

УДК 621.396; 621.3831

Кременецька Я. А., к.т.н.

ВОЛОКОННО-ЕФІРНА АРХІТЕКТУРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ В МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ З ДИСТАНЦІЙНИМ ГЕТЕРОДИНУВАННЯМ**Kremenetska Ya.A. Fiber-wireless architecture of a millimeter-wave telecommunication network with remote heterodyning.**

Photon methods of generation, modulation and transmission of millimeter-wave radio signals are the key to the practical implementation of fiber-wireless integrated systems and telecommunications networks. The use of remote heterodyning signals in the millimeter range will be able to reduce the influence of polarization mode dispersion and other linear and nonlinear optical distortions in such systems. Such advantages can contribute to the implementation of multiplexing with separation by polarization, the implementation of adaptive systems of choice of radio frequencies (millimeter-band sub bands), can also improve the efficiency of using MIMO technology. For the complex structure of future telecommunication networks in which seamless integration of various technologies is required, fiber-wireless technologies with remote optical switching can effectively rearrange the operating frequency for various HetNet networks with high bandwidth comparable to the speed in optical fiber networks. Fiber-wireless systems will be able to solve the problems of weak spots in the configuration of wireless networks, for example, fiber-optic lines will be able to connect base stations and an information processing center with high capacity due to the possibility of spectral multiplexing and the use of high-order modulation formats. Methods of remote heterodyning in such systems can reduce the influence of polarization mode dispersion and other linear and nonlinear optical distortions. The proposed method of recovering an optical signal from a radio signal in the millimeter range transmitted over a wireless channel for transmission to the next fiber-optic network can be used to improve the noise characteristics and spectral efficiency of multi-channel information transmission systems. The key devices of fiber-wireless networks are a photo detector and an optoelectronic modulator, the main characteristics of which are the working band, frequency tuning step, output power, and noise characteristics. Therefore, for further development of the configuration of fiber-wireless networks with remote heterodyning, with the possibility of organizing multi-channel communication for mobile networks with high density in the millimeter-wave range, a detailed study and finding methods to improve the characteristics of these optoelectronic devices is necessary.

Keywords: fiber-wireless network, optical heterodyning, millimeter-wave range, microwave methods for generating a radio signal

Кременецька Я.А. Волоконно-ефірна архітектура телекомунікаційних мереж в міліметровому діапазоні з дистанційним гетеродинаванням.

У статті запропонована волоконно-ефірна архітектура мережі з дистанційним гетеродинаванням та відновленням оптичного сигналу з ефірного радіосигналу для зменшення впливу поляризаційної модової дисперсії, інших лінійних та нелінійних оптичних спотворень. Для складної структури майбутніх телекомунікаційних мереж з безшовною інтеграцією різних технологій, волоконно-ефірні технології з дистанційним гетеродинаванням зможуть ефективно здійснювати перелаштування робочої частоти для мереж HetNet з пропускнуою спроможністю, порівнянною зі швидкістю в волоконно-оптичних мережах.

Ключові слова: волоконно-ефірні мережі, оптичне дистанційне гетеродинавання, міліметровий діапазон, фотонні методи генерації радіосигналу

Кременецкая Я.А. Волоконно-эфирная архитектура телекоммуникационной сети в миллиметровом диапазоне с дистанционным гетеродинаванием.

В статье предложена волоконно-эфирная архитектура сети с дистанционным гетеродинаванием и восстановлением оптического сигнала из эфирного радиосигнала для уменьшения влияния поляризационной модовой дисперсии, других линейных и нелинейных оптических искажений. Для сложной структуры будущих телекоммуникационных сетей с бесшовной интеграцией различных технологий, волоконно-эфирные технологии с дистанционным гетеродинаванием смогут эффективно перестраивать рабочую частоту для сетей HetNet с пропускной способностью, сопоставимой со скоростью в волоконно-оптических сетях.

Ключевые слова: волоконно-эфирные сети, оптическое дистанционное гетеродинавание, миллиметровый диапазон, фотонные методы генерации радиосигнала.

