

УДК 621.396

В. А. ДРУЖИНІН, доктор техн. наук, професор;

Я. А. КРЕМЕНЕЦЬКА;

О. Р. ЖУКОВА,

Державний університет телекомунікацій, Київ

## СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СТРАТОСФЕРНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ

**Проекти щодо створення систем електрозв'язку за допомогою стратосферних ретрансляторів із деякою періодичністю з'являються в розробників, оскільки такі системи мають певні переваги порівняно з наземними та супутниковими системами. Нині компанії Google і Facebook для розширення кола користувачів проводять випробування стратосферних ретрансляторів. На думку аналітиків, упровадження стратосферних систем зв'язку може значно змінити напрямки розвитку телекомунікаційних технологій. Тому є необхідність проаналізувати технічні аспекти реалізації таких проектів, з'ясувавши проблеми їх подальшого просування.**

**Ключові слова:** стратосферні системи зв'язку; безпілотні ретранслятори; міліметровий діапазон; оптичні радіоканали зв'язку; Project Loon; Internet.org.

### Вступ

Ідеї стосовно використання стратосферних ретрансляторів на висотах понад 20 км (в англійській літературі такі висоти називають *near space*) для військових і комерційних цілей з'явилися ще наприкінці 1940-х років, коли розглядалася концепція використання стратосферних дирижаблів як низькоорбітальних супутників Землі. На цих висотах швидкість вітру спадає до мінімуму (близько 10 м/с), зберігаючи відносну постійність напрямку, а повітря має щільність в 30-40 разів меншу, ніж у приземному шарі. Передбачалося, що основним польотним режимом при експлуатації стратосферних дирижаблів буде зависання над заданою точкою земної поверхні і дрейф у межах «куба» розміром близько  $1 \times 1 \times 1$  км [1].

Підтримку зазначені проекти стратосферних безпілотних платформ отримали тільки в 1970-х роках. Загальна технічна концепція повністю автономного безпілотного ретранслятора з'явилася в середині 1990-х. Приблизно з 2010 року активувалася нова хвиля реалізації стратосферних телекомунікаційних проектів завдяки наявності:

- нових технологій сонячних накопичувачів;
- регенеративних енергетичних елементів (водневих паливних елементів);
- композиційних, полімерних, морозостійких матеріалів;
- малогабаритного з малою масою телекомунікаційного устаткування;
- вузьконаправлених антен;
- новітніх способів кодування і модуляції інформаційних сигналів, які істотно збільшують пропускну здатність і знижують необхідну потужність передавачів;
- мініатюрних оптичних лазерів і генераторів міліметрового (субміліметрового) діапазону;
- чутливих детекторів тощо.

Розглянемо сучасні досягнення в галузі створення стратосферних систем зв'язку та особливості їх використання.

### Проекти Project Loon і Internet.org

За останніми даними, компанії Google і Facebook для збільшення кількості користувачів у малонаселених і малодоступних районах Землі проводять випробування в рамках своїх проектів Project Loon і Internet.org щодо запуску стратосферних ретрансляторів [2]. Обидві компанії змагаються в розробці способів отримання інтернет-сигналу за допомогою літальних апаратів, які здійснюють польоти в стратосфері на висотах від 18 до 27 км.

Проект пошукового гіганта Google Project Loon (рис. 1) почав розроблятися ще 2008 року в рамках дослідницької лабораторії Google X, а з 2013-го проводяться реальні випробування.



Рис. 1. Реклама стратосферного проекту Project Loon

Ідея проекту полягає в тому, щоб запустити приймально-передавальне устаткування, по суті — базові станції, на повітряних кулях. Куля має летіти на висоті близько 20 км, що не заважає польотам цивільної авіації. У стратосфері передбачається одночасне перебування кількох повітряних куль, які об'єднуються у власну mesh-мережу (топологія «кожний-із-кожним»), а так звані

вертикальні канали організуються за звичними протоколами IEEE802.11 — технологія Wi-Fi. Пристрої користувача — спеціальні CPE із заточеною антеною. Один такий аеростат може забезпечити 4G LTE на території діаметром понад 100 км. Згідно з технічними рішеннями утворюється комунікаційна схема, зображена на рис. 2.

