

Гребеля Р.Є., студент; Гнатишин І.О., студент;
Пилипенко М.С., студентка; Кременецька Я.А., к.т.н.

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ РАДІОФОТОННИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ У МІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ

Hrebelia R.E., Hnatyshyn I.O., Pylypenko M.S., Kremenetska Y.A. Application of radio frequency photonics for millimeter mobile communications. The article discusses the advantages and prospects for the use of radiophotonic technologies for the implementation of mobile telecommunications in the millimeter range. The principles of the formation of a quadrature modulated millimeter wave signal using the method of external modulation of optical radiation are shown. The prospects for using the fiber-wireless network architecture for communication systems in the millimeter range, as well as possible noises in the radio channel are analyzed. It is shown that phase noise is dominant in radiophoton communication systems using quadrature modulation. The possibility of multiplication, discrete frequency adjustment, the phase noise of a millimeter-wave radio signal obtained by an optoelectronic method are mathematically simulated.

Keywords: millimeter wave, radio frequency photonics, fiber-wireless communication, mobile communication, optoelectronic technology, external intensity modulation, frequency multiplication factor, noise power spectral density

Гребеля Р.Є., Гнатишин І.О., Пилипенко М.С., Кременецька Я.А. Перспективи застосування радіофотонних технологій для мобільних телекомунікацій в міліметровому діапазоні. У статті розглянуті переваги і перспективи застосування радіофотонних технологій для реалізації мобільних телекомунікацій в міліметровому діапазоні. Показано принципи формування квадратурно-модульованого сигналу міліметрового діапазону за допомогою методу зовнішньої модуляції оптичного випромінювання. Проаналізовано перспективи застосування волоконно-ефірної архітектури мережі для систем зв'язку в міліметровому діапазоні, а також можливі шуми в радіоканалі. Показано, що фазовий шум має домінуюче значення в радіофотонних системах зв'язку з використанням квадратурної модуляції. Математично промодельовані можливість множення, дискретність перебудови частоти, фазовий шум радіосигналу міліметрового діапазону, отриманого оптоелектронним методом.

Ключові слова: міліметрові хвилі, радіофотоніка, волоконно-ефірні системи, мобільний зв'язок, оптоелектронні технології, зовнішня модуляція інтенсивності, коефіцієнт множення частоти, спектральна щільність потужності шуму

Гребеля Р.Е., Гнатишин И.О., Пилипенко М.С., Кременецкая Я.А. Перспективы применения радиофотонных технологий для мобильных телекоммуникаций в миллиметровом диапазоне. В статье рассмотрены преимущества и перспективы применения радиофотонных технологий для реализации мобильных телекоммуникаций в миллиметровом диапазоне. Показаны принципы формирования квадратурно-модулированного сигнала миллиметрового диапазона с помощью метода внешней модуляции оптического излучения. Проанализированы перспективы применения волоконно-эфирной архитектуры сети для систем связи в миллиметровом диапазоне, а также возможные шумы в радиоканале. Показано, что фазовый шум имеет доминирующее значение в радиофотонных системах связи с использованием квадратурной модуляции. Математически промоделированы возможность умножения, дискретность перестройки частоты, фазовый шум радиосигнала миллиметрового диапазона, полученного оптоэлектронным методом.

Ключевые слова: миллиметровые волны, радиофотоника, волоконно-эфирные системы, мобильная связь, оптоэлектронные технологии, внешняя модуляция интенсивности, коэффициент умножения частоты, спектральная плотность мощности шума

© Гребеля Р.Є., Гнатишин І.О., Пилипенко М.С., Кременецька Я.А., 2019

Вступ

Міліметровий діапазон (ММД) становить значну частину невикористаного частотного спектра від 30 до 300 ГГц, який є важливим ресурсом для майбутніх бездротових телекомунікацій для збільшення пропускної здатності. Так як розширення смуги пропускання каналу є ефективним рішенням для підвищення пропускної здатності. Унікальні особливості хвиль ММД такі, як наявність вікон прозорості і піків поглинання, можливість проникнення через деякі неметалеві матеріали, пил, туман, стійкість до інтерференційним перешкод, можливість формування вузьконаправленого випромінювання і дозволенисть використання хвиль ММД роблять їх перспективними для застосування не тільки в наземних системах зв'язку, але і в системах безпеки, відеоспостереження, в технологіях з використанням безпілотних літальних апаратів і т.д.

