

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.02.089>
УДК 550.3

Л.Ф. Чорногор, М.Б. Шевелев

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

ЕВОЛЮЦІЯ МЕРЕЖ БЕЗДРОТОВОГО (СТІЛЬНИКОВОГО) ЗВ'ЯЗКУ

Предмет і мета роботи. На сьогодні одна з головних задач радіофізики полягає в освоєнні терагерцового діапазону. Цей діапазон забезпечує революційні зміни, зокрема, в системах бездротового зв'язку. Він має дуже велику частотну ємність, що принципово дозволяє значно розширити використовувану смугу частот до сотні терагерців. У свою чергу це приведе до збільшення на багато порядків швидкості передачі інформації порівняно з існуючими мережами. Актуальною задачею є прогнозування темпів подальшого зростання можливостей мереж бездротового зв'язку. Мета роботи — побудова простих математичних моделей, що прогнозують темпи зростання можливостей мереж бездротового (стільникового) зв'язку на найближчі 20–25 років.

Методи та методологія. У роботі використано аналітичний огляд проблеми дослідження, системний аналіз і математичне моделювання темпів еволюції бездротового зв'язку нових поколінь.

Результати. Із застосуванням усереднених даних про параметри мереж зв'язку 1G–5G і перспективного покоління 6G отримано регресії, що описують зростання швидкості та тривалості передачі інформації у часі впритул до 2050 року. Запропоновані рівняння, які описують еволюцію основних параметрів бездротового зв'язку. Показано, що з 1979 року і до цього часу зростання швидкості передачі інформації описується рівнянням класичної нестійкості. При цьому головний параметр системи зв'язку зростає за експоненціальним законом. Запропоновано моделі з прискореною еволюцією. Більш реальними є розроблені авторами моделі зі сповільненою еволюцією. Одна із них прогнозує ефект насичення, а інша — суттєве сповільнення зростання швидкості передачі інформації. Ефект насичення обумовлений експоненціальним зростанням характерного часу еволюції. Цей ефект є результатом сповільнення темпів зростання швидкості передачі інформації за рахунок фундаментальних, умовно фундаментальних і науково-технічних обмежень. Обґрунтовано, що, швидше за все, покоління 8G буде останнім у еволюції бездротового зв'язку. Це покоління може з'явитися не раніше 2040–2045 років. При цьому для терагерцового діапазону максимальне значення швидкості передачі інформації становитиме 300...1000 Тбіт/с.

Висновки. Запропоновані авторами прості математичні моделі дозволяють прогнозувати динаміку зростання можливостей мереж бездротового зв'язку.

Ключові слова: бездротова мережа, еволюція мережі, швидкість передачі інформації, час затримки, тривалість передачі інформації, регресія, ефект насичення, фундаментальне обмеження.

Вступ

Радіофізика є фізичною базою радіотехніки та радіоелектроніки. Однією з головних задач радіофізики є освоєння нових діапазонів частот.

При переході від попереднього до більш високочастотного діапазону його частотна ємність, а отже, і інформативність діапазону, зростають на три порядки. На цей час активно освоюється терагерцовий діапазон (частота $f = 3 \dots 3 \cdot 10^3$ ТГц,

Цитування: Чорногор Л.Ф., Шевелев М.Б. Еволюція мереж бездротового (стільникового) зв'язку. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 2. С. 89–100. <https://doi.org/10.15407/rpra30.02.089>

© Видавець ВД «Академпериодика» НАН України, 2025

 Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

довжина хвилі $\lambda \approx 10^{-4} \dots 10^{-7}$ м). Зростання частотної ємності, інформативності, поява терагерцових технологій, приладів і систем неминуче приводить до революційних змін у радіоелектронних системах, зокрема, у системах зв'язку. Розвиток систем зв'язку — це одна з найбільш визначальних віх прогресу цивілізації. У першу чергу це стосується мереж бездротового (стільникового) зв'язку. Цей зв'язок швидко розвивається та удосконалюється, починаючи з кінця 1970-х років. Приблизно за 40–45 років швидкість передачі інформації зросла в десятки мільйонів разів, а тривалість передачі зменшилася приблизно так само [1–4].

