

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ БЕЗДРОТОВОГО ДОСТУПУ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ *LI-FI*

У статті проведено дослідження сучасної технології *Li-Fi*, розглянуто її архітектуру та існуючі стандарти, основні складові даної мережі бездротового доступу, що використовує видимий спектр для передачі інформації. Також в статті запропонована аналітична модель, яка дозволяє визначити вимоги до показників функціонування *Li-Fi* систем бездротового доступу.

Романов А.И., Нестеренко Н.Н., Донг Т.Т. Федюшина Д.М. Модель системы беспроводного доступа на основе технологии *Li-Fi*. В статье проведено исследование современной технологии *Li-Fi*, рассмотрено ее архитектуру и существующие стандарты, основные составляющие этой сети беспроводного доступа, которая использует видимый спектр для передачи информации. Также в статье предложена аналитическая модель, которая позволяет определить требования к показателям функционирования *Li-Fi* систем беспроводного доступа.

O. Romanov, M. Nesterenko, T. Dong, D. Fediushyna *The model of wireless access system based on Li-Fi technology.* The article the studies modern technology of *Li-Fi*, it considers its architecture and existing standards, the main components of this wireless access network, which uses the visible spectrum for information transfer. The article also offers an analytical model that allows to determine the requirements of the performance indicators of *Li-Fi* wireless access systems.

Ключові слова: *Light Fidelity, Visible Light Communication, LED, енергія світлового сигналу, modem PLC-VLC.*

Однією з основних технологій, яка використовується сьогодні для забезпечення бездротового доступу користувачів у внутрішніх мережах установ, кафе, місцях відпочинку та великих торговельних площадках є технологія *Wi-Fi (Wireless Fidelity)*. Це технологія, яка забезпечує безпроводне інтернет-з'єднання, використовуючи радіохвилі для передачі сигналів. Тому на більшості сучасних електронних пристроїв, таких як комп'ютери, ноутбуки, телефони, планшети є *Wi-Fi* модулі за допомогою яких можна підключитися до *Internet*. *Wi-Fi* з'єднання засновані на стандарті *IEEE 802.11*. *Wi-Fi* системи працюють в діапазоні частот від 2,5 ГГц до 5 ГГц. Вони забезпечують швидкість 54 Мбіт/с.

І хоча сьогодні технологія *Wi-Fi* широко використовується у всіх громадських місцях, але є ряд обмежень на її використання: недостатньо спектра для збільшення обсягу передачі даних, низька ефективність, заборона на використання в літаках, медичних закладах, низька захищеність даних в радіо каналі та і т.д. Одним із шляхів уникнення цих проблем є використання технології *Li-Fi (Light Fidelity)*, яка була запропонована групою вчених Единбурзького університету на чолі з німецьким професором Гаральдом Хаасом [1].

Аналіз останніх публікацій показав [2, 3, 4], що для досягнення максимального ефекту від впровадження технології *Li-Fi* необхідно визначити порядок взаємодії елементів мережі та розробити математичний апарат для оцінки основних параметрів мережі. В свою чергу, щоб отримати ефективну продуктивність мережі та забезпечити необхідні значення енергії сигналу в будь-якій точці прийому необхідно обчислити величину енергії сигналу в кожній точці знаходження приймача в залежності від відстані між передавачем та приймачем. Однак, на теперішній час запропоновані моделі не враховують динаміку зміни положення абонентів та вплив конструктивних особливостей приміщень (об'єктів), де розгортаються дані мережі.

Тому метою статті є дослідження архітектури сучасної технології бездротового доступу *Li-Fi* та розробка аналітичної моделі, яка дозволяє визначити вимоги до показників функціонування *Li-Fi* систем.

Викладення основного матеріалу *Li-Fi* – це бездротова оптична система зв'язку, в якій для передачі даних використовується видиме світло з *LED* лампами. Різна швидкість мерехтіння світла *LED* дозволяє передавати дані: коли лампа включена, передається цифрова

одиниця, коли відключена – нуль. Інтенсивність мерехтіння у світлодіода дуже висока, і людське око його не помічає. *Li-Fi* здатна передавати інформацію набагато швидше, ніж *Wi-Fi*. Враховуючи те, що *Li-Fi* може розвивати швидкість передачі даних понад Гбіт/с, цього достатньо, щоб витримувати конкуренцію в сфері широкосмугової бездротової комунікації. І останнім часом, *Li-Fi* пропонують абсолютно новий підхід до бездротових технологій з точки зору швидкості передачі даних, гнучкості та комфортності експлуатації [3, 4].