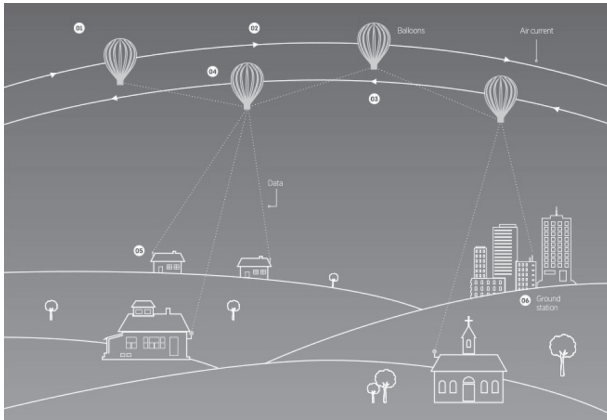


Рис. 2. Телекомунікаційна схема проекту Project Loon

Місцезнаходження приймально-передавальної станції, сонячної панелі та розміри кулі подано на рис. 3.

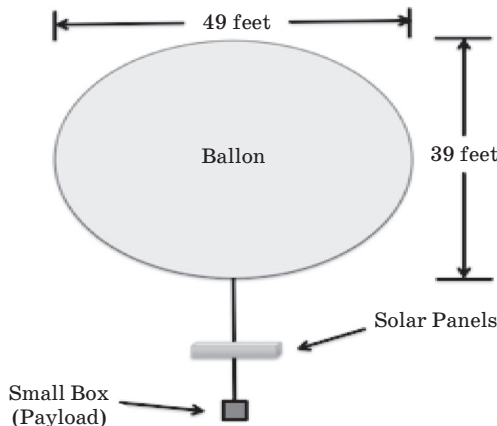


Рис. 3. Структурна схема обладнання стратосферної кулі проекту Project Loon

Для стабілізації положення кулі в заданій точці простору (у кулі немає ніяких пропелерів — вона може тільки здуватися і втрачати висоту, або навпаки — надуватися і підніматися) розроблено таку систему. Сотні і тисячі кулі обмінюються між собою телеметрією, розв'язуючи водночас проблеми спостереження за погодою, і кожна куля, залежно від погодних умов, наприклад напрямку і сили вітру на цьому горизонті, здувається або надувається (див. рис. 3). Джерело енергозабезпечення стратостатів — сонячні батареї, дубльовані хімічними джерелами живлення для нічної роботи.

За задумом розробників, у перспективі така куля має триматися в повітрі до півроку, і повернення устаткування становитиме 100%.

Система, яка розглядається, отримує інтернет-послуги зі спеціалізованих наземних пунк-

тів. Це спеціальні станції, яких має бути досить багато, але все-таки менше, ніж знадобилося б базових станцій для покриття 3g/LTE мережею аналогічної території. У випробуваннях Google використовує протокол IEEE 802.11s на частоті 2,4 ГГц, вертикальний низхідний канал — IEEE 802.11g, n, але на частоті 5 ГГц.

Зрештою Google планує за допомогою цієї технології покрити інтернет-доступом важкодоступні райони будь-якої місцевості.

На офіційній сторінці Google розповідається про потенціал для п'яти мільярдів жителів. І немає підстав вважати, що через 5-10 років цей проект не буде реалізований — ресурсів у Google достатньо. Проект Loon намагається в перспективі забезпечити доступ до мереж нового покоління в усьому світі, у тому числі і в місцях, де неможливо прокласти оптоволоконний кабель. Проект «роздачі» інтернету за допомогою повітряних куль — головний конкурент «Internet.org» від Facebook, і якщо один з них «вистрілить», ми отримаємо повсюдний інтернет.

Із 2015 року компанія Google розпочала випробування куль проекту Project Loon на території США.

У 2016 році розробники проекту планують довести кількість запущених аеростатів до 300 штук, розмістивши свої літаючі точки доступу по всьому світу. Із січня 2016 року пошуковий гігант розпочав випробування на експериментальних радіостанціях в діапазоні частот 71...76/81...86 ГГц, що називається e-діапазоном (E-Band) і в більшості країн належить до діапазонів зі спрощеним порядком ліцензування.

Компанія вже почала 15.02.2016 р. свої тести на Шри-Ланці. Запущено одну з трьох повітряних куль, які будуть використані для випробувань у повітряному просторі країни. Ця куля запущена з Південної Америки, нині перебуває над південною частиною Шри-Ланки. Команда Google розраховує в ході випробувань перевірити управління польотом, ефективність використання спектра та інші технічні питання.