Актуальною задачею є прогнозування темпів подальшого зростання можливостей мереж бездротового (стільникового) зв'язку. Опису можливостей кожного з поколінь цих систем присвячено низку робіт (див., наприклад, [1–24]). На початку XXI сторіччя було розроблено міжнародну класифікацію та основні стандарти бездротового GSM- і CDMA-зв'язку [1]. Десятиріччя тому було описано динаміку розвитку бездротових мереж впритул до перспективних технологій 8G на основі даних про еволюцію перших чотирьох поколінь 1G–4G [2]. У роботі [3] досліджено еволюцію розвитку ключових показників ефективності мережі п'ятого покоління у трьох часових масштабах впритул до 2030 року. У роботах [4–19] також частково обговорюються перспективи розвитку поколінь мереж 5G–8G. Зокрема, в роботі [4] зроблено акцент на основних етапах розвитку бездротової технології 5G/6G з точки зору технологій, ключових показників ефективності та застосувань. Перспективним напрямком розвитку функціонування мереж зв'язку шостого покоління є масштабування характерних розмірів антен від мікро- до нанорозмірів, що необхідно для збільшення робочої частоти [5]. Це дозволило би створити широко-смугові фільтри для стільникових радіостанцій, втрати яких були б дуже малими порівняно з існуючими аналогами в станціях для мереж 5G і попередніх поколінь. Класифікацію мереж шостого покоління, а також відмінності між мережами п'ятого та шостого поколінь наведено в роботі [6]. Приклади застосування мереж 6G у технологіях інтернет-речей показано в [7]. Сучасний рівень розвитку систем зв'язку припу-

скає безперервний моніторинг стану здоров'я населення в сільських місцевостях [8], безпеки в автоматизованих системах взаємопов'язаних пристроїв керування та машинного навчання [9], керування багатоцільовими безпілотними літальними апаратами [10], створення нових розподілених баз даних у вигляді неперервної послідовності блоків (так званий блокчейн) [11] та багато інших цільових речей, функціонування яких неможливо уявити без використання бездротових технологій 5G/6G. З тематики створення нових дешевих каналів високошвидкісного зв'язку та впровадження технологій 5G/6G проводяться численні конференції фахівців у галузі електротехніки та зв'язку (див., наприклад, [12]). У згаданих тезах доповідей обговорюються перспективні питання покращення інфраструктури міста за допомогою бездротових мереж, вирішення питання моніторингу каналів зв'язку для виявлення можливих джерел перебоїв, статистичної оцінки ймовірності відключення наземної ретрансляції супутникових систем та доплерівського розширення за частотою розкидів у мережах гігагерцового діапазону.

Застосування мереж 6G сьогодні проникає в усе більшу кількість галузей. Одним із яскравих прикладів є використання бездротового зв'язку для моніторингу інфраструктури на залізниці при проектуванні розумних систем комунікацій між залізничною станцією та її компонентами [13], при розробці систем машинного навчання [14], створенні нових типів терагерцових пристроїв для передачі інформації високої якості [15].

Роботу [16] присвячено опису архітектури базової мережі 6G як комплексного механізму, що здатний динамічно адаптуватися до умов навколишнього середовища та потреб людства; запропоновано механізм розвитку для інтелектуальних мереж ядра 6G для автоматичного створення розподілених базових мереж. Порівняльну характеристику параметрів мереж і перспективи динаміки розвитку бездротового зв'язку наведено в роботі [17]. Там же описано технологічні та архітектурні виклики, зроблено акцент на можливих перевагах мереж 6G/7G. Нові технології передачі радіосигналу оптоволоконним кабелем з використанням мережевих технологій 7G описані автором [18]. У роботі [19] наведено переваги та особливості впровадження мережі 7G у

різних галузях науки та техніки. Роботу [20] присвячено очікуваним перспективам застосування технологій 7 і 7.5G за поточних темпів технічного прогресу. У роботі [20] покоління 6G пропонується використовувати для інтеграції мереж 5G із супутниковими мережами для забезпечення глобального покриття. В основу 7G буде покладено космічний роумінг. Авторами [20] обговорюється можливість еволюції бездротових мереж покоління впритул до 7.5G.