Дана технологія передбачає передачу даних в області спектра видимого світла (від 380 нм до 780 нм) із використанням світлодіодних *LED* ламп. Такий підхід дозволяє розширити частотний спектр у 10000 разів у порівнянні з радіочастотним спектром (рис. 1).

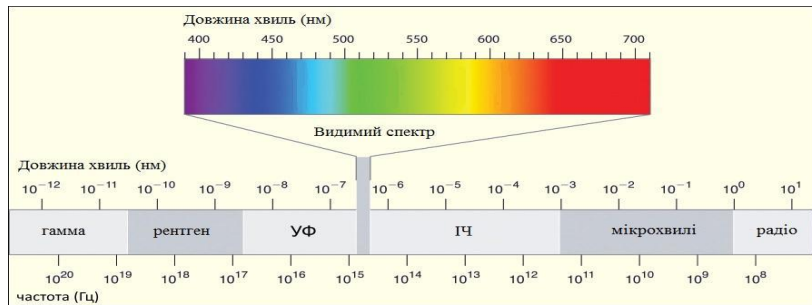


Рис. 1 Графічне зображення спектра видимого світла

Недавні дослідження показали швидкість передачі даних 14 Гбіт/с для *Li-Fi* за допомогою трьох знімних лазерних діодів (червоний, зелений та синій). Також було передбачено, що для *Li-Fi* можна досягти швидкості передачі даних 100 Гбіт/с, коли використовується весь видимий спектр [2]. Глобальний ринок *Li-Fi* прогнозує 80 мільярдів доларів США в 2021 році.

Задачею дійсного технічного рішення є:

- визначення місць найбільш раціонального використання системи *Li-Fi*;
- розробка пропозицій щодо архітектури системи, складу її елементів та порядку їх взаємодії;
- визначення переліку показників функціонування телекомунікаційної системи;
- розробка моделі системи, що відображає процес обслуговування користувачів;
- визначення математичного апарата, що дозволяє визначити основні ключові показники операцій телекомунікаційної системи.

Задачею даної моделі є створення дешевшого і енергоефективного метода передачі даних, ніж існуючі бездротові радіосистеми, враховуючи доступність і повсюдне поширення світлодіодів. Найважливіший внесок у розвиток технології був внесений *IEEE 802.15 WPAN Task Group 7*, яка випустила перший офіційний стандарт *VLC* в другій половині 2011 року [1]. Цей стандарт охоплює як бездротовий інтерфейс *PHY*, так і рівень управління доступом до середовища *MAC*. Він є основою для розробки продуктів з гарантованими функціональними можливостями і дає орієнтири для майбутніх розробок.

Стандарт 802.15.7 призначений для підтримки додатків, що відносяться до *VPAN*. У стандарті розглядаються три класи пристроїв:

- стаціонарні;
- мобільні (термінали, що рухаються разом із користувачами);
- транспортні (термінали, що розміщені на автомобілях, поїздах і ін.).

У стандарті *IEEE 802.15.7* розроблені рекомендації для трьох мережевих топологій: однорангової, зірковидної і ширококомвної. Швидкість передачі даних в мережі становить від 11,67 Кбіт/с до 96 Мбіт/с. У стандарті також розроблені рекомендації щодо побудови типового пристрою мережі *Li-Fi*. На рис. 2 приведено багаторівневу архітектуру такого пристрою, а також її відповідність до моделі взаємодії відкритих систем *OSI*. Кожен рівень цієї архітектури надає послуги вищим рівням [5]. Стандарт 802.15.7 забезпечує механізми *MAC/PHY* для підтримки адаптивної передачі, а також підтримку декількох користувачів, що передають різні потоки даних з одного джерела світла (багаторазовий доступ).

