

Олещенко Л.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕГРАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ LI-FI У ГЕТЕРОГЕННІ БЕЗДРОТОВІ МЕРЕЖІ

У статті проаналізовано сучасний стан та перспективи розвитку технології Li-Fi (Light Fidelity) у контексті бездротових систем шостого покоління. Окреслено принципи роботи технології, ключові стандарти (зокрема, IEEE 802.15.7) та перші комерційні рішення, які заклали основу для практичного використання оптичних каналів у передачі даних. Проаналізовано технічні аспекти, релевантні для майбутніх 6G-мереж: фізичний рівень (моделі модуляції, швидкості, оптичні характеристики обладнання), моделі каналів VLC із урахуванням впливу зовнішнього освітлення та шумів, а також архітектури гібридних мереж Li-Fi + RF із підтримкою безшовного handover та мульти-точок доступу.

Окрему увагу приділено перспективам впровадження Li-Fi у внутрішніх середовищах (офіси, лікарні, транспорт), у системах Інтернету речей, для позиціонування в приміщеннях та забезпечення безпечного зв'язку в умовах підвищених вимог до конфіденційності. Продемонстровано ключові переваги цієї технології – використання надширокого спектра видимого світла, потенційно вищі швидкості передачі даних та високий рівень безпеки. Водночас відзначено низку обмежень: потреба у стандартизації та міжсистемній сумісності, проблеми з блокуванням лінії видимості, енергоспоживанням, роботою у змішаному освітленні, а також необхідність формування єдиних нормативних вимог.

На основі аналізу результатів моделювання та експериментальних досліджень наведено приклади proof-of-concept та пілотних проєктів, що підтверджують реальність практичного застосування Li-Fi. У висновках зроблено акцент на тому, що ця технологія є не заміною, а доповненням до RF-зв'язку: вона може ефективно знімати навантаження з радіочастотного сегмента та забезпечувати нові сценарії використання. Підкреслено, що масштабне впровадження Li-Fi у 6G залежатиме від економічної доцільності модернізації інфраструктури освітлення, розробки нових стандартів та інтеграції з мобільними мережами п'ятого і шостого покоління. У найближчі роки очікується поширення нішевих комерційних рішень (промисловість, транспорт, медицина, системи позиціонування), а в довгостроковій перспективі – входження Li-Fi до складу гетерогенної бездротової екосистеми 6G.

Ключові слова: Li-Fi, Visible Light Communication (VLC), 6G, IEEE 802.15.7, гібридні мережі, модуляція, бездротовий зв'язок, позиціонування, IoT, безпека.

Постановка проблеми. Актуальність розвитку бездротових технологій визначається постійним зростанням попиту на високошвидкісну передачу даних, мінімальні затримки та забезпечення стабільного підключення у середовищах з великою кількістю користувачів. У контексті переходу до мереж шостого покоління (6G) ключовими вимогами стають не лише гігабітні швидкості, але й ультранадійний обмін інформацією, інтеграція з Інтернетом речей (IoT), розширеною та віртуальною реальністю (AR/VR), а також підтримка інтелектуальних транспортних систем. Ці тенденції зумовлюють потребу у використанні нових підходів до бездротової комунікації, які виходять за межі традиційного радіочастотного спектра.

Одним із таких перспективних напрямів в IT є технологія Li-Fi (Light Fidelity), що ґрунтується на принципах Visible Light Communication (VLC) – передачі даних за допомогою світлового спектра, зокрема, світлодіодних джерел освітлення. На відміну від традиційних RF-технологій (Wi-Fi, LTE, 5G), Li-Fi не використовує перевантажені радіочастоти, забезпечуючи надвисокі швидкості передачі даних, відсутність електромагнітних завад та підвищений рівень безпеки, оскільки сигнал світла обмежений простором приміщення. Таким чином, VLC може стати доповненням до існуючих бездротових систем, розвантажуючи їх та забезпечуючи якісно новий рівень комунікаційних можливостей.

Постановка проблеми полягає у тому, що, попри значний науковий і практичний прогрес

у сфері VLC та Li-Fi, технологія все ще стикається з низкою обмежень на шляху до інтеграції в архітектуру 6G. Серед ключових проблем – відсутність глобальної стандартизації, обмежена зона дії сигналу, вплив зовнішніх джерел освітлення на якість комунікації, а також складність сумісності з існуючими RF-мережами. Це створює потребу у комплексному дослідженні можливостей і обмежень Li-Fi у складі гетерогенних мереж нового покоління та визначенні перспективних напрямів його впровадження.

Мета статті полягає у дослідженні перспектив інтеграції технології Li-Fi у гетерогенні бездротові мережі шостого покоління 6G, з акцентом на її потенційних перевагах, технічних обмеженнях та можливих сценаріях застосування у різних сферах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія Li-Fi розглядається як перспективний напрям для розвитку систем 6G, оскільки вона пропонує значне підвищення пропускної здатності та зниження затримок завдяки використанню видимого світла замість радіочастот. Сучасні дослідження підкреслюють потенціал використання Li-Fi у сферах високошвидкісної передачі даних, забезпечення безпеки та інтеграції в гетерогенні мережі нового покоління [1]. Водночас науковці наголошують на низці технічних обмежень стосовно радіуса дії, впливу перешкод від фізичних об'єктів та потребі в ефективних методах модуляції [2].