Перспективні технології розвитку бездротового зв'язку описано в монографії [21]. Колектив авторів пропонує розглядати нові стандарти бездротового зв'язку із використанням основ так званих конфігурацій інтелектуальних метаповерхонь (англ. Reconfigurable Intelligent Surface, RIS). У наступних розділах демонструється застосування основ RIS для проектування великомасштабних і дрібних моделей каналів зв'язку. Перевагою такого підходу є реалізація інтелектуальних систем для вибору оптимальної системної моделі й архітектури.

У роботі [22] описано всебічне бачення покоління 6G, технічні вимоги та сценарії застосування. Також представлена критична оцінка архітектури мережі та ключових технологій. Детально описано випробувальні стенди для перевірки можливостей 6G. Визначено майбутні напрямки досліджень, сформульовано існуючі проблеми.

На сьогодні у фахівців немає єдиної точки зору на подальшу еволюцію мереж стільникового зв'язку. Одні вважають, що 6G буде останнім поколінням. Інші думають, що розвиток бездро-

тового зв'язку буде йти прискореними темпами. Дехто розглядає покоління 7 і 8G як лише деяке покращення 6G. У цій роботі автори виклали власний погляд на проблему FG (Future Generation) мереж бездротового зв'язку.

Мета роботи — побудова простих математичних моделей, що прогнозують темпи зростання можливостей мереж бездротового (стільникового) зв'язку на найближчі 20–25 років.

1. Загальна характеристика поколінь бездротового зв'язку

Покоління мереж бездротового зв'язку прийнято позначати 1, 2G... Літера G означає англійське слово generation, тобто «покоління». Іноді вважають, що покоління 0G з'явилося ще в 1942 році у вигляді найпростішого радіосигналу. Це була достільникова технологія.

Технологія 1G з'явилася в 1979 році (табл. 1). Вона дозволяла обмінюватися лише голосовими повідомленнями. Сигнали у системі були аналоговими. Було відсутнє шифрування. Значними були вага та вартість терміналу. Не було методів боротьби з завадами сигналу. Мали місце складнощі з організацією роумінгу.

Починаючи з 2G, технології стали цифровими. Технологія 2G мала значно більшу ємність мережі та швидкість передачі (~100 кбіт/с), проводилося шифрування інформації, була досягнута більша стійкість до завад, з'явилася можливість обміну даними, був уведений в дію роумінг. Термінали стали більш легкими. Мобільний зв'язок став конкурувати з дротовим.

Таблиця 1. Усереднені значення основних параметрів мереж бездротового зв'язку для різних поколінь

Покоління	Рік упровадження	Швидкість передачі C, кбіт/с	Час затримки, с	Тривалість скачування * T, с	Діапазон частот	Смуга частот
1G	1979	2	7.9	$5 \cdot 10^5$	0.12...0.9 ГГц	~10 кГц
2G	1991	100	0.5	10^4	0.9...1.8 ГГц	~100 кГц
3G	1998	$(7...42) \cdot 10^3$	0.1	125	0.9...1.8 ГГц	~1 МГц
4G	2008	$(0.3...1.0) \cdot 10^6$	10^{-2}	6.7	0.8...6 ГГц	~0.01...0.1 ГГц
5G	2018	$(10...15) \cdot 10^6$	10^{-3}	0.1	Гігагерцовий (міліметровий) (20...300 ГГц)	~0.1...40 ГГц
6G	2030	$\sim 1 \cdot 10^9$	10^{-6}	10^{-3}	Терагерцовий (0.1...500 ТГц)	~0.1 ТГц