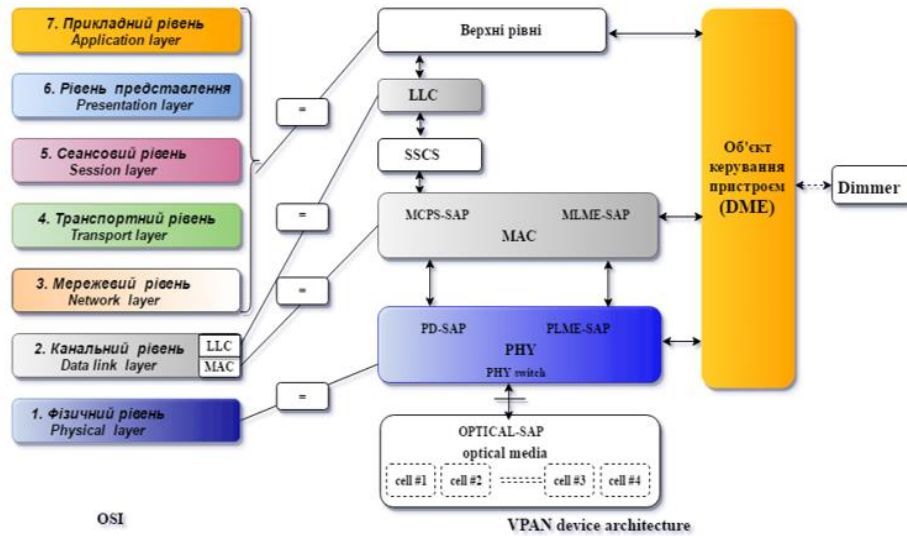


Рис. 2 Графічне зображення відповідності рівнів моделі OSI і VPAN

У мережі *Li-Fi*, Інтернет (*LAN*) підключено до пристрою *HomePlug Av2* через кабель *Ethernet*. І цей пристрій підключено до *APs Li-Fi* також через кабель *Ethernet*. *HomePlug Av2* здатний одночасно передавати електроенергію та дані на *APs Li-Fi* [7].

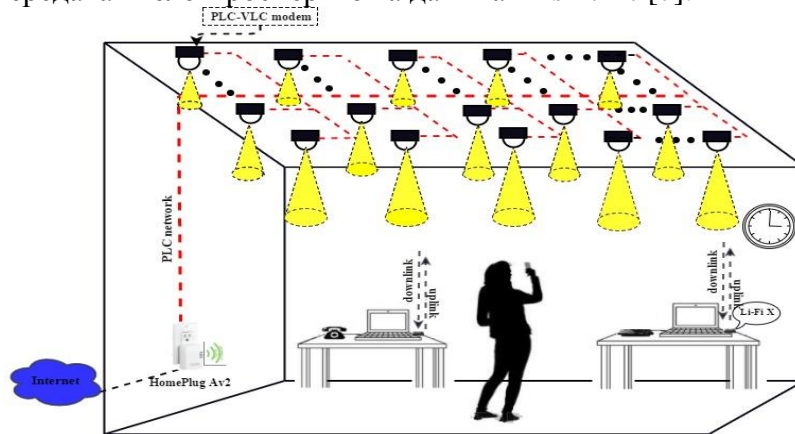


Рис. 3. Графічне зображення базової структури мережі *Li-Fi*

До базової блок-схеми входить [1 – 8]:

1. Вхідний сигнал від Інтернету (*Ethernet LAN* або оптичні кабелі);
2. Пристрій *HomePlug Av2*;
3. *AP Li-Fi* (модем *PLC-VLC* + світлодіоди-*LEDs*);
5. *Li-Fi X*, який підключено до термінальна;
6. Термінальні пристрої.

При процесі обміну даних між рухомим користувачем та *AP*, термінал може сканувати область для визначення наявних сусідніх координаторів (*AP*) та виконувати вимірювання потужності прийнятого сигналу *RSS*. Вимірювання ґрунтується на маяках або опорних сигналах [6]. Після порівняння значення *RSS*, термінал надсилає запит для отримання асоціації до сусіднього координатора, а також значення необхідних вимог *QoS*. У повідомленні відповіді асоціації, сусідній координатор надає підтвердження у разі можливості виконання вимог *QoS*.