Значна увага приділяється огляду сучасних демонстрацій високошвидкісних систем VLC, де нові цифрові методи модуляції забезпечують стійкість сигналу та ефективність використання спектра [3]. У цьому контексті розробка точних моделей каналів зв'язку у тривимірному просторі є критично важливою для оптимізації Li-Fi в умовах динамічних сценаріїв, де поведінка сигналу залежить від руху користувачів та відбиттів світла [4]. Окремий напрям досліджень пов'язаний з поєднанням Li-Fi та технологій Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS), що відкриває можливості для керованої зміни властивостей каналу та оптимізації розподілу світлових ресурсів у мережах 6G [5]. У той же час новітні дослідження підсумовують два десятиліття розвитку LED-технологій, підкреслюючи їхню ключову роль у підвищенні енергоефективності та масштабованості систем VLC [6].

Стандарт IEEE 802.15.7 розглядається як фундамент для розбудови глобальної екосистеми Li-Fi та її сумісності з іншими бездротовими технологіями [7]. Ще раніше було наголошено, що Li-Fi

має потенціал змінити парадигму мобільного зв'язку, ставши доповненням, а в окремих випадках альтернативою до Wi-Fi та 5G у специфічних сценаріях використання [8]. При цьому огляд попередніх робіт вказує на широке коло застосувань – від смарт-будівель до транспортних систем та основні обмеження, пов'язані з інтеграцією Li-Fi у реальні середовища [9].

Дослідження стандартів VLC демонструють, що відсутність єдиного універсального підходу до інтеграції є ключовим бар'єром, адже різні організації пропонують несумісні між собою рішення [10]. Ця ситуація ускладнює впровадження технології в масштабах глобальних мереж, проте водночас стимулює подальший пошук гнучких моделей сумісності.

Сучасний стан досліджень свідчить про значний прогрес у розвитку Li-Fi та її позиціонування як складової інфраструктури 6G. Проте залишаються невирішеними питання, пов'язані зі стандартизацією, масштабуванням, сумісністю з іншими технологіями та подоланням фізичних обмежень передачі світлового сигналу, що потребує поглиблених досліджень та міждисциплінарних підходів.

Отже, у сучасних дослідженнях технології Li-Fi для інтеграції в 6G залишаються низка невирішених проблем: відсутність єдиного глобального стандарту VLC/Li-Fi, що ускладнює сумісність обладнання від різних виробників [7,10]; потреба у більш точних 3D-моделях каналів для indoor та outdoor-сценаріїв з урахуванням руху користувачів, багатопроменевості та перешкод [4]; складність інтеграції Li-Fi з існуючими мережами Wi-Fi, 5G та майбутніми стандартами 6G [1, 8]; обмеження зони дії, адже видиме світло не проходить крізь стіни та інші перешкоди, що потребує щільнішої інфраструктури освітлювальних пристроїв [2,9]; проблеми енергоефективності та масштабованості, пов'язані з балансуванням між енергоспоживанням, яскравістю освітлення та якістю передачі даних, попри розвиток LED-технологій [6]; вплив зовнішніх джерел світла, таких як сонячне та штучне освітлення, які можуть створювати шум і знижувати якість сигналу [3]; а також питання безпеки й конфіденційності, оскільки, попри вищу захищеність Li-Fi від несанкціонованого доступу у порівнянні з радіочастотними системами, відкритими залишаються проблеми шифрування та захисту від атак на рівні світлових каналів [5].

Метою даного дослідження є аналіз перспектив можливих шляхів інтеграції технології Li-Fi

у системи 6G. Завданнями даного дослідження є наступні.

1. Проаналізувати сучасний стан розвитку технології Visible Light Communication (VLC) та її похідної – Li-Fi.
2. Визначити ключові відмінності та переваги Li-Fi у порівнянні з традиційними RF-технологіями.
3. Розглянути сучасні дослідження та наукові підходи до застосування Li-Fi у контексті мереж 6G.
4. Дослідити основні технічні та практичні проблеми, що обмежують впровадження Li-Fi (стандартизація, зона покриття, сумісність з іншими бездротовими системами).
5. Виділити перспективні напрями використання Li-Fi у гетерогенних мережах шостого покоління та сформулювати відкриті наукові питання для подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу. Історія розвитку технології VLC та її практичного втілення у вигляді Li-Fi бере початок із використання світлових сигналів для передавання інформації ще у XIX столітті, коли застосовувались оптичні телеграфи та маяки. Однак справжній технічний прорив став можливим із появою світлодіодних джерел світла наприкінці XX – на початку XXI століття.

LED-технологія забезпечила поєднання високої енергоефективності, швидкої модуляції світлового сигналу та низької вартості, що відкрило шлях до розробки систем, здатних використовувати видимий спектр для одночасного освітлення та передавання даних. Протягом 2010-х років дослідження розширилися від демонстрацій швидкості передачі даних до розробки мережевих архітектур, мультиантенних (MIMO) підходів у VLC, моделювання каналів, стандартів і безпеки.

Публічну популяризацію і термін Li-Fi значною мірою приписують професору Харольду Хассу (Harald Haas), який у 2011 році виступив на TED з доповіддю “Wireless data from every light bulb” і згодом опублікував серію робіт, де розрізняв VLC і повноцінні мережеві системи Li-Fi. Подальший розвиток VLC пов’язаний із формуванням стандартів і перших комерційних рішень. Важливим кроком стало ухвалення стандарту IEEE 802.15.7 у 2011 році, який визначив базові принципи побудови систем видимих світлових комунікацій, включно з фізичними рівнями, методами модуляції та кодування. Цей стандарт визначає фізичний рівень та рівень управління доступом для бездротових систем на основі видимого світла. Цей стандарт охоплює методи модуляції, швидкості передачі даних, а також вимоги до без-

пеки й сумісності обладнання. Він забезпечує основу для розробки комерційних і промислових рішень та дозволяє інтегрувати Li-Fi у вже існуючі системи освітлення та інфраструктури. Перші комерційні рішення Li-Fi з’явилися на початку 2010-х років. Наприклад, компанія pureLiFi запропонувала обладнання для бездротового підключення на основі LED-освітлення, що дозволяло передавати дані зі швидкістю до 10 Мбіт/с у реальних офісних умовах. Інші виробники також демонстрували рішення для медичних закладів та промислових об’єктів, де радіосигнали обмежені або заборонені.