Найбільш перспективними для застосування в мобільних системах зв'язку виділяють діапазони 28 ГГц, 38 ГГц, 45 ГГц, 60 ГГц і 71-76, 81-86 ГГц [1,2]. У вікні поглинання 60 ГГц вже існують стандарти і досягнуті швидкості понад 40 Гбіт/с [3]. Для ефективності використання спектра ММД розглядається використання гібридних технологій, таких як гетерогенні мережі (англ. Heterogeneous networks, HetNet), волоконно-ефірні технології (англ. Radio-over-fiber, RoF) [4]. RoF технології розглядаються як ключове рішення для оптоелектронних методів генерації, модуляції сигналів і формування діаграм спрямованості фазованих антенних решіток, методів просторового мультиплексування за технологією МІМО в ММД.

Виклад основного матеріалу дослідження

Переваги, архітектура і показники ефективності волоконно-ефірних систем

Гігабітні швидкості передачі інформації, які необхідні для майбутніх мобільних мереж, можливо реалізувати з'єднанням базових станцій і центрів обробки інформації по волоконних лініях (рис.1), в яких можливо реалізувати конвертацію і передачу сигналів ММД з використанням форматів модуляції вищого порядку і мультиплексування зі спектральним ущільненням WDM (додатково з поділом за поляризацією).

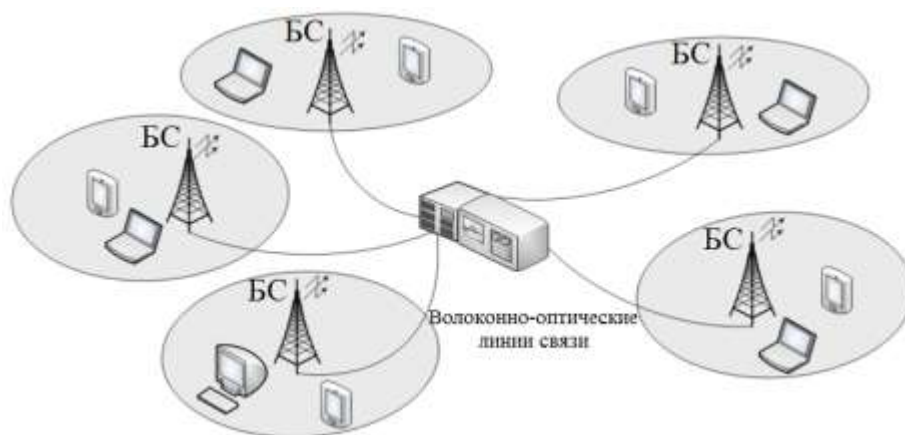


Рис.1. Волоконно-ефірна архітектура мережі ММД: базові станції (БС) сот, що працюють в ММД, пов'язані через волоконно-оптичні лінії

Волоконно-ефірна архітектура мереж може забезпечити безшовну інтеграцію різних технологій, діапазонів частот, розмірів сот і т.д. Застосування волоконно-ефірної архітектури мереж з дистанційним оптичним гетеродуванням здатне ефективно перебудувати робочу частоту для різних мереж HetNet, в тому числі для різних піддіапазонів ММД з високою пропускною спроможністю, яку можна порівняти зі швидкістю в волоконно-оптичних мережах [4]. Ці переваги можуть сприяти реалізації мультиплексування з поділом по поляризації, реалізації адаптивних систем за вибором радіочастот (піддіапазонів ММД),

також зможе підвищити ефективність використання МІМО технологій. Крім того, волоконно-ефірна архітектура мереж зможе забезпечити високу пропускну здатність, збільшити енергоефективність, знизити електромагнітне забруднення і складність систем обробки інформації. Структура каналу зв'язку в ММД, організована на основі радіофотонних технологій, показана на рис.2.