Вступ

Використання гібридних оптоелектронних технологій для генерації і модуляції, передачі сигналів міліметрового діапазону (ММД), а також оптоелектронних методів формування діаграм спрямованості ФАР може не тільки істотно підвищити пропускну здатність, але й вирішити проблеми слабких місць в конфігурації безпроводових мереж. Наприклад, зі збільшенням трафіку передбачається зменшення розмірів стільників, так як високочастотне випромінювання ММД, внаслідок поглинання, блокування, апаратних обмежень, не завжди може використовуватися для трафіку високої ємності на великі відстані. Надвисокі швидкості безпроводової передачі (більш ніж 40 Гбіт/с) вже з'явилися. Однак створювати такі надшвидкісні безпроводові системи складно через обмеження смуги пропускання електронних пристроїв. Волоконно-ефірна інтеграція (або технологія RoF) має переваги як оптоволоконної, так і безпроводової передачі. Волоконно-оптичні лінії можуть з'єднувати базові станції і центри обробки інформації з забезпеченням високої пропускну здатності за рахунок можливості спектрального мультиплексування та використання форматів модуляції високого порядку [1 - 5]. А також в волоконні лінії зв'язку можуть конвертуватися сигнали в ММД. До того ж існуючі проблеми аналогово-цифрового перетворення в смугах 10 ГГц електронними методами поки проблематичні, тому оптоелектронні методи є ефективним рішенням для обробки сигналів в ММД.

1. Фотонні методи генерації векторного сигналу ММД

Прості і економічно ефективні фотонні методи генерації мм-хвильового векторного сигналу є ключем до практичної реалізації волоконно-ефірних інтегрованих систем і мереж телекомунікації. Різні види передових методів запропоновані для реалізації генерації мм-хвильового векторного сигналу. Ці методи можуть бути поділені на три типи.

Перший тип заснований на гетеродинному битті двох світлових хвиль від двох незалежних та частотне не зв'язаних лазерів з довжиною хвилі, що пере налаштовується. Цей тип може генерувати сигнали мм-хвиль з великим відношенням сигнал/шум (SNR) і має переваги простої структури і регульованої несучої частоти. Однак, у даний час є багато вимог, що передбачені передачею в міліметровому діапазоні в мобільних системах п'ятого покоління (5G), таких як: більш висока швидкість передачі, великі смуга пропускання і стабільність несучої частоти, стають критичними. Генерація мм-хвилі, заснована на цьому типі методів, буде обмежувати розвиток 5G через властиву їм проблему нестабільності частоти.

Другий тип методів, що використовуються для генерації радіо сигналу, заснований на оптичному джерелі з декількома несучими. Тут необхідний оптичний фільтр для вибору двох оптичних несучих з певним частотним інтервалом з безлічі оптичних несучих, що генеруються джерелом. Одна з обраних оптичних несучих модулюється даними передавача, в той час як інша залишається не модульованою до того, як дві обрані оптичні несучі мікшируються в фотодіоді. Перевага цього типу методів полягає в тому, що генерація широкосмугового векторного сигналу ММД може бути реалізована з використанням оптоелектронних пристроїв з меншою пропускну спроможністю. Але цей тип техніки також має недоліки завдяки відносно складній структурі і зменшеного SNR через множення частоти.

Третій тип методів заснований на використанні одного зовнішнього модулятора інтенсивності і передавача з попереднім кодуванням. Перевага методів цього типу в тому, що задані дві оптичні несучі отримані від одного лазерного джерела і, отже, вони пов'язані за