Пристрій може виконувати альфа-фільтрацію на вимірюваннях на основі наступного виразу:

$$RSS_n = (1 - \alpha) \cdot RSS_{n-1} + \alpha \cdot M_n, \quad (1)$$

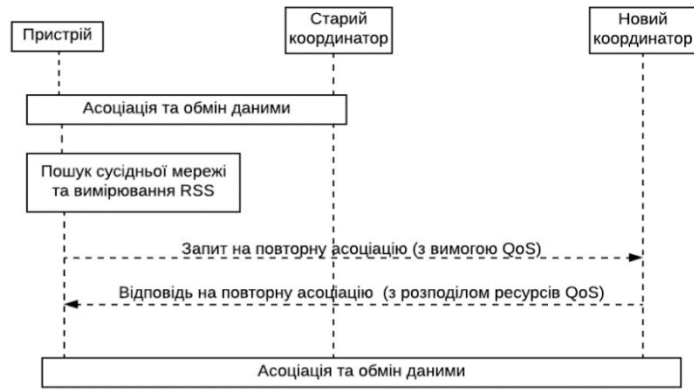


Рис. 4 Графічне зображення процесу хендвера між пристроями

де: RSS_n – це оновлений відфільтрований результат вимірювання, який використовується для оцінки критеріїв звітності або звітування про вимірювання; M_n – останній отриманий результат вимірювання з фізичного рівня; α – коефіцієнт фільтрації, який може бути налаштований; RSS_{n-1} – це старий фільтрований результат вимірювання.

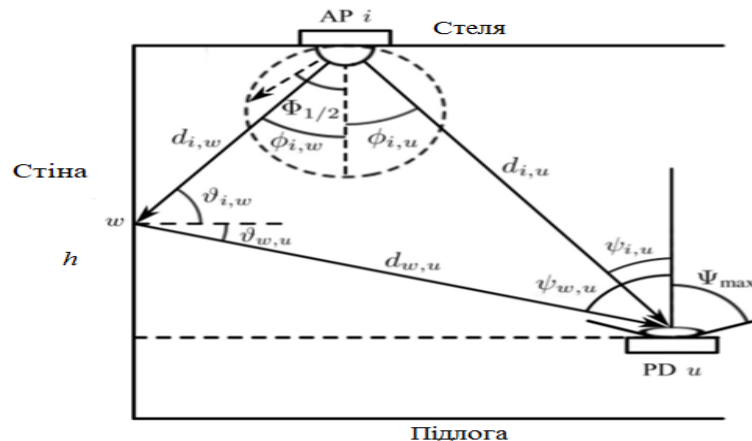
Якщо RSS сусідніх AP задовольняє:

$$RSS_{target} - RSS_n > \Delta_{th1}, \quad (2)$$

де: RSS_{target} – це RSS сусіднього координатора (AP); Δ_{th1} – це попередньо визначений поріг.

Тоді термінал повинен виконати *handover* до сусіднього координатора (рис. 4), який вказує, чи дозволено запит. Крім того, сусідній координатор також інформує ресурси QoS, виділені на термінал, або пропонує альтернативний рівень QoS, який може підтримувати сусідній координатор. Якщо сусідній координатор приймає запит, тоді термінал може отримати дані із сусіднього координатора.

Канал VLC складається з лінії огляду (LOS) та лінії відсутності огляду ($NLOS$). Геометрія розповсюдження VLC в межах одного приміщення представлено на рис. 5. Передбачається, що кожен приймач обладнано фотодетектором (кожен спрямовано вертикально вгору). LOS шлях від передавача i та приймача u це пряма лінія між ними, і відповідна евклідова відстань позначена $d_{i,u}$. Кути випромінювання та падіння, пов'язані зі шляхом LOS , позначаються відповідно $\phi_{i,u}$ і $\psi_{i,u}$.

Рис.5 Геометрія розповсюдження VLC в приміщенні, *downlink*

Різні типи світлодіодів були використані для передачі даних, і вони мають різну смугу пропускання модуляції, починаючи від декількох десятків МГц (фосфорні світлодіоди), до близько 100 МГц (*RGB LED*) і до декількох сотень МГц (світлодіоди з підсиленими резонансними резонаторами). На стороні приймача (користувача) зазвичай використовується фотодіодом (*PD*) або матрицею фотодіодів для виявлення сигналу [9]. Можливі типи моделей інтенсивності випромінювання світлодіода і відповідні їм значення параметра m ламбертовського випромінювання [1].

