий попит на канал backhaul/fronthaul. Крім того, така система також здатна запропонувати backhaul/fronthaul для базових станцій малого стільникового зв'язку Small Cell Base Station (SBS), які розташовані у важкодоступних районах, де оптоволоконні або мікрохвильові лінії зв'язку можуть бути недоступні і дороги в розгортанні. Прикладами таких місць можуть бути сільські, віддалені або міські райони з навколишніми будівлями.

Мережа backhaul/fronthaul використовує мережні літальні платформи Networked Flying Platforms (NFP) та технологію FSO як транспортну мережу, яка зв'язує SBS та базову мережу.

Система має вертикальну площину backhaul/fronthaul, що складається з кількох підключених NFP – вузлів NFP. Висота польоту може змінюватись від кількох сотень метрів до кількох кілометрів (зазвичай близько 20 км) в залежності від зони покриття, погодних умов та обслуговуючої здатності NFP. NFP переміщуються автономно в режимі групи NFP, яка контролюється головним вузлом NFP, та з'єднує групу NFP із базовою мережею на землі. Всі з'єднання ґрунтуються на зв'язках FSO. Зв'язок між SBS або точками агрегації та NFP заснований на променях з'єднання "крапка-крапка" Point-to-Point (PtP) FSO. Імовірність з'єднання LOS між наземною точкою та NFP збільшується зі збільшенням висоти NFP. Тому NFP повинен переміщатися на висоті, достатньо високої, щоб гарантувати з'єднання LOS.

Лінія LOS з NFP доставляє/отримує свій висхідний/низхідний трафік за допомогою передбачуваного NFP через лінію FSO. З іншого боку, SBS без LOS з NFP можуть обслуговуватися найближчою SBS, яка має чітку LOS з NFP. Як додатковий варіант, замість підключення кожної окремої SBS до NFP трафік передається від SBS до NFP розподіленим чином. Трафік SBS ретранслюється на зазначений SBS, де розташований концентратор агрегації, і доступна LOS з NFP. Таке розподілене рішення має більшу енергоефективність, ніж централізоване рішення, де трафік SBS доставляється на макро-базову станцію (БС) [7].

Аналогічно, SBS, що обслуговуються NFP, оснащені системами стеження, щоб автоматично спрямовувати промінь на бажаний NFP. NFP оснащені керованими блоками FSO з оптичними пристроями керування променем для встановлення безпроводових з'єднань з технологіями радіодоступу або точками концентратора на Землі через промені FSO.

Інтерес до безпілотних літальних апаратів різних типів обумовлений можливістю їх переміщення з використанням платформ різної висоти - висотних/середньовисотних/низьковисотних High-Altitude/Medium-Altitude/Low-Altitude Platforms (HAPs/MAPs/LAPs) з можливістю надання послуг зв'язку у галузі FSO. Вертикальна структура backhaul/fronthaul на основі FSO пропонує більш високі швидкості передачі даних, ніж базові альтернативи, і, таким чином, може розглядатися як рішення для backhaul/fronthaul безпроводових мереж 5G+, особливо за наявності надщільних гетерогенних малих сот.

Мікрохвильовий backhaul спирається на певні частотні діапазони у діапазоні 6-60 ГГц. Крім того, технологія FSO прямої видимості привертає увагу, оскільки спирається на вузькі безліцензійні промені з'єднання «крапка-крапка» PtP.

У даному контексті важливим фактором є облік того, що поточні рішення backhaul/fronthaul транспортування, засновані на доставці трафіку малих сот у точку агрегації з використанням центрального концентратора і розміщення концентратора LOS, можуть виявитися неможливими. Це може бути пов'язано з умовою, що при надщільному розгортанні малих сот, особливо в надщільних міських районах, деякі малі соти розгортаються в важкодоступних районах, в яких поширення LOS неможливе. Тому в таких сценаріях використовуються рішення LOS з'єднання «крапка-багатокрапка» Point-to-Multipoint (NLOS PtM), які спираються на ліцензований спектр нижче 6 ГГц або мікрохвильові частоти, і можуть використовуватися за рахунок сильних завад, перевантаження та вищої вартості [8].

Таким чином, представлена структура мережі заснована на NFP, які можуть нести важке корисне навантаження (FSO-трансивери), переміщатися в повітрі у квазістаціонарному положенні з можливістю переміщення по горизонталі та вертикалі та пропонувати безпроводові з'єднання з SBS backhaul/fronthaul зв'язку.

Особливість такої структури полягає в тому, що NFP можуть більшу частину часу переміщатися тільки в залежності від погодних умов, вимог до покриття і навіть через деякі зміни або аномалії трафіку в реальному часі в мережі. NFP може пересуватися як автономно, так і неавтономно. У неавтономній роботі NFP керується віддалено людиною-оператором на Землі. В автономній роботі NFP може виконувати завдання без необхідності прямого керування людиною. NFP можуть працювати або в режимі одного NFP або в режимі групи NFP.

В роботі представлено вертикальну структуру для backhaul/fronthaul SBS з використанням NFP, у вигляді ретрансляції SBS у базову мережу. Доведено, що система буде розгорнута як додаткове рішення до наземних рішень для забезпечення високонадійного backhaul/fronthaul транспортного каналу для складних надщільних розгортань SBS. Ефективність представленої структури полягає в високому бюджеті каналу та досяжної швидкості передачі даних для одного каналу FSO за різних погодних умов.

Література

1. Nguyen T.N., Liu B.H., Wang S.Y. On new approaches of maximum weighted target coverage and sensor connectivity: Hardness and approximation. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*. Vol. 7 (3). 2019. P. 1736–1751.
2. Majumdar A. K. and Ricklin J. C. *Free Space Laser Communications. Principles and Advantages*, Berlin: Springer. 2008. 233 p.
3. Mohamed A. E. N. A., Sharshar H. A., Rashed A. N. Z. and El-Nabawy A. Integrated Service Quality Enhancement of Wireless Optical Communication Systems for Long Haul Transmission Distances. *Canadian Journal on Electrical and Electronics Engineering*. Vol. 2 (12). 2011. P. 557–570.
4. Kaushal H. *Free Space Optical Communication*. California Springer. 2017. P. 44-47.
5. Clark R.N. *Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy & in Manual of Remote Sensing*. Chapter 1. Vol. 3. New York: Wiley. 1999. 263 p.
6. Mikhailov P. Multifunctional fiber optic sensors for space infrastructure. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol.5. No 5. 2021. P. 5 – 6.
7. Mohamed A. et al. FSO-based vertical backhaul/fronthaul framework for 5G+ wireless networks. *IEEE Communications Magazine*. Vol. 56. 2018. P. 218-224.
8. Siddique U., Tabassum H., Hossain E. and Kim D. I. Wireless backhauling of 5G small cells: challenges and solution approaches. *IEEE Wireless Communication*. Vol. 22. No. 5. P. 22–31.