Основні технологічні досягнення Li-Fi включають надвисокі швидкості передачі, що в лабораторних експериментах перевищують десятки Гбіт/с, застосування різноманітних методів модуляції, таких як OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) та PWM (Pulse Width Modulation), а також проведення успішних демонстрацій у практичних умовах – у класах, офісах та транспортних середовищах. Ці досягнення підтверджують потенціал Li-Fi як високошвидкісної альтернативи Wi-Fi, особливо у середовищах, де безпека та стабільність сигналу мають вирішальне значення. Паралельно почали з’являтися перші прототипи та рішення від стартапів і компаній, що намагалися інтегрувати Li-Fi у побутові та промислові пристрої. У цей період активно велася робота над практичними сценаріями використання VLC, наприклад, у закритих приміщеннях, де світлодіодне освітлення можна було застосовувати як подвійний інфраструктурний ресурс – для світла та даних.

Упродовж останнього десятиліття технологія Li-Fi продемонструвала значні науково-технічні досягнення. Дослідницькі групи та компанії продемонстрували можливість досягнення швидкостей передачі даних у десятки гігабіт на секунду завдяки використанню передових методів модуляції, таких як OFDM (ортогональне частотне мультиплексування) та QAM (квадратурна амплітудна модуляція). Було проведено масштабні експерименти у реальних умовах, що підтвердили життєздатність цієї технології у сферах від «розумних будівель» до транспортних систем і навіть підводних комунікацій. Ці результати закріпили за Li-Fi статус перспективного кандидата для інтеграції у майбутні бездротові мережі 6G.

Сучасні дослідження у сфері Li-Fi зосереджені на кількох ключових напрямках, включаючи фізичний рівень, де вивчаються модулі LED, методи модуляції типу OFDM та інші схеми, а також

застосування MIMO-технологій для підвищення пропускної здатності VLC; моделювання каналів і системи позиціонування, що передбачають формування карт покриття та використання indoor positioning за LED; питання безпеки фізичного рівня і розробку адаптивних алгоритмів для підвищення шумостійкості та підтримки димування (dimming) у світловому освітленні; а також стандартизацію та сумісність, зокрема, у рамках IEEE 802.15.7 і подальших оновлень.

Li-Fi (Light Fidelity) – це метод бездротової передачі даних за допомогою видимого (інколи також інфрачервоного або ультрафіолетового) світла, переважно з використанням світлодіодних (LED) світильників. Дані кодуються в дуже швидких флуктуаціях інтенсивності світла, які людина не помічає, а приймач (фотодіод чи імпульсний перетворювач) перетворює їх назад у бітовий потік. Технологія є підмножиною області VLC і може працювати як доповнення або альтернатива традиційному радіочастотному (RF) Wi-Fi.

У частині передавача дані перетворюються в повідомлення, які можуть бути передані через вільний простір за допомогою видимого світла. Основною метою передавача є одночасне виконання функцій освітлення та передачі даних. На цьому етапі біле світло генерується світлодіодами та модулюється відповідно до інформації. Важливо, щоб передача даних не впливала на основну функцію освітлення пристрою. Приймач складається з фотодіода, який відповідає за прийом модульованого світлового сигналу та його перетворення назад у електричний сигнал. Цей сигнал

потім обробляється для відновлення переданих даних. Бездротовий оптичний канал зв'язку забезпечує фізичне з'єднання між передавачем і приймачем, використовуючи видиме світло як середовище передачі.

Світло не лише виконує функцію освітлення, а й служить каналом для бездротової передачі даних. На рис. 1 зображено приклад архітектури інтернет-з'єднання з використанням технології Li-Fi.

Система складається з серверу та доступу до мережі Інтернет, контент якої передається на лампові драйвери, що керують LED-лампами. Світлодіодні лампи одночасно виконують функцію освітлення та передачі даних через видиме світло. На стороні користувача встановлені фотодіоди або Li-Fi донгли, які приймають модульований світловий сигнал. Прийняті дані обробляються та підсилюються блоком Amplification & Processing, після чого передаються до пристроїв користувачів, таких як ноутбук, планшет або смартфон. Відбувається одночасна передача різного типу контенту (зображень, відео, аудіо) декільком користувачам через одну мережу LED-освітлення. Використання видимого світла для комунікації відкриває нові можливості для бездротових технологій, зокрема, у контексті мереж 6G.

Розглянемо порівняння технологій Li-Fi, Wi-Fi та традиційних RF-комунікацій, їх основні характеристики, переваги та недоліки (табл. 1).