### Всюдисуща енергія вітру

Ще один проект компанії Google Makani є альтернативним джерелом енергії, яке дозволяє отримувати її де завгодно [3]. Поки що прототипи проекту виглядають як дрони, літаки й повітряні змії, підімкнені до проводу, по якому енергія передається на наземну станцію (рис. 4). За ціною таке джерело енергії набагато вигідніше, ніж вітряки, а конструкція дозволяє «ловити» сильніші вітри, що дмуть на висоті понад 300 м над поверхнею Землі.

Для компанії Facebook кількість активних користувачів платформи не менш і навіть більш важлива, ніж для Google. Інвестори оцінюють

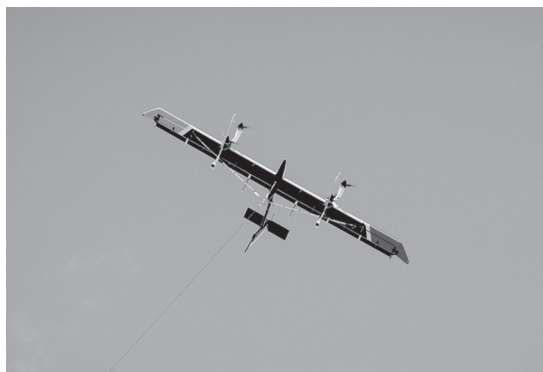


Рис. 4. Безпілотник проекту Google Makani

успішність найбільшої соціальної мережі світу за щорічним приростом користувачів, проте призначена для користувача база в Америці і Європі майже не зростає в останній рік. Facebook планує використати супутникові аплінки, що їх журналісти Business Insider унаочнили, як це зображено на рис. 5.

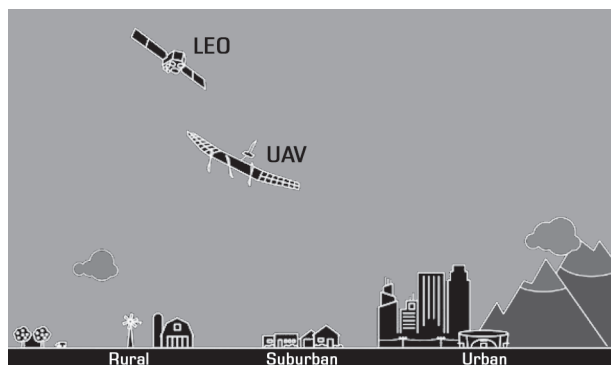


Рис. 5. Супутникові аплінки Facebook

Facebook планує побудувати парк дронів із прикріпленими в нижній частині радіопередавачами, які передаватимуть сигнал на Землю в радіусі 160 км. А спеціальні термінали перетворюватимуть сигнал в інтернет-зв'язок.

Найскладніше завдання проекту полягає в тому, аби в роботі цілої мережі таких дронів, де кожний «безпілотник» буде проміжною ланкою для передавання сигналу, швидкий інтернет не втрачав швидкості по всьому ланцюжку, довжина якого може досягати 300 км від точки отримання сигналу (рис. 6).

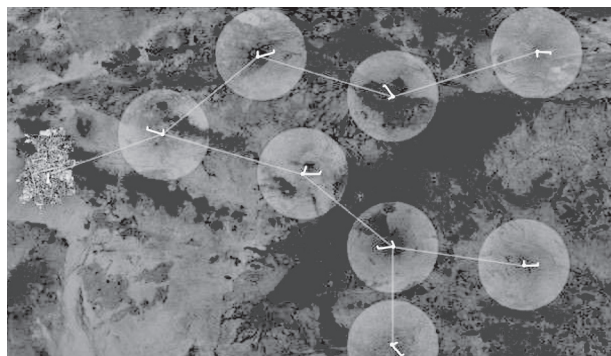


Рис. 6. Ланцюжок безпілотників проекту Facebook

Для підтримання високих швидкостей передавання даних Facebook планує використати лазерні промені як сполучну ланку між літальними апаратами, віддаленими один від одного на значні відстані. Гладеньку велетенську конструкцію дрона з чотирма пропелерами реалізовано з тонкого шару легких полімерних матеріалів, покритих вуглеводневим волокном. Facebook вже протестував систему у своїй каліфорнійській лабораторії, але повторити це на висоті 27 км — завдання не з легких.