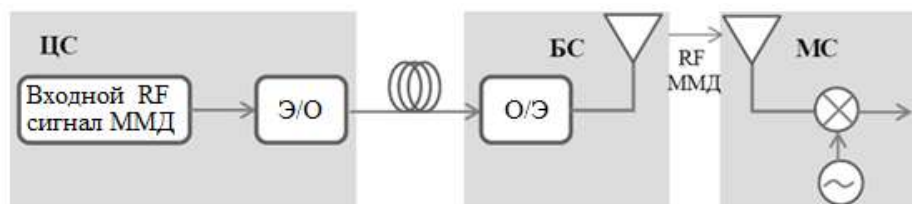


Рис.2. Структура каналу для мобільних телекомунікацій ММД з використанням технології RoF: ЦС - центральна станція, БС - базова станція, МС - мобільна станція, О / Е - оптоелектронний перетворювач, RF - радіочастотний сигнал ММД

Оптоелектронні (фотонні) способи формування сигналів ММД є більш вивченими в порівнянні з електронними методами, а також мають кращі характеристики щодо шумів, дискретності перебудови частот, ширині миттєвої смуги пропускання [5]. Досягнення в області оптоелектронних приймально-передавального обладнання ММД визначають, серед іншого, конкретну ширину смуги для випромінювання електромагнітного випромінювання, тимчасову затримку випромінювання, величину потужності вихідного випромінювання, співвідношення сигнал/шум, динамічний діапазон по перешкодам і т.д. Ключовими пристроями, характеристики яких визначають пропускну здатність волоконно-ефірних систем зв'язку є фотодетектори і оптоелектронні модулятори.

Досягнення в області рішень для розширення робочої смуги, вихідної потужності, лінійності чутливості фотодетекторів в смузі вище 70 ГГц, налаштування частот в оптичних модуляторах, зменшення шумів (особливо фазових). Дослідження методів оптоелектронного формування радіосигналів ММД і шумових характеристик є актуальними напрямками досліджень.

Як показник ефективності систем RoF застосовується величина вектора помилок (EVM) [6]. EVM вираховується для сигналів, складові шуму якого можна розглядати як гаусові випадкові процеси з нульовим середнім значенням. Для квадратурного-модульованого сигналу:

$$EVM = \sqrt{\frac{1}{SNR} + 2 \left[1 - \exp\left(\frac{-\sigma_{\text{phase}}^2}{2}\right) \right]} \sqrt{\frac{1}{PAV}} \quad (1)$$

де SNR – відношення сигнал / шум, σ_{phase}^2 – середнє значення (дисперсія) флуктуації фази, PAV – відношення пікового значення до середньої потужності сигналу (англ. peak-to-average energy ratio) для даної схеми модуляції.

Пасивні оптичні та електричні компоненти (оптичні волокна, електричні кабелі, роз'єми і т. д.) не створюють флуктуації струму, тому їх внесок в загальний шум можна не враховувати. Експериментальні результати [7] показують, що при ширині спектральної лінії джерела зображення в межах 50 МГц і діапазоні пропускання до 50 км хроматичної дисперсії в одномодовому волокні (SMF) призводить до незначного збільшення фазового шуму.

Оптоелектронні технології вважаються більш енергоефективними в порівнянні КМОП електронною технікою в ММД, так як більша частина споживаної потужності оптоелектронних компонентів подається на лазери і підсилювачі, а також на електронні компоненти, які виконують функції контролю і управління [8].