Технологія Li-Fi пропонує значні переваги в умовах обмеженого простору, де важлива висока швидкість передачі даних та безпека, наприклад,

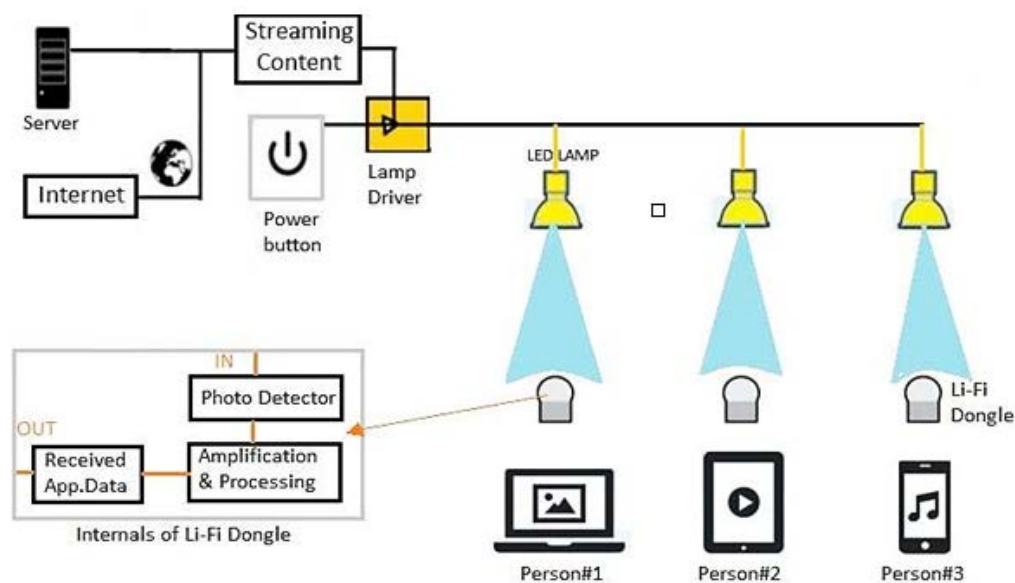


Рис. 1. Приклад архітектури мережі Li-Fi [11]

у розумних будівлях або медичних установах. Однак її обмежений діапазон та потреба в прямій видимості можуть обмежити її застосування у деяких сценаріях. У той час як Wi-Fi та традиційні RF-технології забезпечують ширше покриття та сумісність з більшістю пристроїв, вони можуть бути обмежені швидкістю та зазнавати перешкод у середовищах з високим навантаженням.

На рис. 2 зображено діапазон електромагнітного спектру від низьких частот, де розташовані радіохвилі, до вищих частот, де розташоване гамма-випромінювання (видимий спектр світла коливається від 380 нм до 750 нм). Будь-яку інформацію, що передається шляхом модуляції світлових хвиль у цьому діапазоні, можна вважати типом зв'язку видимого світла. Радіохвилі, які включають технологію Wi-Fi, охоплюють частоти від 3 кГц до 300 ГГц. З іншого боку, частоти видимого світла варіюються від 430 ТГц до 770 ТГц, що в 10 000 разів більше, ніж весь радіочастотний спектр.

Архітектура *PLiFi* (*Power Line and Light Fidelity*) поєднує можливості Li-Fi та мереж електроживлення для створення гібридної сис-

теми бездротового зв'язку, де дані передаються через світлодіодне освітлення та підключені до електричної мережі пристрої. У такій архітектурі інформація спочатку інjektується у світловий передавач через блок обробки сигналу, який синхронізує дані з живленням LED, забезпечуючи одночасно освітлення та комунікацію; фотодіод на стороні приймача перетворює модульований світловий сигнал назад у електричний для подальшої обробки. *PLiFi* дозволяє розширити покриття, підвищити надійність передачі та інтегрувати інфраструктуру освітлення з інформаційними мережами, створюючи ефективне рішення для розумних будівель і гетерогенних мереж 6G.

На рис. 3 представлено характеристику I-L (світловий потік – струм) джерела світла, зокрема, світлодіода. Ця характеристика демонструє залежність між струмом, що протікає через LED, та світловим потоком, який він генерує.

При низьких значеннях струму світловий потік зростає лінійно, але після досягнення певної точки насичення (приблизно 100 мА) зростання світлового потоку сповільнюється. Ця особливість важлива для розуміння обмежень у швид-

Таблиця 1

Порівняння технологій Li-Fi, Wi-Fi та традиційних RF-комунікацій

Параметр	Li-Fi	Wi-Fi	Традиційні RF-технології
Середовище передачі	Видиме світло (380–780 нм)	Радіохвилі (2.4–5 ГГц)	Радіохвилі (до 100 ГГц)
Швидкість передачі	До 100 Гбіт/с (залежно від умов)	До 2 Гбіт/с (стандарт 802.11ac)	Від кількох Мбіт/с до десятків Гбіт/с (наприклад, 5G)
Діапазон	Обмежений прямою видимістю (до 10–20 м)	До 100 м (в залежності від потужності сигналу та перешкод)	Від кількох метрів (Bluetooth) до кількох кілометрів (GSM, 5G)
Затримка	Низька, до 1 мс	Зазвичай до 10–50 мс	Від кількох мс (5G) до кількох сотень мс (GSM)
Сумісність	Спеціальні пристрої з фотодіодами	Більшість сучасних пристроїв підтримують Wi-Fi	Більшість мобільних пристроїв підтримують RF-зв'язок (GSM, 5G)
Безпека	Висока (сигнал не проходить через стіни)	Середня (можливі перехоплення сигналу)	Залежить від технології: від середньої до високої
Перешкоди	Не піддається радіоінтерференції	Може зазнавати радіоінтерференції	Може зазнавати радіоінтерференції
Енергоспоживання	Низьке (використовує існуюче освітлення)	Залежить від потужності передавача та кількості підключених пристроїв	Залежить від технології та потужності сигналу
Переваги	Висока швидкість, низька затримка, висока безпека, сумісність з освітленням	Широке поширення, підтримка більшістю пристроїв, зручність використання	Широке покриття, підтримка більшістю мобільних операторів
Недоліки	Обмежений діапазон, потребує прямої видимості, потребує спеціальних пристроїв	Може зазнавати перешкод, обмежена швидкість в умовах високого навантаження	Може зазнавати перешкод, обмежена швидкість в умовах високого навантаження

кості модуляції світла та ефективності передачі даних у системах VLC.