#### Обмеження, з якими стикаються зв'язківці

Обсяг передаваної інформації та її якісні показники безперервно збільшуються, при цьому в трафік найбільший вклад вносять інтернет і телебачення. Кожний оператор зв'язку намагається отримати якомога більше користувачів, проте стикається з проблемою недостатньої їх кількості або з відсутністю каналів зв'язку. Саме тому зв'язківці так серйозно зайнялися безпроводовими видами доступу, у чому досягли успіху. Проте принциповому поліпшенню техніко-економічних показників існуючих телекомунікаційних систем перешкоджають передусім такі обставини:

- обмеженням радіочастотним діапазоном (як для комерційних, так і для державних структур);
- відсутністю високошвидкісної магістральної інфраструктури для доставляння інформаційних потоків до базових станцій, наприклад супутників;
- нагальною проблемою збільшення трафіку через або розширення зони обслуговування, або збільшення обсягу передаваних інформаційних потоків.

Фахівці електрозв'язку ведуть роботи в кожному із зазначених напрямків. Нині існують тенденції щодо створення ширококутових систем 4-го і 5-го покоління, надширококутових стільникових мереж, мереж мобільного стільникового телебачення. Упроваджуються проекти низькоорбітальних супутників (LEO) для високошвидкісного доступу в інтернет.

#### Порівняння стратосферних систем із наземними та супутниковими

Аналіз проблем реалізації перспективних систем LEO показує, що за станом на найближчі роки немає технічних вирішень стосовно створення дешевих антен для абонентських терміналів. Супутниковий доступ обмежений частотним ресурсом, дорожнечою запуску на орбіту, складною системою налаштування наземних терміналів. Основним драйвером зростання ринку супутникового зв'язку є цифрове телевізійне мовлення у форматі високої чіткості (*high definition television* — HDTV). І найбільш імовірна швидкість передавання телевізійної «картинки» стандарту Ultra HD буде близько 40 Мбіт/с. Розвиток, наприклад, ефірного телебачення в Європі загальмувався



через фізичні обмеження частотного діапазону наземного телемовлення, оскільки до складу будь-якого мультиплексу можна буде включити не більш як 2 HD каналів [4].

**Супутниковий інтернет уже кілька років перебуває в стані застою, і запуск нових супутників із транспондерами Ка діапазону не призведе до його істотного зростання.** Більшість операторів, що надають послугу мобільного супутникового зв'язку на світовому ринку, працюють у збиток. Цей сегмент супутникової галузі зв'язку має дуже великий обсяг кредитної заборгованості. Близько половини абонентів мобільного супутникового зв'язку у світі належить державним і військовим установам. Вартість створення супутників становить від 0,3 до 2 млн дол. США. Терміни виготовлення не перевищують 1-1,5 року (відповідно, коректність довгострокових прогнозів дуже низька). Одна з основних проблем — термін служби супутників обмежений, але є дані, що він може досягати 5-7 років. Проте, в основному — не більш як 2 роки.

Глобальним комерційним супутниковим проектам притаманні очевидні недоліки в розв'язанні головного телекомунікаційного завдання, а саме: отримання мінімального відношення ціна/послуга. Справді, чи варто розширювати зону обслуговування майже на всю поверхню планети, якщо велика частина потенційних споживачів високошвидкісних інформаційних потоків розміщується дуже компактно (понад 200 міст на Землі використовують до 80% цього телекомунікаційного трафіку) [5].

Для багатопараметричних завдань з'являються нестандартні рішення, такі як стратосферні системи зв'язку. Зв'язок стратосферних ретрансляторів з іншими наземними мережами загального користування має здійснюватися через наземні станції сполучення подібно до того, як це робиться в супутниковому зв'язку, або безпосередньо з кінцевим користувачем. Такі підходи, поза сумнівом, розкривають не лише позитивні якості різних систем зв'язку, а й використовують абсолютно нетрадиційне розташування приймально-передавального устаткування, а також розподіл частотного ресурсу.

На відміну від супутникових систем, тут немає жорстких вимог щодо маси та кількості устаткування, непотрібно використовувати, як це робиться для запуску космічних об'єктів, дорогі ракетносії, тим більш, що через порівняно невелику висоту підвісу енергетичні характеристики радіотракту дуже високі. Повітряні платформи, що працюють у стратосфері, на відміну від орбітальних супутників, здатні набагато інтенсивніше використовувати наявний діапазон частот. Ефективне використання спектра частот робить стратосферні безпілотні системи зв'язку дешевшим способом передавання сигналу в розрахунок вартості підйому одного передплатника порівняно із супутниками або наземними системами.

### Використання міліметрового та оптичного діапазонів

Сьогодні за допомогою міліметрових хвиль вже досягнуто гігабітних швидкостей передавання інформації на відстані до 1 км в міських умовах. А це важливо, оскільки при експоненціальному зростанні обсягів інформації зв'язківці передусім дбають про збільшення ширини пропускання радіоінтерфейсу та виділення нових частотних діапазонів.