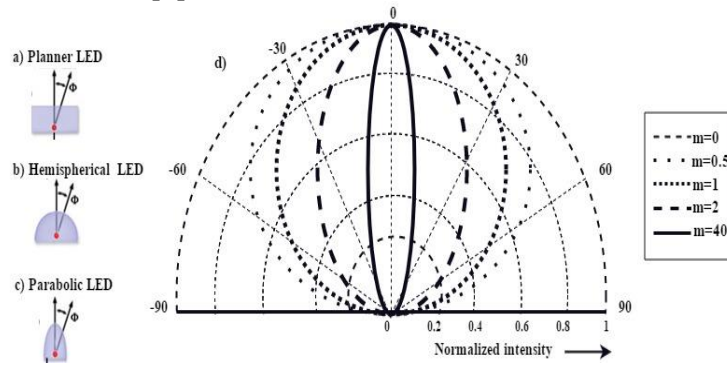


Рис.6 Типи моделей випромінювання світлодіода і відповідні їм значення m : а) планарна лінза; б) полусферична лінза; в) параболічна лінза; г) нормована діаграма спрямованості

Аналitiчну структуру мережі, побудовану на базі *Li-Fi* можна зобразити наступною схемою:

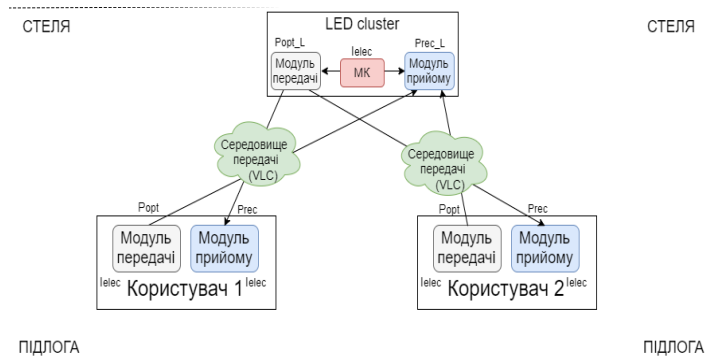


Рис.7 Графічне зображення аналітичної структури мережі *Li-Fi*



Рис.8 Деякі пояснення до аналітичної структури мережі *Li-Fi*

Загасання енергії світлового сигналу при поширенні інформації від передавача до приймача можуть бути розраховані з використанням наступного аналітичного виразу:

$$H_{Li-Fi} = H_{LOS} + H_{NLOS}.$$

Як показано в [8], каналу LOS можна розрахувати наступним чином:

$$H_{LOS}^{i,u} = \frac{(m+1)A_{pd}}{2\pi d_{i,u}^2} \cdot \cos^m(\phi_{i,u}) \cdot g_f \cdot g_c(\psi_{i,u}) \cdot \cos(\psi_{i,u}), \quad (3)$$

де $m = \frac{-\ln(2)}{\ln(\cos \phi_{1/2})}$ – ламбертівський показник випромінювання; $\phi_{1/2}$ – кут випромінювання із

половинною потужністю у напрямку головного променя; A_{pd} – фізична площа фотодетектора;

g_f – коефіцієнт посилення оптичного фільтра; $g_c(\psi_{i,u})$ – коефіцієнт посилення оптичного концентратора.

В свою чергу, коефіцієнт посилення оптичного концентратора, який визначається:

$$g_c(\psi_{i,u}) = \begin{cases} \frac{n^2}{\sin^2(\Psi_{\max})}, & \psi_{i,u} < \Psi_{\max}; \\ 0, & \psi_{i,u} > \Psi_{\max}. \end{cases}, \quad (4)$$

де: n – показник заломлення; Ψ_{\max} – кут поля зору (FOV) фотодетектора.

Для шляху $NLOS$, для простоти, враховуються лише відбиття першого порядку. Відбиття першого порядку складаються з двох сегментів:

- 1) від передавача до деякої площі w на стіні;
- 2) від w до користувача.

Евклідові відстані цих сегментів позначаються відповідно $d_{i,w}$ та $d_{w,u}$. Кути випромінювання та падіння відповідно до першого сегмента мають $\phi_{i,w}$ та $\psi_{i,u}$, а для другого сегмента позначаються – $\phi_{w,u}$ та $\psi_{w,u}$. Оскільки розповсюдження шляхів у приміщенні відносно короткі, затримкою між різними такими шляхами можна нехтувати. Іншими словами, припускається, що сигнали різних шляхів прибувають на приймач одночасно. Розрахунок каналу $NLOS$ $Li-Fi$ наведено в наступній формулі:

$$H_{NLOS}(\chi) = \int_{\min \theta_{iw}}^{\max \theta_{iw}} \frac{(m+1) \cdot A_w}{2\pi \cdot \left(d_{iw}(\mathcal{G}_{iw}) + \frac{\chi}{\cos[\mathcal{G}_{wu}(\mathcal{G}_{iw})]} \right)^2} \cdot p_w \cdot \cos^m[\phi_{i,w}(\mathcal{G}_{i,w})] \times \quad (5)$$