частотою і фазою, що ефективно пригнічує фазовий шум. Проте регулювання частоти не є гнучким через використання попереднього кодування передавача. Векторний радіочастотний сигнал, який управляє модулятором в передавачі, може бути попередньо закодований за амплітудою і фазою. Таким чином можна отримати кілька оптичних несучих після модулятора. Потім дві несучі з певним частотним інтервалом можуть бути відфільтровані по довжині хвилі за допомогою програмованого селективного перемикача довжин хвиль. Таким чином можна отримати після детектування векторний радіо сигнал з правильною інформацією про амплітуду і фазу. Зокрема, множення частоти векторного сигналу (на: 2, 4, 6, 8) може бути досягнуто, коли модулятор зміщується в різних точках (тобто в максимальній точці передачі і мінімальної точки передачі) і перемикач довжин хвиль запрограмований з двома різними смуговими каналами. Крім того, алгоритми амплітудного і фазового попереднього кодування повинні змінюватися з різними форматами векторної модуляції, включаючи QPSK, 8QAM, 16QAM, 64QAM, 128QAM і т. д.

2. Застосування у волоконно-ефірних технологіях дистанційного гетеродинування

За допомогою інтеграції гібридних волоконно-ефірних технологій можливо також реалізувати мультиплексування в ММД за поділом по поляризації, що ще більше може підвищити ефективність використання МІМО технології. Для зменшення впливу в таких системах поляризаційної модової дисперсії та інших лінійних і нелінійних оптичних спотворень при передачі можливо більш прийнятним буде використання дистанційного гетеродинування (рис. 1).

У цьому методі оптичний квадратурне модульований сигнал з використанням поляризаційного мультиплексування (PDM-QPSK(QAM)) в основній смузі частот $\lambda_{\text{опт},1}$ (лазер 1, рис. 1,а) після волоконно-оптичної передачі по одномодовому волокну може бути отриманий в центральному офісі передавача (центрі обробки даних) (рис. 1, б). Там сигнал піддається оптичному гетеродинуванню з несучою $\lambda_{\text{опт},2}$ (лазер 2), щоб сформувати ефірний сигнал ММД $f_{\text{RF}} = c/|\lambda_{\text{опт},1} - \lambda_{\text{опт},2}|$, модульований в форматі PDM-QPSK(QAM).

В оптичному гетеродинальному перетворювачі з підвищенням частоти є лазер, що функціонує як локальний генератор (ECL лазер 2), два поляризаційних мультиплексори (PBC) і два волоконно-оптичних розгалужувачі (OC), що використовуються для реалізації поляризаційного рознесення прийнятого оптичного сигналу і сигналу від лазера 2 в оптичному домені до гетеродиначного биття. Крім того, присутні також два швидкодіючих збалансованих фотодетектори (BPD), що безпосередньо перетворюють компоненти X- і Y-поляризації оптичного сигналу в радіочастотний ММД (рис. 1,б).

Потім компоненти з підвищенням перетворенням по частоті одночасно через дві рупорні антени передавача відправляються у вільний простір і приймаються двома відповідними рупорними антенами (МІМО 2×2) з використанням поляризаційного мультиплексування (рис. 1,в).

У приймачі ММД (рис. 1, г) є двоступеневе перетворення з пониженням частоти. В аналоговому перетворенні першого етапу компоненти поляризації X і Y відповідно перетворюються з пониженням частоти до нижчої проміжної частоти, потім за допомогою збалансованого змішувача і синусоїдального радіочастотного (RF) сигналу несуча частота відновлюється. Аналого-цифрове перетворення реалізується в цифровому запам'ятовуючому осцилографі та далі на другому етапі здійснюється цифрова обробка інформації.