Сучасні системи 4-го покоління (4G), включаючи LTE і мобільний WiMAX, використовують такі передові технології, як мультиплексування за допомогою ортогональних частот (OFDM), передавання даних за допомогою множини приймальних і передавальних антен (MIMO), механізми вибору пріоритету передавання залежно від якості каналу (multiuser diversity), адаптивне підстроювання каналу (adaptive link), застосування турбокодів і гібридних методів автоматичного запиту повтору (HARQ). Усі ці методи використовуються для того, щоб досягти спектрального ущільнення, близького до теоретичної межі в розмірності (біт/с)/Гц, оскільки можливості подальшого спектрального ущільнення практично вичерпані.

Для швидкостей передавання інформації понад 10 Гбіт/с у безпроводових системах можна використати міліметровий, а в перспективі — субміліметровий діапазон. Тоді такі радіосистеми за швидкістю стають порівнянними з волоконно-оптичними. Навіть із застосуванням найпростішої схеми модуляції, наприклад двійкової фазової маніпуляції, можна досягти швидкості 1 Гбіт/с.

Міліметрові хвилі поглинаються киснем та водяною парою в атмосфері. Проте загасання в молекулах кисню та водяній парі значно менше, ніж, скажімо, у діапазоні 60 ГГц (рис. 7). При сильній зливі або мусонах коефіцієнт загасання для більшої частини міліметрового діапазону можна взяти близько 50 дБ/км, у середньому при дощі 10 дБ/км. Атмосферне загасання становить 0,5 дБ/км (навіть для туману) (див. рис. 7) [6].

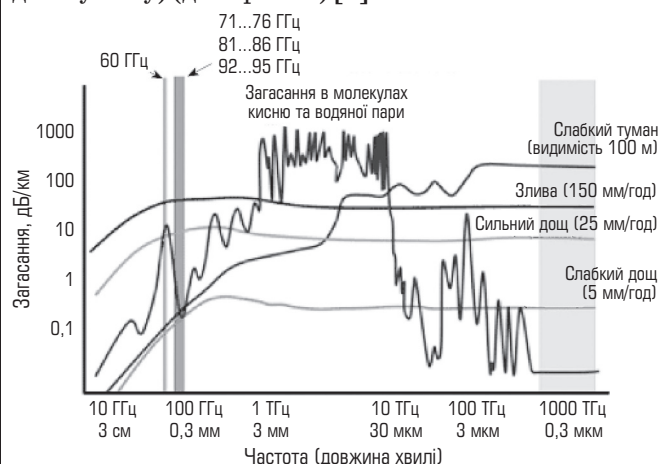


Рис. 7. Загасання в міліметровому діапазоні для наземних радіоліній

Ключові параметри при розрахунку наземної радіолінії — це потужність базової станції, коефіцієнт підсилення антен приймача і передавача, а також значення втрат [7].

Розглянемо приклад розрахунку системи в міліметровому діапазоні (72 ГГц) у вигляді такої технічної характеристики:

Потужність передавача .....	35,00 дБп
Підсилення передавальної антени .....	30,00 дБв
Частота носійної .....	72,00 ГГц
Відстань .....	1,00 км
Втрати при поширенні .....	129,55 дБ
Інші втрати .....	20,00 дБ
Підсилення приймальної антени .....	15,00 дБв
Прийнята потужність .....	мінус 69,55 дБп
Ширина смуги .....	1,00 ГГц
Щільність потужності	
теплового шуму .....	мінус 174,00 дБп/Гц
Рівень шуму в приймачі .....	10,00 дБ
Тепловий шум .....	мінус 74,00 дБ
Відношення сигнал/шум .....	4,45 дБ
Втрати в приймачі .....	5,00 дБ
Швидкість передавання даних .....	1 Гбіт/с

Проте щодо енергетичного розрахунку вертикальних радіотрас досі не все відомо. Наприклад, для розрахунку стратосферних ліній не береться до уваги вплив іоносфери. Ураховуються тільки нижні шари тропосфери. Основним чинником загасання сигналу виступають хмари, що мають вертикальну товщину 200-500 м, а також дощові зони, товщина яких при  $\alpha = 10^\circ$  становить зазвичай 2 км [8]. І в нижньому шарі тропосфери до висоти 1-2 км міститься 90% молекул водяної пари.