* Для обсягу інформації $\Delta I = 1$ Гбіт

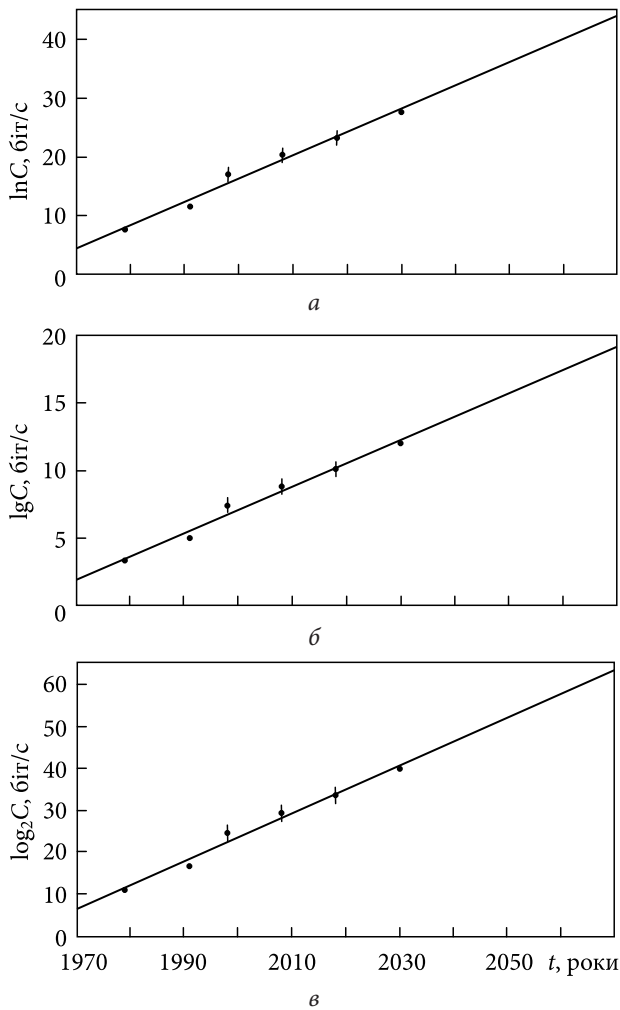


Рис. 1. Залежність пропускної здатності від часу (кількості років, починаючи від 1970 р.). Апроксимація лінійною регресією: $a - \ln C = 0.3977t + 4.3609$, $R^2 = 0.9822$, $\sigma = 1.1090$ біт/с; $b - \lg C = 0.1727t + 1.8939$, $R^2 = 0.9822$, $\sigma = 0.4816$ біт/с; $v - \log_2 C = 0.5738t + 6.2914$, $R^2 = 0.9822$, $\sigma = 1.5999$ біт/с. Рисками показано межі варіацій пропускної здатності

Технологія 3G мала більшу стійкість до завад, значно більшу (десятки мегабіт на секунду) швидкість передачі, значно менший час затримки, порівняно низьке енергоспоживання. Технологія використовувала множинний доступ з кодовим розділенням каналів (CDMA).

Системи зв'язку 4G використовують технологію LTE (Long-Term Evolution, тобто довготривалий розвиток). Технологія 4G базується на інтернет-протоколі (IP — Internet Protocol). Зросла на порядок швидкість передачі інформації (до 1 Гбіт/с). На порядки зменшився час затримки. Була досягнута висока якість голосового зв'язку,

зросла швидкість обміну інформацією для мобільних абонентів.

Технологія 5G забезпечує швидкість передачі інформації від ~1 до 10 Гбіт/с, тобто має значно більші можливості, ніж у технології 4G. На цей час 4 та 5G існують паралельно.

Перехід до технології 6G розпочався приблизно у 2020 році. Існує нагальна необхідність подолання великої кількості науково-технічних проблем. Глобальне покриття буде забезпечуватися з використанням супутників.

Головне призначення технології 7G — космічний роумінг.

2. Найпростіша модель еволюції стільникового зв'язку

Головним параметром будь-якої системи зв'язку є швидкість передачі інформації (пропускна здатність системи). Саме для цього параметра у даній роботі запропонована низка моделей.

З використанням даних із табл. 1 побудовані кореляційні поля (рис. 1) та знайдені рівняння регресії:

$$\ln C = 0.3977t + 4.3609, R^2 = 0.9822, \sigma = 1.1090 \text{ біт/с.} \quad (1)$$

Тут t — час у роках, відраховується від 1970 року; C — швидкість передачі інформації, біт/с; R^2 — коефіцієнт достовірності; σ — середнє квадратичне відхилення апроксимації.