Оптоелектронні методи формування і модуляції радіочастотного сигналу ММД і їх математичне моделювання

Основним оптоелектронним методом формування радіочастотного сигналу є зовнішня модуляція інтенсивності, в якій використовується оптичне гетеродування (биття бічних смуг). Крім того, зовнішня модуляція інтенсивності в поєднанні з технікою множення частоти керуючого радіочастотного генератора, може реалізувати генерацію високочастотного сигналу ММД з меншою пропускну здатністю для оптичних і електронних компонентів передавача. На Рис.3 представлена принципова схема отримання модульованого сигналу ММД на основі одного зовнішнього модулятора ММЦ в комбінації з оптичним селективним перемикачем довжин хвиль (англ. Wavelength selective switch, WSS), з якого селективним чином обираються бічні смуги необхідного порядку для гетеродинного биття.

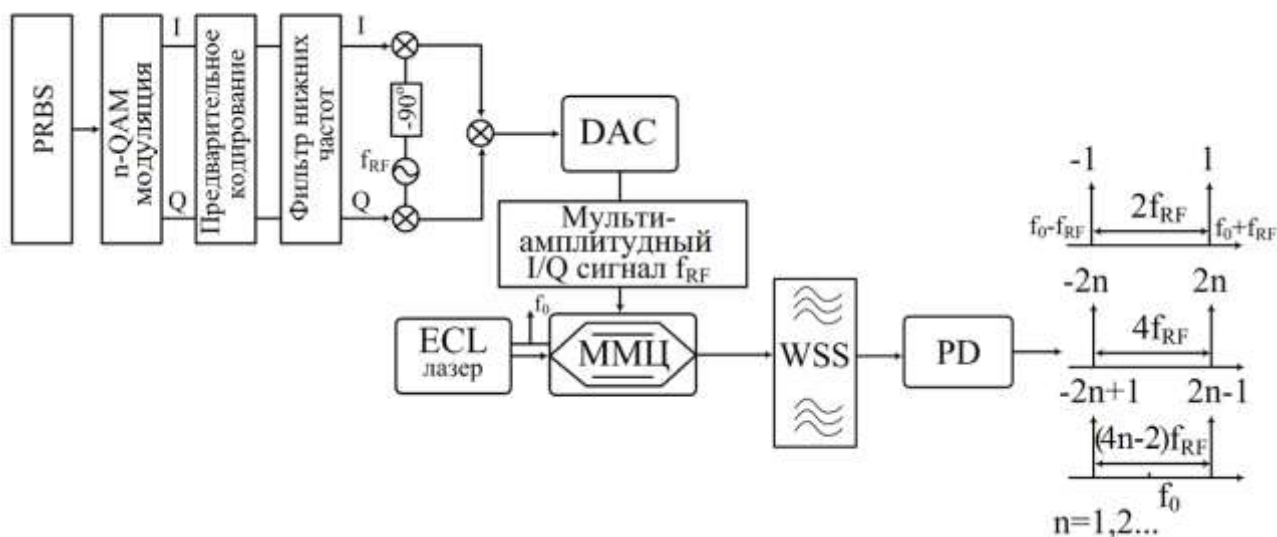


Рис.3. Принципова схема генерування квадратурного-модульованого сигналу ММД, заснована на одному ММЦ (модулятор Маха-Цендера) і попередньо кодованому електричному керуючому приводі: PRBS – генератор псевдослучайної бітрової послідовності, DAC – цифро-аналоговий перетворювач; PD – фотодетектор; ECL – лазер з зовнішньої резонатора порожниною

Передбачається, що оптичний носій і сигнал електроприводу мають безперервну хвилю за своєю природою. Отже, вони можуть бути виражені як:

$$E_{\text{OP}}(t) = E_{\text{opt}} \cos[2\pi f_{\text{opt}} t + \varphi_{\text{opt}}(t)] \quad (2)$$

$$V_{\text{RF}}(t) = V_{\text{cm}} + V_{\text{m}} \cos(\omega_{\text{RF}} t + \varphi(t)) \quad (3)$$