Твердження, що зі збільшенням частоти зростає загасання у вільному просторі, доволі сумнівне. Завдяки вузькій діаграмі спрямованості для ультракоротких хвиль можна досягти великого коефіцієнта підсилення. Формування променя — ключова технологія для міліметрових хвиль. Малі розміри (півхвильовий диполь) і просторове рознесення (також півхвильовий диполь) в антенах міліметрового діапазону дозволяють розмістити в невеликому об'ємі багато антен (десятки антен на кубічний сантиметр для частоти 80 ГГц). Також завдяки вузькій діаграмі спрямованості зменшується доплерівський зсув (відмінність у значенні величині доплерівського зсуву в прийнятій хвилі для різних кутів прийому), спостерігається набагато менший взаємовплив базових станцій, уможливується множинний доступ із просторовим розділенням (SDMA)[6].

Із міліметровим діапазоном пов'язують підвищене загасання радіохвиль у газах, що становлять атмосферу (див. рис. 7). Проте це стосується тільки горизонтальних наземних радіоліній. Наприклад, для наземних радіоліній протяжність

у найнесприятливіших погодних умовах для міліметрових хвиль становить 3 км, для субміліметрових — 500 м.

Особливості загасання міліметрових хвиль для вертикальних і похилих трас такі: еквівалентна товщина атмосфери не перевищує 1,5 км, що відповідає всепогодній прозорості практично в усьому міліметровому діапазоні [9]. Таким чином, для зв'язку стратосферних платформ із наземними станціями (користувачами) придатний міліметровий діапазон, причому межа дальності зв'язку в цьому діапазоні може бути збільшена до 100-150 км, що неможливо для наземних горизонтальних радіоканалів. А зв'язок між стратосферними ретрансляторами в міліметровому діапазоні може збільшитися до 900 км при потужності випромінювання 0,1...1 Вт.

Зауважимо, що комісія США FCC встановила максимальну потужність для е-діапазону, яка дорівнює 3 Вт.

Застосування міліметрових (субміліметрових) хвиль збільшує також завадозахищеність, прихованість каналів зв'язку, надійність передавання інформації та зменшує енергоспоживання використаних систем [9].

*Для зв'язку із супутником у перспективі може реалізуватися двосегментна система:*

- супутник — стратосферний ретранслятор;
- стратосферний ретранслятор — наземна станція.

Така система дозволяє реалізувати вищі частоти носійної для зв'язку стратосферних «безпілотників» із супутниками та між собою: мала щільність середовища на висоті понад 20 км це дозволяє. У космічних і атмосферних лазерних лініях зв'язку маємо величезний коефіцієнт підсилення передавальних оптичних антен, і, відповідно, малу розбіжність лазерного променя, що дозволяє отримати необхідне відношення сигнал/шум у приймачі в широкій смузі частот при використанні малопотужних передавачів.

Оптична (лазерна) лінія зв'язку — це не просто лінія зв'язку з дуже високою (світловою) носійною. Порівняно із системами радіодіапазону сигнали і шуми в лазерних лініях зв'язку мають принципово інший характер. При детектуванні оптичного сигналу, коли відбувається його перетворення в електричний, необхідно враховувати корпускулярну (квантову) природу оптичного сигналу. У видимому діапазоні довжин хвиль теплові шуми відсутні. Тому оптичні елементи приймача, такі як антена чи оптичні фільтри, не створюють шумів, незважаючи на активні втрати в цих елементах. Ширина діаграми спрямованості приймальної оптичної антени визначається не лише апертурою антени, а й розміром фотодетектора, який можна розглядати як сукупність

великої кількості опромінювачів багатопроменевої антени [11]. Якщо враховувати тільки атмосферне загасання, а воно таке саме, як і для оптичного волокна, то протяжність кола зв'язку становить 4-5 км. Таким чином, стратосферні системи зв'язку можуть стати головними конкурентами волоконно-оптичних систем.

### **Економічний і соціальний ефект, що його можуть забезпечити стратосферні системи зв'язку**

Зниження вартості технологій доступу до високоякісного телебачення, високошвидкісного інтернету, телефонії може мати дедалі більший вплив на розвиток інших телекомунікаційних технологій.

Для компанії Facebook кількість активних користувачів платформи не менш важлива, ніж для Google. Інвестори оцінюють найбільшу соціальну мережу світу за щорічним приростом «юзерів». Але призначена для користувачів база в Америці і Європі останніми роками майже не зростає [12].