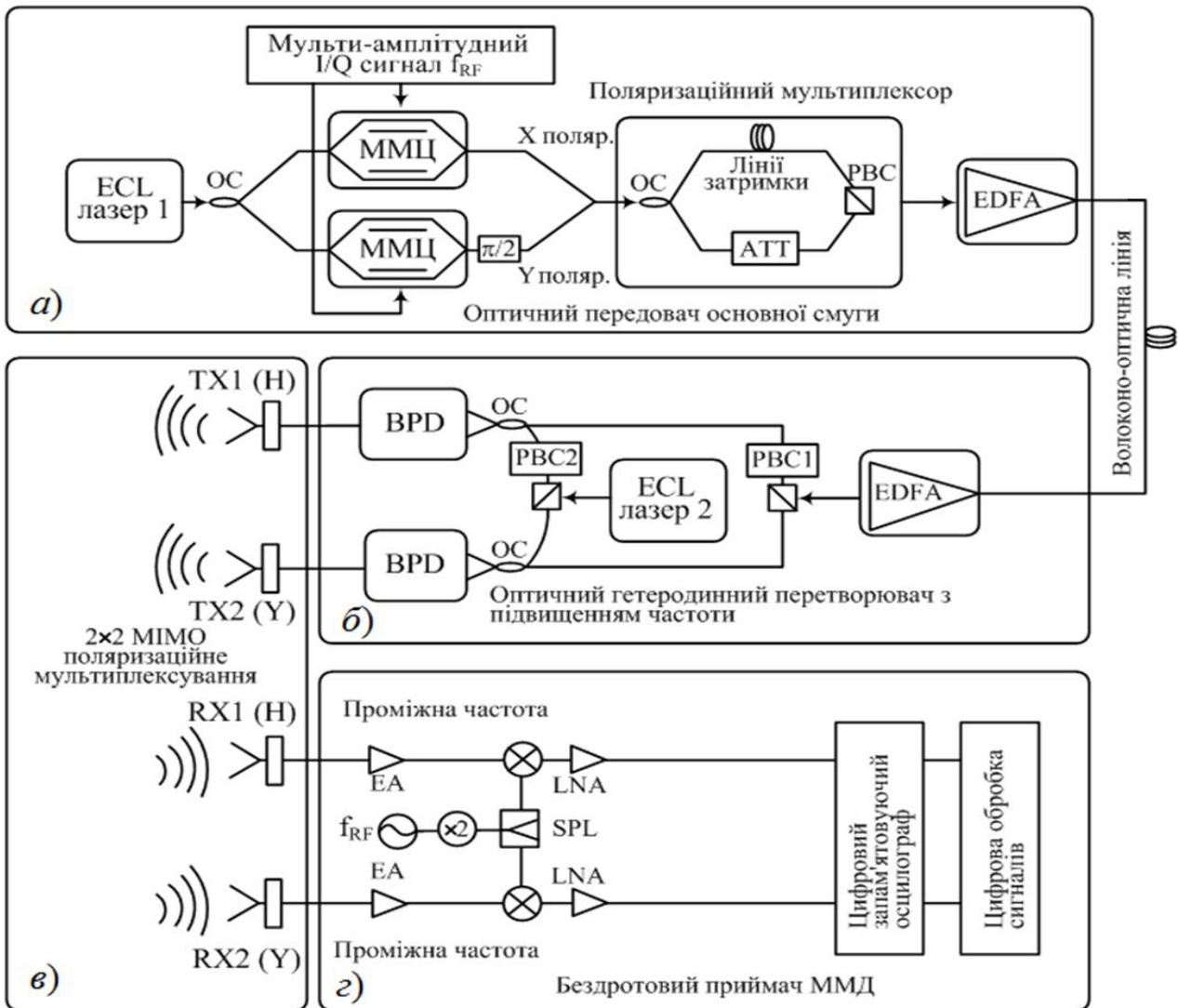


Рис. 1. Принципова схема реалізації волоконно-ефірної архітектури мережі в ММД з використанням дистанційного гетеродинування, МІМО технології с поляризаційним мультиплексуванням (LNA – мало шумовий електричний підсилювач, ЕА - вузько смуговий електричний підсилювач, СО - волоконно-оптичний відгалужувач, PBC - поляризаційний мультиплексор, АТТ - оптичний атенюатор (для балансу потужності двох відгалужень), EDFA - ербієвий волоконний підсилювач, SPL - дільник потужності, BPD - балансний фотодетектор, ММЦ – модулятор Маха-Цендера)

3. Відновлення оптичного сигналу з радіосигналу методом оптичного гетродинування

Після передачі сигналу ММД через безпроводовий канал за технологією МІМО, передані дані можуть бути відновлені знову методом оптичного гетродинування (рис. 2), і передані по оптичному волокну, наприклад, на іншу базову станцію.