де $E_{\text{OP}}(t)$ – поле оптичної несучої в скалярній формі і передбачається, що світло лінійно поляризоване і напрямок поляризації відповідає площині поляризації модулятора; E_{opt} , f_{opt} – амплітуда і частота оптичної несучої, V_{RF} – напруга сигналу керуючого електричного радіочастотного сигналу, V_{cm} – напруга постійного зміщення; V_{m} , f_{RF} амплітуда напруги і частота керуючого радіочастотного електричного сигналу; $\varphi_{\text{opt}}(t)$, $\varphi_{\text{RF}}(t)$ – фази оптичного і електричного сигналів.

Для генерації частотно переналаштованого сигналу ММД на основі зовнішньої модуляції інтенсивності оптичного випромінювання використовується вузькосмуговий фільтр (для фільтрації оптичної несучої) і настройка частотного поділу двох оптичних бічних

смуг шляхом зміни частоти сигналу електроприводу. Коли ММЦ зміщений в сторону максимуму коефіцієнта пропускання, узагальнений вираз для модульованого оптичного сигналу на виході ММЦ може мати такий вигляд [7]:

$$\begin{aligned} E_{\text{out}}(t) &= E_0(i\omega_0 t) \exp[im \cos(\omega_{\text{RF}} t + \varphi(t))] + \\ &+ E_0 \exp(i\omega_0 t) \exp[-im \cos(\omega_{\text{RF}} t) + \varphi(t)] = \\ &= E_0 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(m) \exp[i(\omega_0 + 2n\omega_{\text{RF}})t + i2n\varphi(t)], \end{aligned} \quad (4)$$

де J_{2n} функція Бесселя першого роду $2n$ -го порядку, $m = (\pi/2V_{\pi}) \cdot V_m \cos[\varphi_{\text{RF}}(t)]$ – індекс (глибина) модуляції, V_{π} – напівхвильова напруга ММЦ.

Коли спектрально-селективний модуль WSS використовується для вибору двох оптичних піднесучих порядку $2n$ і рознесення частот $4nf_{\text{RF}}$ ($n = 1, 2 \dots$), на виході WSS сигнал може бути виражений у вигляді:

$$E_{\text{WSS}} = 2E_0 J_{2n}(m) \left[\begin{aligned} &\exp(i(\omega_0 + 2n\omega_{\text{RF}})t + i2n\varphi(t)) + \\ &+ \exp(i(\omega_0 - 2n\omega_{\text{RF}})t - i2n\varphi(t)) \end{aligned} \right]. \quad (5)$$

В результаті оптичного гетеродування на виході фотодіода основна складова згенерованого струму набуває вигляду:

$$I_{\text{RF}} = \frac{1}{2} \Re J_{2n}^2(m) \cos(4n\omega_0 t + 4n\varphi(t)), \quad n = 1, 2 \dots \quad (6)$$

де \Re – чутливість фотодіода за струмом,

З цього виразу видно, що в даному методі множення частоти також приводить до множення фази з одним і тим же коефіцієнтом. Крім того, амплітуда і фаза модульованого вихідного сигналу передавача повинні задовольняти вимогам:

$$A_{\text{TX}} \propto J_n^2 \left\{ (\pi/2V_{\pi}) \cdot V_m \cos[\varphi(t)] \right\}, \quad \varphi_{\text{TX}} \propto 2n\varphi(t), \quad (7)$$

де n - порядок обраних оптичних під несучих.

З виразу (2) видно, що амплітуда A_{TX} і фаза φ_{TX} вихідного радіочастотного сигналу можуть бути попередньо закодовані за форматами амплітудної QAM модуляції. Амплітудні і фазові алгоритми попереднього кодування можуть змінюватися для різних форматів модуляції, включаючи QPSK, 8QAM, 16QAM, 64QAM, 128QAM та ін. [4].