Для десятичного логарифма залежність має такий вигляд:

$$\lg C = 0.1727t + 1.8939, R^2 = 0.9822, \sigma = 0.4816 \text{ біт/с.} \quad (2)$$

У теорії інформації використовується двійковий логарифм. Тоді

$$\log_2 C = 0.5738t + 6.2914, R^2 = 0.9822, \sigma = 1.5999 \text{ біт/с.} \quad (3)$$

Із (1)–(3) випливає, що швидкість передачі інформації (пропускна здатність системи) зростає в 10, e та 2 рази за час τ_0 , що дорівнює 5.79, 2.51 та 1.74 року відповідно. Час $\tau_0 = 1.74$ року близький до часу подвоєння числа мікроелектронних виробів у одиниці об'єму мікросхеми. Ця закономірність відома як закон Мура [23, 24].

Із співвідношень (1)–(3) випливає, що $C = 1$ кбіт/с за термін $t_0 \approx 6.4$ року. У 1970 році $C_0 =$

=78 біт/с. Тоді

$$C(t) = C_0 e^{t/\tau} \quad (4)$$

або за $\tau = \tau_0 = 2.51$ року

$$C(t) = 78 e^{t/2.51}. \quad (4a)$$

За даними найпростішої моделі (4a) обчислено $C(t)$ (табл. 2).

Із табл. 2 можна бачити, що за 5 років швидкість передачі інформації зростає більше, ніж у 7 разів. Якщо, згідно з моделлю (4a), у 2030 році має з'явитися покоління 6G, то в 2035 та 2040 роках слід очікувати поколінь 7 і 8G.

За обсягу інформації ΔI радіоелектронного пристрою маємо тривалість T передачі (час завантаження) інформації:

$$T(t) = \frac{\Delta I}{C(t)} = \frac{\Delta I}{C_0} e^{-t/\tau}. \quad (5)$$

Наприклад, за умови $\Delta I = 1$ Гбіт отримаємо значення T , наведені у табл. 2. Видно, що T зменшується від 3.9 мс до 0.2 мкс.

Неважко помітити, що співвідношення (4) є розв'язком диференціального рівняння

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C}{\tau}, \quad C(0) = C_0. \quad (6)$$

Рівняння (4) та (6) описують еволюцію як процес із класичною (експоненціальною) нестійкістю.

3. Модель прискореної еволюції

Деякі фахівці вважають, що перехід від 5G відбуватиметься прискореними темпами [2, 19, 20].

Математично це означає, що у рівнянні (6) характерний масштаб τ зменшується з часом.

У загальному випадку розв'язок (6) за умови $\tau = \tau(t)$ має вигляд:

$$C(t) = C_0 e^{J(t)}, \quad (7)$$

де

$$J(t) = \int_{t_1}^t \frac{dt}{\tau(t)}. \quad (8)$$

Тут t_1 — момент часу, починаючи з якого масштаб τ починає зменшуватися. Далі розглянемо два ймовірних варіанти залежності масштабу τ від часу t . Перший із них має вигляд:

$$\tau(t) = \begin{cases} \tau_0, & \Delta t = t - t_1 < 0, \\ \tau_0 \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_1}\right), & \Delta t \geq 0. \end{cases} \quad (9)$$

Тут τ_1 — характерний час зміни функції $\tau(t)$. Тоді

$$J(t) = -\frac{\tau_1}{\tau_0} \ln \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau_1}\right),$$

$$C(t) = \frac{C(t_1)}{(1 - \Delta t / \tau_1)^{\tau_1/\tau_0}}, \quad (10)$$

де $C(t_1) = 34.9$ Гбіт/с. Співвідношення (10) описує еволюцію з вибуховою нестійкістю. «Вибух» повинен статися за умови $\Delta t_{\text{exp}} = \tau_1$ або $t_{\text{exp}} = t_1 + \tau_1$. Для оцінок будемо вважати, що $t_1 = 2020$ рік, $\tau_0 = 2.51$ року, $\tau_1 = 20$ років. За 10 років, згідно з (9), $\tau(t)$ зменшиться вдвічі. Результати обчислень $C(t)$ та $\tau(t)$ для $t \geq t_1$ наведено у табл. 3.