Електричний сигнал може бути перетворений через два паралельних модулятора ММЦ на базовій станції приймача в оптичний сигнал ММД, який має оптичну несучу і дві бічні смуги PDM-QPSK, рознесені на f_{RF} від оптичної несучої (ECL лазер 3). Після фільтрації однієї бокової смуги і оптичної несучої тільки одна бічна смуга в якості оптичного сигналу основної смуги передається по оптичному волокну в центральний офіс приймача. Завдяки

використанню широкої смуги пропускання і високих частот, інтеграція волоконної і безпроводової технологій, може забезпечити багато гігабітну мобільну передачу даних. Аналогове перетворення з пониженням частоти перед електрооптичним перетворенням ефективно знижує вимоги до ширини смуги частот для ММД, а також, можливо, буде ефективним методом для сумісності з наступною мережею мобільного зв'язку, що займає, наприклад, більш низькі смуги частот.

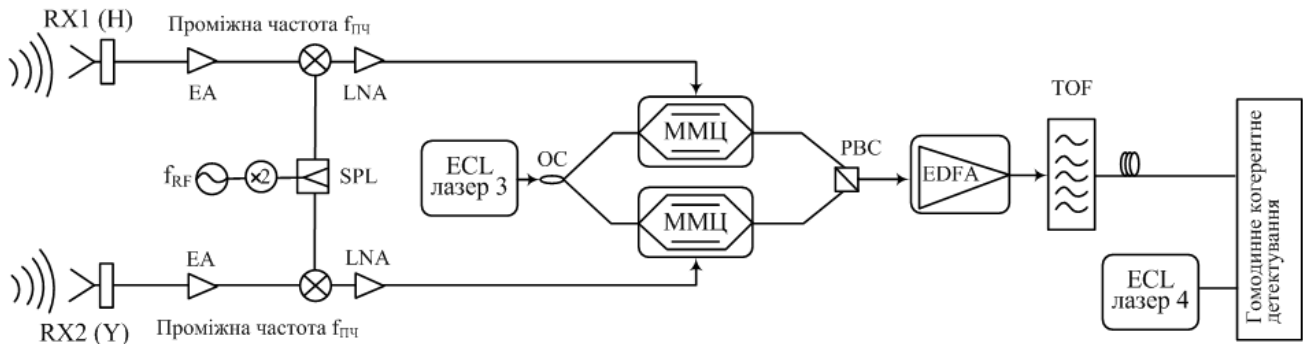


Рис. 2. Принципова схема реалізації відновлення оптичного сигналу з радіосигналу ММД, переданого через безпроводовий канал, для передавання в наступну волоконно-оптичну мережу (ТОФ - оптичний фільтр, який пере налаштовується та використовується для фільтрації однієї бічної смуги і оптичної несучої)

4. Обговорення результатів дослідження

Фотонні (оптоелектронні) способи формування сигналів міліметрового діапазону є більш вивченими в порівнянні з електронними методами, а також мають кращі характеристики щодо шумів, пере налаштування частоти, ширини миттєвої смуги пропускання, тощо. Характеристики приймально-передавального обладнання ММД визначають, серед іншого, конкретну ширину смуги електромагнітного випромінювання, часову затримку випромінювання, величину потужності вихідного випромінювання, співвідношення сигнал/шум. Такі характеристики є основоположними при проектуванні і розрахунку перспективних радіосистем в ММД. Фотонні методи генерації і модуляції сигналів дозволяють перелаштувати частоту з певним кроком, працювати в над широкої смугі, наприклад 10 ГГц, дозволяють передавати міліметрові сигнали через оптичне волокно на великі відстані (кілометри) до віддаленої станції, а також мультиплексувати канали за технологією WDM. Для майбутньої телекомунікації в ММД необхідне буде безшовне з'єднання мереж за різними технологіями, що працюють в окремих діапазонах частот (мережі HetNet), в тому числі різних під діапазонах ММД, а також в адаптивних системах. Волоконно-ефірні технології з дистанційним гетеродинуванням спроможні задовольнити таким вимогам та забезпечити швидкість порівняну зі швидкістю в волоконно-оптичних лініях зв'язку. Ключовими пристроями в волоконно-ефірних мережах є фотодетектор та оптоелектронний модулятор, основними характеристиками яких являється робоча смуга, крок перестроювання частоти, вихідна потужність, шумові характеристики. Тому для подальшого дослідження конфігурації волоконно-ефірних мереж з дистанційним гетеродинуванням, з можливістю організації багатоканального зв'язку для мобільних мереж високої щільності в ММД необхідне детальне дослідження та знаходження методів покращення характеристик цих оптоелектронних пристроїв.