За даними Google.Finance, отриманими при аналізі 111 компаній операторів зв'язку і 845 технологічних компаній, ринок технологій взагалі принаймні мінімум в 24 (один до трьох помножити на вісім) рази перевищує ринок телекомунікацій. Якщо узагальнити, то ринок технологій на порядок більший від ринку телекомунікацій. Слід зазначити, що сам телеком споживає чималу частину продукції «Технологій» — наявність Cisco, Intel і Qualcomm у списку гарантує це. А надалі технологічні та медіа-компанії все більше впливатимуть на ринок телекомунікацій.

### **Висновок**

Із абсолютно зрозумілих економічних причин, Facebook і Google намагаються притягати все більше і більше користувачів. І тому вони зацікавлені залучити, навіть безкоштовно, користувачів країн Африки, Південно-Східної Азії, інших демографічно багатих регіонів Планети. Чим більше людей у системі, тим більше це подобається акціонерам. Способи монетизації трафіку вже відпрацьовано. Скажімо, у Нігерії є деяка кількість «малого бізнесу», щоб під'єднатися до Google AdSense і заплатити трохи за рекламу (по одному долару з кожного з 67 млн. жителів).

Ще одна цікава обставина. Телемовлення до 1990-х років практично фінансувалося (і контролювалося) державним урядом і рекламою. Із появою технології передавання ТБ-сигналу конкретному абонентові за допомогою «кабелю», виникли сотні різноманітних каналів і тисячі студій, які продавали свій контент кабельним провайдерам. ARPU кабельних провайдерів ТБ у США все ще дуже великий — від 80 доларів на місяць у DISH

(спутниковий доступ) і до 140 доларів у Comcast. Але з розвитком широкопasmового доступу в інтернет почався вплив користувачів.

З огляду на можливу появу відносно дешевих технологій зв'язку аналітики обговорюють, чи зможуть телебачення, інтернет і мобільний зв'язок стати безкоштовними? А можливо й таке, що впровадження дешевих систем доступу до цих трьох основних інформаційних систем спричинить бурхливий розвиток різноманітних технологій, які будуть вигідні інвесторам та конструкторам і глобально підвищать соціальний та економічний рівень в усьому світі.

### **Література**

1. Прус, Ю. В. *Некоторые аспекты использования стратосферных дирижаблей в интересах обеспечения безопасности территории* / Ю. В. Прус, Б. Ж. Битыев, В. М. Шаповалов // *Технологии техносферной безопасности*.— 2010.— Вып. 1.  
2. [prportal.com.ua](http://prportal.com.ua)
3. [www.google.com/takani/solution/](http://www.google.com/takani/solution/)
4. Крылов, А. *Основные спутниковые сервисы и тенденции их развития в XXI веке* / А. Крылов // *Технологии и средства связи*.— 2014.— № 6.— С. 68–73.— (Спец. вып. «Спутниковая связь и вещание»).
5. Голышко, А. *Надувные «спутники связи» [Электронный ресурс]* / А. Голышко.— Режим доступа:  
[www.chipinfo.ru/literature/radio/199912/p62\\_64.html](http://www.chipinfo.ru/literature/radio/199912/p62_64.html)
6. Пи, Ж. *Введение в широкополосные системы связи миллиметрового диапазона* / Жою Пи (Zhouyue Pi), Фарук Хан (Faroq Khan).— *Samsung Electronics*, 2012.
7. Писарев, Ю. *Гигабитные радиорелейные станции диапазона 80 ГГц* / Ю. Писарев // *Журнал сетевых решений*.— 2012.— № 3.— С. 58–61.
8. Голяницкий, И. А. *Математические модели и методы в радиосвязи* / И. А. Голяницкий; под ред. Ю. А. Громакова.— М.: Эко-Трендз, 2005.— 440 с.
9. Пирогов, Ю. А. *Микроволновые системы телекоммуникации* / Ю. А. Пирогов // *Вестник Моск. ун-та*.— 1994.— № 4.— С. 92–99.— (Сер. 3. Физ. Астрон).
10. Манько, О. О. *Субмиллиметровый диапазон и новітні досягнення на базі нанотехнологій* / О. О. Манько, Я. А. Кременецька, С. В. Морозова // *Зв'язок*.— 2015.— № 2.— С. 44–49.
11. [https://mipt.ru/upload/iblock/1ac/Диссертация\\_Шапов\\_2014\\_04\\_19\\_final.pdf](https://mipt.ru/upload/iblock/1ac/Диссертация_Шапов_2014_04_19_final.pdf)
12. <http://nag.ru/articles/article/28410/net-povesti-na-svete-chem-povest-o-besplatnom-internete.html>

Рецензент: доктор техн. наук І. Р. Пархомей, Державний університет телекомунікацій, Київ.