Таблиця 2. Залежність швидкості C та тривалості T передачі інформації від часу для класичної нестійкості (обсяг інформації $\Delta I = 1$ Гбіт)

Параметр мережі	Рік					
	2025	2030	2035	2040	2045	2050
C , Тбіт/с	0.256	1.878	13.76	100.9	740	5422
T , мкс	3904	533	72.6	9.9	1.35	0.18

Таблиця 3. Залежність швидкості C та тривалості T передачі інформації від часу для вибухової нестійкості ($\Delta I = 1$ Гбіт)

Параметр мережі	Рік								
	2020	2025	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2040
C , Тбіт/с	$3.49 \cdot 10^{-2}$	0.34	8.74	20.2	51.7	150	512	2190	∞
T , мкс	$2.87 \cdot 10^4$	$2.93 \cdot 10^3$	114	49.5	19.3	6.67	1.95	0.46	—

Із табл. 3 видно, що за вказаних параметрів «вибух» має настати в 2040 році. Звичайно, цього не буде. Прискорена еволюція моделі стільникового зв'язку, безумовно, загальмується через низку об'єктивних причин, які обговорюються далі.

Розглянемо другий варіант залежності $\tau(t)$. Вважаємо, що

$$\tau(t) = \begin{cases} \tau_0, & \Delta t < 0, \\ \tau_0 e^{-\Delta t/\tau_1}, & \Delta t \geq 0. \end{cases}$$

Тоді

$$J(t) = \frac{\tau_1}{\tau_0} (e^{\Delta t/\tau_1} - 1),$$

$$C(t) = C(t_1) \exp \left[\frac{\tau_1}{\tau_0} (e^{\Delta t/\tau_1} - 1) \right]. \quad (11)$$

Покладемо, що $t_1 = 2020$ рік, $\tau_0 = 2.51$ року, $\tau_1 = 10$ років (за цей час параметр τ зменшиться в e разів). Результати обчислень за співвідношенням (11) наведено в табл. 4.

Із табл. 4 можна бачити, що приблизно після 2033 року темпи еволюції, що описуються моделлю (11), стають неможливими.

4. Модель сповільненої еволюції

Нехай характерний масштаб τ , що описує швидкість еволюції, тепер зростає з часом за законом:

$$\tau(t) = \begin{cases} \tau_0, & \Delta t < 0, \\ \tau_0 \left(1 + \frac{\Delta t}{\tau_1} \right), & \Delta t \geq 0. \end{cases}$$

При цьому

$$C(t) = C(t_1) \left(1 + \frac{\Delta t}{\tau_1} \right)^{\tau_1/\tau_0}. \quad (12)$$

Оцінки виконано для $t_1 = 2020$ рік, $C(t_1) = 3.49 \cdot 10^{10}$ біт/с, $\tau_1 = 20$ років та $\tau_0 = 2.51$ роки. Результати обчислень за співвідношенням (12) наведено у табл. 5.

Модель (12), як і раніше, описує нестійкість еволюції, хоча темпи зростання суттєво зменшилися.

Якщо часову залежність характерного масштабу τ взяти такою:

$$\tau(t) = \begin{cases} \tau_0, & \Delta t < 0, \\ \tau_0 e^{\Delta t/\tau_1}, & \Delta t \geq 0 \end{cases}$$

Таблиця 4. Залежність швидкості C та тривалості T передачі інформації від часу для прискореної еволюції ($\Delta I = 1$ Гбіт)

Параметр мережі	Рік						
	2020	2025	2027	2030	2032	2035	2040
C , Тбіт/с	$3.49 \cdot 10^{-2}$	0.46	1.98	32.8	$3.61 \cdot 10^2$	$3.69 \cdot 10^4$	$3.96 \cdot 10^9$
T , мкс	$2.87 \cdot 10^4$	$2.16 \cdot 10^3$	505	30.5	2.77	$2.71 \cdot 10^{-2}$	$2.53 \cdot 10^{-7}$

Таблиця 5. Залежність швидкості C та тривалості T передачі інформації від часу ($\Delta I = 1$ Гбіт), що дається співвідношенням (12)

Параметр мережі	Рік								
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
C , Тбіт/с	$3.49 \cdot 10^{-2}$	0.21	0.88	3.02	8.71	22.34	51.71	110.5	221
T , мкс	$2.87 \cdot 10^4$	$4.84 \cdot 10^3$	$1.13 \cdot 10^3$	332.6	114.4	44.77	19.37	9.05	4.52

Таблиця 6. Залежність швидкості C та тривалості T передачі інформації від часу ($\Delta I = 1$ Гбіт), що дається співвідношенням (13)