На фізичному рівні Li-Fi базується на використанні видимого світла для передачі даних. Для цього застосовуються різні моделі модуляції, такі як On-Off Keying (OOK), Pulse Width Modulation (PWM) та більш складні методи OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), які дозволяють досягати високих швидкостей передачі – від десятків Мбіт/с у комерційних рішеннях до десятків Гбіт/с у лабораторних експериментах. Важливими є оптичні характеристики світлодіодів LED, їх швидкість перемикання, ширина спектру та кут випромінювання. Обладнання має відповідати високим вимогам щодо стабільності сигналу та точності управління освітленням, що одночасно забезпечує комфортне освітлення та передачу даних. Канали передавання у Li-Fi описуються моделями VLC. Основними факторами, що впливають на якість сигналу, є затухання

світла із відстанню, відбиття від поверхонь, вплив зовнішнього та штучного освітлення, а також шум фотоприймачів. Крім того, блокування прямого променя тілами людей або предметами може тимчасово переривати з'єднання, що потребує використання спеціальних алгоритмів корекції помилок та резервування каналів.

Архітектури мереж Li-Fi в умовах 6G передбачають гібридну інтеграцію з радіочастотними мережами, такими як Wi-Fi або 5G. Це дозволяє організовувати seamless handover між оптичним і радіочастотним каналом, забезпечуючи безперервне з'єднання. Для масштабних середовищ використовуються мульти-точки доступу (multi-AP), які координують освітлення та передачу даних, мінімізуючи сліпі зони та перешкоди.

Li-Fi має значний потенціал у внутрішніх середовищах, таких як офіси, лікарні, навчальні заклади, транспортні засоби, а також для IoT-пристроїв

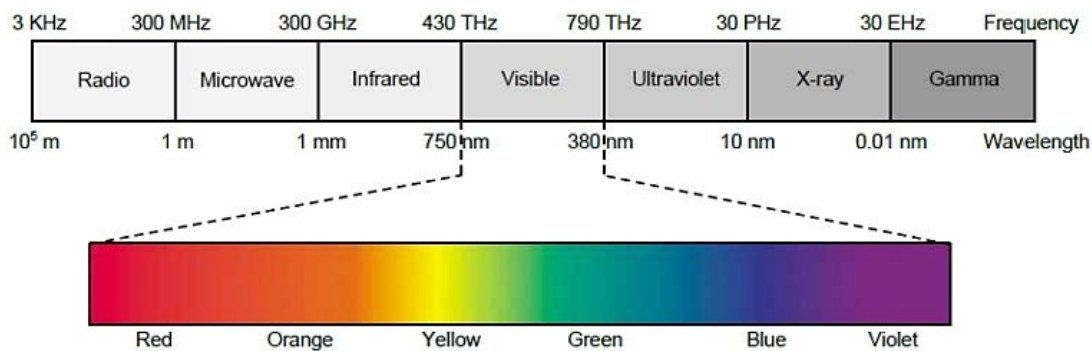


Рис. 2. Електромагнітний спектр [9]

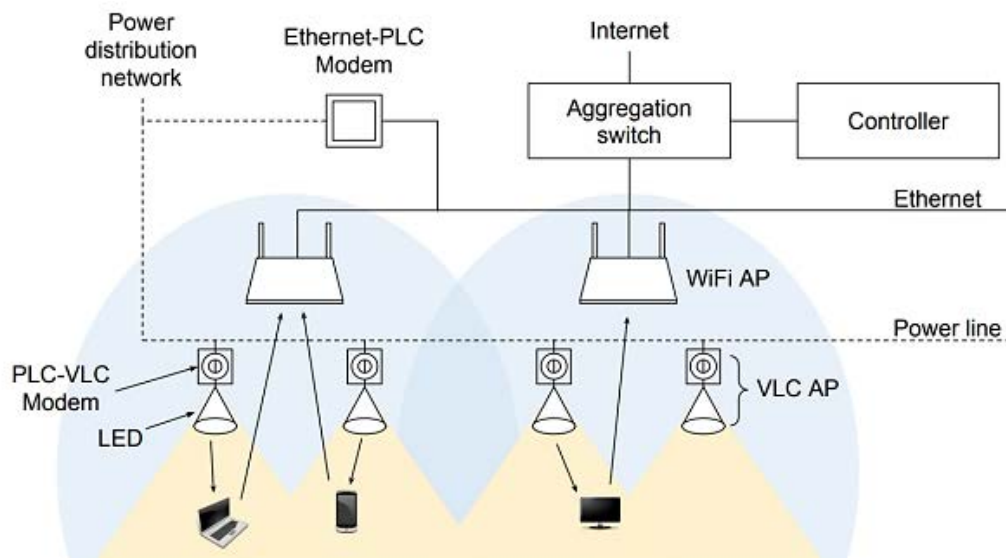


Рис. 3. Приклад архітектури PLiFi [9]

та систем позиціонування в приміщеннях. Поєднання освітлення та комунікації дозволяє створювати мультифункціональні середовища, де світло одночасно освітлює приміщення та передає дані. Особливо актуальна технологія у середовищах, де RF-сигнали обмежені або небажані, наприклад, у медичних закладах. Технічні переваги Li-Fi включають широкий спектр частот у видимому світлі, що дозволяє потенційно досягати високої пропускної здатності та мінімізувати перешкоди. Завдяки спрямованості світлового променя забезпечується вища безпека передачі, оскільки сигнал важко перехопити без прямого доступу до світлового променя.