В. А. Дружинин, Я. А. Кременецкая, Е. Р. Жукова

### СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СТРАТОСФЕРНЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Проекты создания систем электросвязи при помощи стратосферных ретрансляторов с некоторой периодичностью появляются у разработчиков, поскольку такие системы имеют определенные преимущества по сравнению с наземными и спутниковыми системами. Ныне компании Google и Facebook для увеличения числа пользователей проводят испытания стратосферных ретрансляторов. Аналитики утверждают, что внедрение стратосферных систем связи может значительно изменить направления развития телекоммуникационных технологий. Поэтому есть необходимость проанализировать технические аспекты реализации таких проектов, а также проблемы и тонкости их дальнейшего продвижения.

**Ключевые слова:** стратосферные системы связи; беспилотные ретрансляторы; миллиметровый диапазон; оптические радиоканалы связи; Project Loon; Internet.org.

V. A. Druzhinin, Y. A. Kremenetskaya, H. R. Zhukova

### MODERN STATE AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF STRATOSPHERE COMMUNICATION

The projects of creation of communication networks by stratosphere repeaters with some periodicity appear for developers, because certain advantages have such systems as compared to the surface and satellite systems. For today, for the increase of number of users it is tested a company Google and Facebook stratosphere repeaters. Analysts assert that development of stratosphere communication networks can considerably change directions of development of telecommunication technologies. Therefore there is a necessity to analyse the technical aspects of realization of such projects, and also problems and subtleties of their further advancement.

**Keywords:** stratospheric communication systems; unmanned repeaters millimeter range; optical radio communication; Project Loon; Internet.org.

УДК 621.398.96

І. Р. ПАРХОМЕЙ, Є. О. БАТРАК, Н. В. ЦЬОПА,  
Державний університет телекомунікацій, Київ

## РЕЗОНАНСНО-ФАЗОВА ОБРОБКА РАДІОСИГНАЛІВ

**Розглянуто можливості щодо застосування резонансно-фазової обробки інформації в радіотехнічних системах для селекції корисних сигналів з апріорно заданими параметрами.**

**Ключові слова:** скін-шар; фрактальна розмірність поверхні; механічні коливання кристалічної структури речовини.

### Вступ

У наш час негативний вплив взаємних завад на ефективність роботи радіотехнічних систем і комплексів набагато більший, ніж будь-коли. Це пов'язано як із великою кількістю задіяних одночасно радіоелектронних засобів, так і з широким застосуванням надскладних радіоелектронних комплексів. Посилення взаємних завад змушує шукати нові підходи до виділення корисних сигналів з апріорно заданими параметрами. Один із таких підходів полягає в застосуванні фрактальних властивостей для селекції корисних сигналів. Адже багато реальних фізичних систем має фрактальну природу [1–3]. Окрім того, для селекції корисних сигналів у радіотехнічних системах придатні поверхні шорсткуватих провідників антен.

### Основна частина

Розглянемо елементарний випромінювальний елемент циліндроподібної форми. Нехай  $l_l$  — його фрактальна поздовжня, а  $l_T$  — фрактальна поперечна довжина;  $S$  — фрактальна площа поверхні елементарного випромінювача, укладена між поперечними перерізами, розташованими на відстані  $l_l$  один від одного.

Для довільної фрактальної поверхні має виконуватися нерівність  $S \neq l_l \cdot l_T$ . Припустимо, що вздовж циліндра прикладено змінний електричний потенціал з амплітудою  $V$  і частотою  $\omega$ . Відповідна глибина скін-шару визначається виразом [1]

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma \mu \omega}}, \quad (1)$$

де  $\gamma$  і  $\mu$  — відповідно електропровідність і магнітна проникність речовини, які залежать від її електромагнітних властивостей. Фрактальні величини  $l_T$ ,  $l_l$  і  $S$  породжують фрактальні розмірності  $d_T$ ,  $d_l$  і  $d_S$ , що подаються такими співвідношеннями:

$$d_l = \frac{\ln(l_l/\delta)}{\ln(1/\delta)}, \quad d_T = \frac{\ln(l_T/\delta)}{\ln(1/\delta)}, \quad d_S = \frac{\ln(S/\delta^2)}{\ln(1/\delta)}. \quad (2)$$