Амплітудні і фазові шуми можуть обмежити застосування складних форматів модуляції. Незалежні складові шуму в оптичному каналі можна розглядати як гаусові випадкові процеси з нульовим середнім і їх можна підсумувати як джерела струму, так як вони формуються при оптоелектронному перетворенні в фотодетекторі [5]: - флуктуації оптичної інтенсивності лазера; шум оптичного підсилювача, в якому крім шуму посиленого сигналу також присутній посилений шум спонтанного випромінювання, що генерується всередині самого підсилювача; тепловий шум, викликаний випадковим рухом носіїв в провіднику, який призводить до випадкових флуктуацій згенерованого струму; квантовий шум, який представляє випадкові флуктуації сигналу внаслідок дискретності величини заряду.

Фазовий шум особливо обмежує можливість детектування цифрових сигналів в системі, так як він впливає на частоту помилок в цифрових додатках. Джерелами фазового шуму можуть бути адитивні шуми, які пов'язані з осцилятором і допоміжними ланцюгами, такими як підсилювачі і джерела зміщення (постійної напруги або струму), які додають до сигналу дробовий шум генератора і підсилювача. При моделюванні впливу фазового шуму на

значення EVM детектованого сигналу на основі когерентного приймача, можна припустити, що значення фазового шуму перевищує значення SNR і PAV = 1:

$$EVM = \sqrt{2 \left[1 - \exp\left(\frac{-\sigma_{\text{phase}}^2}{2}\right) \right]} . \quad (8)$$

У випадку, коли фазовий шум є домінуючим в порівнянні з амплітудним шумом (або шумом інтенсивності). Також, беручи до уваги умову низького коефіцієнта фазової модуляції і фазові флуктуації електричного сигналу, які приймаються як стаціонарний гауссовський випадковий процес з нульовим середнім, спектральна щільність потужності фазових шумів електричних сигналів в одиночній бічній смузі (відношення потужності шуму, виміряної в одній бічній смузі, перерахована в смугу 1 Гц, до повної потужності сигналу) зазвичай описується ступінною залежністю [9]:

$$S(f_m) = \frac{P_{\text{SSB}}(f + f_m, 1 \text{ Гц})}{P_{\text{carrier}}} \cong \frac{1}{P_{\text{carrier}}} \left[\frac{A}{f_m^2} + \frac{B}{f_m^3} \right], \quad (9)$$

де f_m частота зміщення від несучої, А і В коефіцієнти, що визначає рівень шуму.

В роботі [10] показано, що характеристика фазових шумів вихідного електричного сигналу, який генерується на основі оптичних методів зовнішньої модуляції, визначається тільки фазовим шумом сигналу електричного приводу і порядком множення частоти:

$$S_{\text{out}}(f_m) \cong (2n)^2 \frac{2}{V_m^2} \left[\frac{A}{|f_m|^2} + \frac{B}{|f_m|^3} \right] . \quad (10)$$

Флуктуація фази σ_{phase} визначається співвідношенням:

$$\sigma_{\text{phase}} = \sqrt{\int_{f_1}^{f_2} S_{\text{out}}(f) df} , \quad (11)$$

$f_2 - f_1$ смуга, яка використовується для вимірювання флуктуації фази, $S_{\text{out}}(f)$ – спектральна щільність потужності фазового шуму в заданій смузі частот.

Згідно [10], для перспективних широкосмугових мобільних систем в ММД для забезпечення швидкостей в декілька Гбіт/с значення для фазового шуму в одній бічній смузі повинні мати такі максимальні значення: -68 дБн/Гц при = 10 кГц, -84 дБн/Гц при = 100 кГц і -100 дБн/Гц при = 1 МГц.