Водночас впровадження Li-Fi у масштабі 6G стикається з економічними та інфраструктурними проблемами, оскільки потрібна модернізація систем освітлення, сумісність нових пристроїв з існуючою інфраструктурою, придбання спеціалізованого обладнання, а також формування стандартів і нормативних вимог, які забезпечать взаємодію між різними виробниками та технологіями.

Рис. 4 демонструє схему гібридної мережі Li-Fi + 6G. У верхній частині зображено робочий простір, де настільні лампи з LED-освітленням виступають як точки доступу Li-Fi, забезпечуючи з'єднання для ноутбуків користувачів. Завдяки світловим променям дані передаються локально та з високою швидкістю.

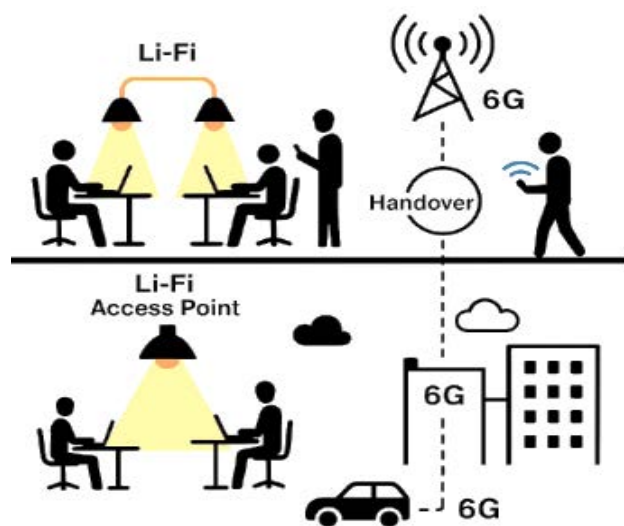


Рис. 4. Приклад зображення гібридної мережі Li-Fi + 6G з безшовним переходом між оптичними та радіочастотними каналами

У центрі схеми позначено процес безшовного переходу (handover) між Li-Fi та 6G. Пристрої можуть перемикатися з оптичного каналу на мобільну мережу, коли користувач залишає приміщення або сигнал блокується.

У нижній частині ілюстрації показано зовнішнє середовище з вежами 6G, автомобілем та будівлею. Це символізує широке покриття та мобільність 6G, яке доповнює локальні можливості Li-Fi. Таким чином, схема відображає гібридну архітектуру, де технологія Li-Fi використовується для високошвидкісного доступу всередині приміщень, а 6G – для глобальної мобільності та інтегрованих сервісів.

Одним із найбільших обмежень Li-Fi є лінія променя та блокування сигналу. Оскільки передача відбувається через світло, будь-яке перекриття променя – людиною, меблями чи предметами може призвести до різкого зниження якості або повної втрати з'єднання. Це вимагає розвитку технологій багатоточкового доступу та використання резервних каналів.

Другий важливий аспект – стандартизація та інтероперабельність. Хоча стандарт IEEE 802.15.7 визначає базові параметри VLC, на рівні масового впровадження потрібні універсальні протоколи сумісності з Wi-Fi, 5G та майбутніми 6G-мережами. Без цього інтеграція залишатиметься обмеженою.

Також актуальним є питання енергоспоживання та ефективності. Світлодіоди мають високу енергоефективність у порівнянні з традиційними лампами, але постійне перемикання з високою частотою потребує оптимізації апаратного забезпечення, щоб уникати надмірного споживання енергії та перегріву компонентів мережі. Ще однією проблемою є робота в умовах змішаного освітлення або зовнішнього світла. Сонячні промені та інші джерела освітлення можуть створювати додатковий шум у каналі VLC, що знижує пропускну здатність і стабільність з'єднання. Це вимагає складних алгоритмів фільтрації сигналів та адаптивних систем модуляції.

Окремо слід розглядати безпеку, приватність та захист від атак. Хоча мережі Li-Fi природно більш захищені від перехоплення через локальність світлового променя, можливі атаки на фізичному рівні (перехоплення фотоприймачем), а також уразливості в мережевих протоколах. Це створює потребу у криптографічних методах та захищених протоколах взаємодії.

Моделювання каналів Li-Fi здебільшого ґрунтується на оптичних моделях поширення світла. Використовуються як прості моделі лінії видимості (LOS), так і більш складні моделі з урахуванням багатопробієвих відбиттів (NLOS). У симуляціях враховуються фактори шуму фотодіодів, вплив навколишнього освітлення та пара-

метри модуляції. Це дозволяє передбачати продуктивність мережі ще до розгортання фізичної інфраструктури. У технологічних експериментах продемонстровано передачу даних на швидкостях десятки гігабіт за секунду за допомогою багатоканальної OFDM-модуляції та високочутливих фотоприймачів. Зокрема, в лабораторіях були успішно проведені досліди з передачею відеопотоку у реальному часі через звичайні LED-світильники, що довело можливість практичної інтеграції Li-Fi у систему освітлення.