Висновки

Фотонні методи генерації, модуляції та передачі радіосигналів ММД є ключем до практичної реалізації волоконно-ефірних інтегрованих систем і мереж телекомунікації. Використання дистанційного гетеродинування сигналів в ММД зможе зменшити вплив поляризаційної модової дисперсії та інших лінійних і нелінійних оптичних спотворень в таких системах. Такі переваги зможуть сприяти реалізації мультиплексування за поділом по поляризації, реалізації адаптивних систем за вибором радіочастот (піддіапазонів ММД), що також зможе підвищити ефективність використання МІМО технології. Для складної структури майбутніх телекомунікаційних мереж, в яких потрібна безшовна інтеграція різних технологій, волоконно-ефірні технології з дистанційним оптичним гетеродинуванням спроможні ефективно переналаштовувати робочу частоту для різних мереж HetNet, в тому числі для різних піддіапазонів ММД з високою пропускною здатністю порівняно зі швидкістю в волоконно-оптичних мережах.

Волоконно-ефірні системи зможуть вирішити проблеми слабких місць в конфігурації безпроводових мереж, наприклад, волоконно-оптичні ліній, можуть з'єднувати базові станції і центри обробки інформації з забезпеченням високої пропускної здатності за рахунок можливості спектрального мультиплексування та використання форматів модуляції високого порядку.

Запропонований метод відновлення оптичного сигналу з радіосигналу ММД, переданого по бездротовому каналу для передавання в наступну волоконно-оптичну мережу, може бути використаний для покращення шумових характеристик та спектральної ефективності багатоканальних систем передачі інформації.

Список використаної літератури

1. Urick V. J. Fundamentals of Microwave Photonics / V. J. Urick, J. D. McKinney and K. J. Williams // Hoboken NJ. – USA, Wiley. – 2015. – 488 p.
2. Qi G. Generation and distribution of a wide-band continuously tunable millimeter-wave signal with an optical external modulation technique / Qi G., J. P. Yao, J. Seregelyi, S. Paquet, and C. Belisle // IEEE Microwave Theory and Techniques. – Oct. 2005. – Vol. 53. – №10. – P. 3090-3097.
3. Yu J. Faster than fiber: Over 100-Gb/s signal delivery in fiber wireless integration system / J. Yu, X. Li, and N. Chi // Opt. Express. - 2013. - №19. – P. 22885–22904.
4. Yu J. Tutorial: Broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication / Yu Jianjun, Li Xinying, Wen Zhou // J. APL Photonics. – 2018. – Vol. 3. – <https://doi.org/10.1063/1.5042364>
5. Yu J. Cost-effective optical millimeter technologies and field demonstrations for very high throughput wireless-over-fiber access systems / J. Yu, G.-K. Chang, Z. Iia, A. Chowdhury, M.-F. Huang, H.-C. Chien, Y.-T. Hsueh, W. Jian, C. Liu, and Z. Dong // J. Light w. Technol. – 2010. - Vol. 28. - №16, P. 2376–2397.

Автори статті

Кременецька Яна Адольфівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри телекомунікаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Authors of the article

Kremenetska Yana Adolfovna - candidate of Sciences (technical), associate professor of the Department of telecommunication technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 25.03.2019 р.

Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Г.С. Фелінський