Параметр мережі	Рік							
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	∞
C , Тбіт/с	$3.49 \cdot 10^{-2}$	0.16	0.43	0.69	1.09	1.35	1.54	1.87
T , мкс	$2.87 \cdot 10^4$	$5.98 \cdot 10^3$	$2.31 \cdot 10^3$	$1.45 \cdot 10^3$	914	740	650	533

одержимо математичну модель еволюції:

$$C(t) = C(t_1) \exp \left[\frac{\tau_1}{\tau_0} (1 - e^{-\Delta t / \tau_1}) \right]. \quad (13)$$

Оцінки $C(t)$ виконано для $t_1 = 2020$ рік, $\tau_0 = 2.51$ року та $\tau_1 = 10$ років. Результати обчислень з використанням співвідношення (13) наведено у табл. 6. Дані цієї таблиці свідчать, що за умови $\Delta t \rightarrow \infty$ зростання $C(t)$ припиняється, виникає ефект насичення. При цьому $C(\infty)$ не перевищує 1.87 Тбіт/с. Це відповідає поколінню 6G. Перехід до 7, 8 та 9G теоретично можливий за τ_1 , що складає 20, 30, і 40 років. При цьому $C(\infty)$ дорівнюватиме 100 , $5.41 \cdot 10^3$ та $29.1 \cdot 10^4$ Тбіт/с, відповідно.

Особливостями розглянутих моделей є те, що характерний час еволюції $\tau(t)$ сам змінювався у часі. Причина цього не відображена в моделях еволюції. Ефект насичення виникає і з інших причин. Він може бути обумовлений факторами, що розглядаються далі у розділі «Обговорення». Математично їх можна описати моделями, в яких темп зміни швидкості передачі інформації залежить від цієї швидкості. Водночас сповільнення еволюції пов'язане зі значним зростанням швидкості передачі інформації, що було непомітним при досить невеликих значеннях C . Нехай модель еволюції має вигляд

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C}{\tau_0} - \alpha C^2, \quad C(0) = C_0, \quad (14)$$

де характерний час $\tau_0 = \text{const}$, α — розмірний коефіцієнт, що описує процес гальмування еволюції. Згідно з моделлю (14), максимальне значення для C можна подати виразом:

$$C_\infty = \frac{1}{\alpha \tau_0}.$$

Рівняння (14) зручно переписати у такому вигляді:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C}{C_\infty \tau_0} (C_\infty - C), \quad C(0) = C_0. \quad (15)$$