Можливі сценарії proof-of-concept включають офіси з інтегрованими Li-Fi лампами, транспортні засоби (літаки, потяги), де радіозв'язок обмежений, та медичні заклади, де необхідно мінімізувати електромагнітні перешкоди. Пілотні проєкти у цих сферах демонструють не лише технічну спроможність Li-Fi, а й економічну доцільність для подальшого масштабного впровадження у майбутніх мережах 6G.

У табл. 2 наведено напрямки практичного застосування Li-Fi у системах 6G (офіси, транспорт, медичні заклади, IoT, позиціонування) та їх очікувані ефекти. Li-Fi може не лише доповнити, а й суттєво розширити функціональність бездротових мереж, об'єднавши комунікацію та освітлення.

У табл. 3 зіставлено характеристики двох підходів: спектр, пропускна здатність, безпека, покриття, економічні аспекти. Зокрема, Li-Fi має суттєві переваги у швидкості та безпеці, але поступається RF у масштабності покриття та зрілості інфраструктури.

Таблиця 2

Перспективи інтеграції Li-Fi у системах 6G

Напрямок застосування	Очікувані ефекти та переваги
Внутрішні середовища (офіси, лікарні, транспорт)	Високошвидкісний доступ без RF-перешкод; безпечний зв'язок у медичних установах; стабільне з'єднання в літаках і потягах.
Інтернет речей (IoT)	Масове підключення датчиків і пристроїв без перевантаження радіочастотного спектра; низька затримка у локальних мережах.
Позиціонування в приміщеннях	Точність на рівні десятків сантиметрів завдяки локалізації джерела світла; інтеграція з навігаційними сервісами.
Безпека та приватність	Неможливість перехоплення сигналу поза межами приміщення; локалізація доступу до світлових зон.
Освітлення та комунікація	Подвійне використання LED-освітлення – економія інфраструктури; інтеграція у «розумні будівлі» та smart city.

Висновки. Сьогодні дослідники розглядають Li-Fi як комплементарну (а не заміну) технологію відносно RF-зв'язку: у місцях із високими вимогами до безпеки або великою щільністю підключень (офіси, класи, конференц-зали, аеропорти, промислові цехи) Li-Fi може зняти навантаження з RF-сегменту й дати додаткову пропускну здатність. Перспективними застосуваннями є позиціонування в приміщеннях, бездротове підключення у літальних/медичних середовищах, IoT з енергоефективним освітленням. Проте масштабне впровадження залежатиме від

Таблиця 3

Порівняння Li-Fi та RF-технологій у контексті 6G

Параметр	Li-Fi (Visible Light Communication)	RF-технології (Wi-Fi, 5G/6G)
Спектр	Використовує видиме світло (400–800 ТГц), практично необмежений ресурс.	Використовує радіочастоти (МГц–ГГц), спектр обмежений і регульований.
Пропускна здатність	Потенційно >10 Гбіт/с у лабораторних умовах, десятки Мбіт/с – у комерційних рішеннях.	Wi-Fi 6/7: до кількох Гбіт/с; 5G/6G – десятки Гбіт/с.
Затримка (latency)	Дуже низька (менше мілісекунди) завдяки прямому каналу.	Низька, але залежить від перевантаженості спектра і відстані.
Безпека	Висока – сигнал обмежений межами освітленої зони, важко перехопити.	Середня – сигнал поширюється крізь стіни, можливе перехоплення.
Стійкість до перешкод	Чутливість до зовнішнього освітлення, блокування променя.	Краще працює у змішаних умовах, але схильний до RF-перешкод.
Покриття	Локальне (кілька метрів), залежить від зони освітлення.	Широке (десятки метрів у Wi-Fi, кілометри у стільникових мережах).
Вартість впровадження	Потребує модернізації освітлення, нових приймачів/передавачів.	Використовує існуючу інфраструктуру, потребує розширення для 6G.
Типові сценарії	Офіси, лікарні, транспорт, IoT, позиціонування.	Масове мобільне підключення, широке покриття, глобальні сервіси.

економіки заміни або модернізації освітлення, стандартизації й інтеграції з мережами 5G/та вищих. Li-Fi/VLC постає як перспективна технологія для мереж шостого покоління, що має очевидні сильні сторони: величезний спектральний ресурс, високу потенційну пропускну здатність і підвищену безпеку завдяки обмеженості світлового сигналу просторовими межами. Водночас ця технологія має слабкі сторони, пов'язані з чутливістю до перешкод, залежністю від лінії видимості, потребою у новій інфраструктурі та відсутністю зрілих стандартів.

Широке комерційне впровадження Li-Fi/VLC залежить від вирішення прикладних проблем (інфраструктура, стандарти, стійкість до перешкод), інтеграції з існуючими мережами та економічної доцільності. У найближчі роки найімовірніше побачимо комерційні впровадження (промисловість, безпечні середовища, позиціонування) та

подальший розвиток технологій РНУ/МАС, що можуть зробити Li-Fi частиною гетерогенної бездротової екосистеми. Подальші дослідження слід зосередити на розробці гібридних архітектур Li-Fi + RF, удосконаленні моделей каналів, алгоритмів адаптивної модуляції та стандартизації протоколів. Практикам варто приділяти увагу питанням енергоспоживання обладнання, інтеграції Li-Fi у системи освітлення та забезпеченню мережевої безпеки. У перспективі Li-Fi, швидше за все, стане комплементарною технологією у 6G, знімаючи навантаження з радіочастотних сегментів у середовищах із високою щільністю користувачів або жорсткими вимогами до безпеки. Найближчим часом очікується поява нішевих комерційних рішень у промисловості, транспорті, медицині та системах позиціонування, а надалі – поступове включення Li-Fi у гетерогенну бездротову екосистему 6G.