Висновки

Радіофотонні технології можуть бути використані для реалізації мобільних систем в ММД для таких перспективних рішень, як гібридна волоконно-архітектура, яка об'єднує переваги волоконно-оптичних і бездротових широкосмугових технологій, оптоелектронні методи формування і модуляції радіосигналів ММД. Гігабітні швидкості передачі інформації, які необхідні для перспективних мобільних систем, можна реалізувати об'єднанням базових станцій і центрів обробки інформації через волоконно-оптичні лінії, з використанням конвертації каналів ММД в оптичний діапазон, форматів квадратурної модуляції і мультиплексування WDM. Дослідження в області моделювання динамічних і шумових характеристик радіофотонних систем в ММД і методів їх поліпшення можуть бути перспективними напрямками при знаходженні рішень для збільшення пропускної здатності телекомунікаційних систем, енергоефективності, безшовних інтеграції різних технологій, які працюють в різних частотних діапазонах (в тому числі в різних піддіапазонах ММД) і зонах покриття.

Список використаної літератури

1. Rappaport T. S. Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5G) wireless networks (Invited Paper) / T. S. Rappaport, Y. Xing, G. R. MacCartney Jr., A. F. Molisch, E. Mellios, J Zhang // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. - Dec. 2017. – - Vol. 65. - №12. - P. 6213-6230.
2. Hemadeh I.A. Millimeter-wave communications: Physical channel models, design considerations, antenna constructions, and link-budget / I. A. Hemadeh, K. Satyanarayana, M. El-Hajjar, and L. Hanzo // IEEE Communications Surveys Tutorials. - Dec. 2018. - Vol. 20,- №2, P. 870–913.
3. Yu J., Li X., and Chi N. 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. Jianjun Yu Tutorial: Broadband fiber-wireless integration for 5G+ communication / Yu Jianjun, Li Xinying, Zhou Wen // J. APL Photonics. – 2018. – Vol. 3. - <https://doi.org/10.1063/1.5042364>.
5. Urick V. J. Fundamentals of Microwave Photonics / V. J. Urick, J. D. McKinney and K. J. Williams // Hoboken NJ. - USA, Wiley. – 2015. – 488 p.
6. Khayatzaheh R., Poette J., Rzaigui H., and Cabon B. Coherent and non-coherent receivers in 60-GHz RoF system based on passively mode-locked laser / R. Khayatzaheh, J. Poette, H. Rzaigui, and B. Cabon // IEEE Microwave Photonics (MWP). - Alexandria, VA, USA. - 28-31 Oct. – 2013. – P. 138-141.
7. Qi G. Generation and distribution of a wide-band continuously tunable millimeter-wave signal with an optical external modulation technique / G. Qi, J. P. Yao, J. Seregelyi, S. Paquet, and C. Belisle // IEEE Microwave Theory and Techniques. – Oct. 2005. – Vol. 53. – №10. – P. 3090-3097.
8. Beas J. Millimeter-wave frequency radio over fiber systems: a survey / G. Castañon, I. Aldaya, A. Aragon-Zavala, and G. Campuzano // IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, – Vol. 15, – № 4, – P. 1593–1619.
9. Hewlett-Packard Company. Phase noise characterization of microwave oscillators: Phase detector method / Palo Alto, CA, Product Note 11729B-1, – 1984.
10. Qi G. Phase-Noise Analysis of Optically Generated Millimeter-Wave Signals With External Optical Modulation Techniques / G. Qi, J. Yao, J. Seregelyi, S. Paquet, C. Bélisle, X. Zhang, K. Wu, and R. Kashyap // J. Lightwave Technol. – 2018, – №24. – P. 4861-4875.

Автори статті

Гребеля Роман Євгенович – студент, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.
Гнатишин Ігор Олександрович – студент, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.
Пилипенко Марія Сергіївна – студентка, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.
Кременецька Яна Адольфівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри Телекомунікаційних технологій, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

Authors of the article

Hrebelia Roman Yevhenovych – student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.
Hnatyshyn Ihor Oleksandrovych – student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.
Pylypenko Mariia Serhiivna – student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.
Kremenetska Yana Adolfivna – candidate of Science (technic), Associate Professor, Department of Telecommunication Technologies, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 22.08.2019 р.

Рецензент: д.т.н., с.н.с. Ю.В. Мельник