$$\times g_f \cdot g_c \cdot \cos[\psi_{w,u}(\mathcal{G}_{i,w})] \cdot \cos(\mathcal{G}_{i,w}) \cdot \cos[\mathcal{G}_{w,u}(\mathcal{G}_{i,w})],$$

$$I_{electr.} = R_{pd} \cdot H_{Li-Fi}^{i,u} \cdot P_{opt} / k, \quad (6)$$

де: R_{pd} – чутливість приймача; $H_{Li-Fi}^{i,u}$ – загасання енергії світлового сигналу при розповсюдженні; P_{opt} – це оптична потужність передачі; k – коефіцієнт перетворення оптичного сигналу в електричний.

Розрахунки з використанням виразів (3 – 6) дозволяють оцінити вимоги до показників функціонування *Li-Fi* систем бездротового доступу. Це стосується: максимальної відстані між передавачем та приймачем (в процесі переміщення терміналу абонента), вимоги до потужності передавачів сигналів, кількості передавачів (*LEDs*), які забезпечать заданий рівень сигналу приймачу (*PD*). Щоб отримати ефективну продуктивність мережі та забезпечити необхідні значення енергії сигналу в будь-якій точці прийому необхідно ретельно обчислити величину енергії сигналу в кожній точці знаходження приймача в залежності від відстань між передавачем та приймачем.

Висновок

Проведені дослідження показують, що *Li-Fi* має багато переваг у порівнянні з технологією *Wi-Fi*. По-перше, це велика пропускна здатність, а саме спектр видимих світлових хвиль оцінюється в 10000 разів більше, ніж радіочастотного спектру та може вільно використовуватись. По-друге, висока ефективність, за рахунок використання світлодіодів *LED* як для освітлення, так і для побудови системи бездротового доступу одночасно. По-третє, можливе використання для підводних комунікацій, де зв'язок із радіохвилями дуже складний, а *Li-Fi* може добре працювати в цьому середовищі. По-четверте, не має обмежень на використання *Li-Fi* в літаках, лікарнях та інших специфічних об'єктах де потрібно враховувати питання електромагнітної сумісності. По-п'яте, висока інформаційна безпека, тому що важко зібрати або відслідковувати *Li-Fi* сигнали, так як світлові хвилі не проникають через перешкоди і можуть зосередитися тільки в області де це необхідно.

У зв'язку з вище приведеним запропонована модель системи бездротового доступу на базі технології *Li-Fi*, що дозволяє проводити оцінку ефективності даної технології та визначення найбільш раціонального розміщення елементів даної бездротової мережі для отримання максимальних значень пропускної спроможності. В подальшому планується створення імітаційної моделі сегмента мережі для визначення оптимальних показників мережевого обладнання *Li-Fi*.

ЛІТЕРАТУРА

1. A.I. Romanov, Y.S. Hordashnyk, and T.T. Dong, „Method for calculating the energy loss of a light signal in a telecommunication Li-Fi system”, International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), IEEE Conference Publications, Pages: 1 – 7, 2017.
2. D.Tsonev, S.Videv, and H.Haas, „Towards a 100Gb/s visible light wireless access network”, Optics Express, vol.23, no.2, pp.1627 – 1637, Jan.2015. „Analysis of Downlink Transmission in DCO-OFDM-Based Optical Attocell Networks”, 2014, IEEE Global Communications Conference.
3. „Performance Analysis of Visible Light Communication System for Free Space Optical Communication”, International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST – 2015).
4. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), „802.15.7 IEEE Standard for Local Area Networks–Part 15.7: Short-Range Wireless Optical Communication Using Visible Light”, 2011.
5. V.Jungnickel, „High-bandwidth PHY,” doc: IEEE 802.1516/0356r0, Mar. 2016, available: <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/16/15-16-0356-00-007a-text-input-for-highbandwidth-phy.docx>.
6. Ye-Sheng Kuo, Pat Pannuto, Ko-Jen Hsiao, and Prabal Dutta, „Indoor Positioning with Mobile Phones and Visible Light”, September 7 – 11, 2014, Maui, HI, USA.
7. MohammedS.A. Mossaad, SteveHranilovic, and LutzLampe, „Visible Light Communications Using OFDM and Multiple LEDs”, 0090-6778 (c) 2015 IEEE.