Список літератури:

1. Omer S., Chaurasia B.K., Dixit V., Basu A., Singh R., Nagar V. Impact of Li-Fi in 6G: challenges, applications, and prospects. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2025. Vol. 2. P. 275–292. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-96-0185-1_26 (дата звернення: 3.09.2025).
2. Ariyanti Sri and Muhammad Suryanegara. Visible Light Communication (VLC) for 6G Technology: The Potency and Research Challenges. *2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4)*. 2020. P. 490–493. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9210383> (дата звернення: 3.09.2025).
3. Loureiro P.A., Guiomar F.P., Monteiro P.P. Visible Light Communications: A Survey on Recent High-Capacity Demonstrations and Digital Modulation Techniques. *Photonics*. 2023. 10. P. 993. URL: <https://doi.org/10.3390/photonics10090993> (дата звернення: 3.09.2025).
4. Zhu X., Wang C.-X., Huang J., Chen M., Haas H. A Novel 3D Non-Stationary Channel Model for 6G Indoor Visible Light Communication Systems. *Electrical Engineering and Systems Science*. 2022. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.02560> (дата звернення: 3.09.2025).
5. Abumarshoud H., Mohjazi L., Dobre O.A., Di Renzo M., Ali Imran M., Haas H. LiFi Through Reconfigurable Intelligent Surfaces: A New Frontier for 6G? *Computer Science*. 2021. P. 37–46. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.02390> (дата звернення: 3.09.2025).
6. Aravindan N., Selvendran S., Sivanantha Raja A. Advancements in LED-based indoor visible light communication: A two-decade survey. *Heliyon*. Vol. 11, Issue 9, id.e42866. 2025. URL: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42866> (дата звернення: 3.09.2025).
7. Bhutani M., Singh B., Gupta A., Sudha K., Sharma S., Banerjee S., Talwar M., Chaurasiya V.K. Visible Light Communication Technologies: A Review of IEEE 802.15.7 and Its Role in Next-Generation Networks. *International Journal of Communication Systems*. 2025. 38(11). URL: <https://doi.org/10.1002/dac.70149> (дата звернення: 3.09.2025).
8. Haas H. LiFi is a Paradigm-Shifting 5G Technology. *Reviews in Physics*. 2017. P. 26–31. URL: <https://doi.org/10.1016/j.revip.2017.10.001> (дата звернення: 3.09.2025).
9. Matheus L.E.M., Vieira A.B., Vieira L.F.M., Vieira M.A.M. and Gnawali O. Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenge. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21, no. 4. P. 3204–3237. URL: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2913348> (дата звернення: 3.09.2025).
10. Jian Chen, Tian Liu, and Tao Shu. A Survey on Visible Light Communication Standards. *GetMobile: Mobile Comp. and Comm.* 2021. 25, 1 (March 2021). P. 9–15. URL: <https://doi.org/10.1145/3471440.3471444> (дата звернення: 3.09.2025).
11. Shubhendu Apoorv, Sudharshan Kumar Bhowmick and Annadevi E. Implementation of Li-Fi Technology in Classrooms. *International Conference on Frontiers in Materials and Smart System Technologies. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 590 (012044). URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/590/1/012044> (дата звернення: 3.09.2025).

Oleshchenko L.M. PROSPECTS FOR INTEGRATING LI-FI TECHNOLOGY INTO HETEROGENEOUS WIRELESS NETWORKS

The article examines the current state and future perspectives of Li-Fi (Light Fidelity) technology in the context of sixth-generation wireless systems. It outlines its operational principles, key standards (in particular IEEE 802.15.7), and the first commercial implementations that laid the foundation for practical data transmission using optical channels. The paper provides analysis of the technical aspects relevant to future 6G networks: the physical layer (modulation models, data rates, optical hardware characteristics), VLC channel models considering ambient light interference and noise, as well as hybrid Li-Fi + RF architectures with seamless handover and multi-access point configurations.

Special attention is given to the potential applications of Li-Fi in indoor environments (offices, hospitals, transport), in the Internet of Things (IoT), for indoor positioning, and in secure communication scenarios with high privacy requirements. The key advantages of the technology are highlighted – the exploitation of an ultra-wide spectrum of visible light, potentially higher data rates, and enhanced security. At the same time, several challenges are emphasized: the need for standardization and interoperability, line-of-sight blocking issues, energy efficiency, resilience in mixed lighting environments, and the necessity for unified regulatory frameworks.

Based on the analysis of modeling and experimental research, examples of proof-of-concept and pilot projects are presented, confirming the feasibility of Li-Fi for practical use. The conclusions underline that Li-Fi should be seen as a complementary rather than a replacement technology for RF communication: it can effectively offload radio spectrum traffic and provide novel usage scenarios. It is stressed that large-scale deployment of Li-Fi in 6G will depend on the economic feasibility of lighting infrastructure modernization, the development of new standards, and integration with fifth- and sixth-generation mobile networks. In the coming years, niche commercial solutions are expected to emerge (in industry, transport, healthcare, and positioning systems), while in the long term Li-Fi is likely to become part of the heterogeneous 6G wireless ecosystem.

Key words: Li-Fi, Visible Light Communication (VLC), 6G, IEEE 802.15.7, hybrid networks, modulation, wireless communication, positioning, IoT, security.

Дата надходження статті: 16.09.2025

Дата прийняття статті: 02.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025