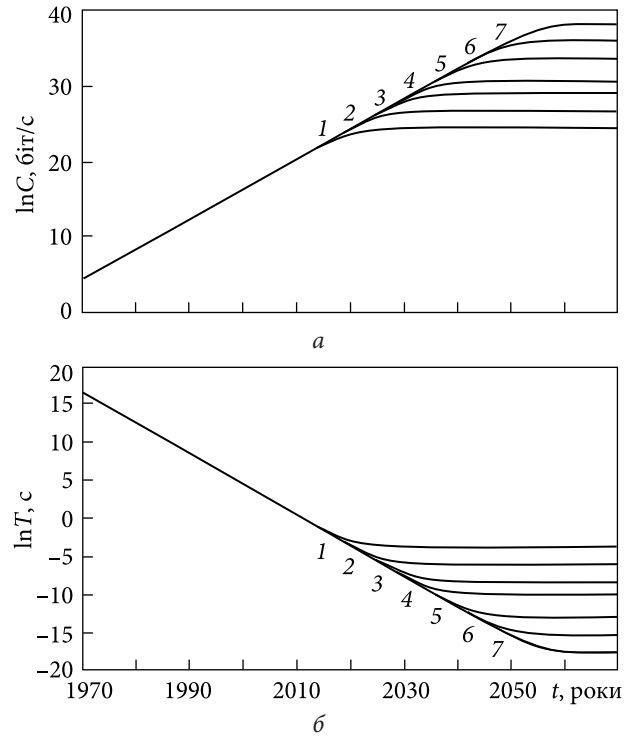


Рис. 2. Часові залежності швидкості передачі інформації, що описується співвідношенням (16), (а), та тривалості передачі інформації за $\Delta I = 1$ Гбіт (б) для деяких значень параметра сповільнення еволюції α : 1 — $10 \text{ (Тбіт} \cdot \text{рік)}^{-1} \cdot \text{с}$; 2 — $1 \text{ (Тбіт} \cdot \text{рік)}^{-1} \cdot \text{с}$; 3 — $0.1 \text{ (Тбіт} \cdot \text{рік)}^{-1} \cdot \text{с}$; 4 — $10^{-2} \text{ (Тбіт} \cdot \text{рік)}^{-1} \cdot \text{с}$; 5 — $10^{-3} \text{ (Тбіт} \cdot \text{рік)}^{-1} \cdot \text{с}$; 6 — $10^{-4} \text{ (Тбіт} \cdot \text{рік)}^{-1} \cdot \text{с}$; 7 — $10^{-5} \text{ (Тбіт} \cdot \text{рік)}^{-1} \cdot \text{с}$

Розв'язавши рівняння (15), отримаємо

$$C(t) = C_0 \frac{C_\infty}{(C_\infty - C_0)e^{-t/\tau_0} + C_0}. \quad (16)$$

Співвідношення (16) також описує нестійкість з насиченням. За умов $\alpha \rightarrow 0$ та $C_\infty \rightarrow \infty$ співвідношення (16) переходить у (4).

Залежність $C(t)$ для різних значень α наведено на рис. 2. Із рис. 2 видно, що зі зменшенням α значення C_∞ зростає. Для $\tau_0 \approx 2.51$ року значення C_∞ наведено у табл. 7. Із табл. 7 випливає, що реальні значення α для поколінь 6, 7 та 8G можуть сягати відповідно 0.4, 0.04 та 0.004 $(\text{Тбіт} \cdot \text{рік})^{-1} \cdot \text{с}$.

Таблиця 7. Залежність максимального значення швидкості C_∞ та тривалості T передачі інформації від параметра сповільнення еволюції α ($\Delta I = 1$ Гбіт)

Параметр мережі	Параметр сповільнення еволюції α , $(\text{Тбіт} \cdot \text{рік})^{-1} \cdot \text{с}$						
	10	1	0.1	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
C_∞ , Тбіт/с	$4 \cdot 10^{-2}$	0.4	4	40	400	$4 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$
T , мкс	$2.5 \cdot 10^4$	$2.5 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^2$	25	2.5	0.25	0.025

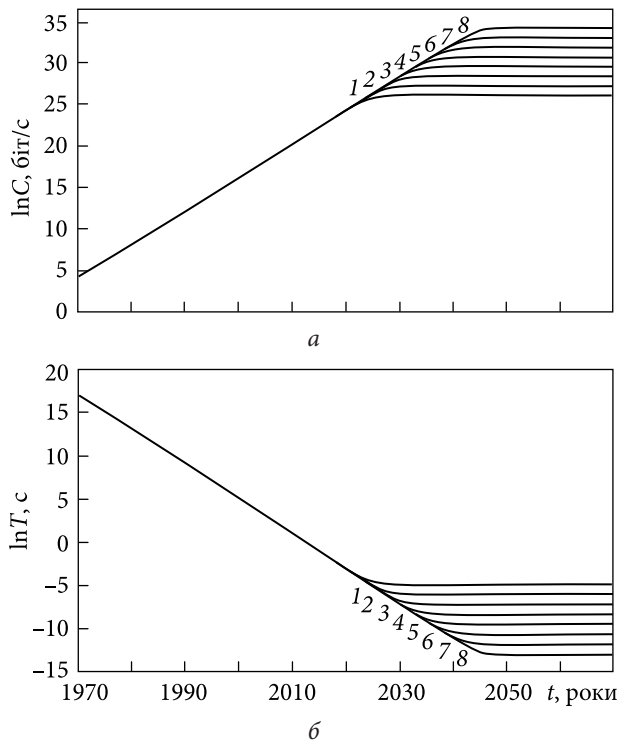


Рис. 3. Часові залежності швидкості передачі інформації, що дається співвідношенням (19), (а), та тривалості передачі інформації за умови $\Delta I = 1$ Гбіт (б) для деяких приблизних значень параметра сповільнення еволюції β : 1 – $10 \text{ Тбіт}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1} \cdot \text{с}^2$; 2 – $1 \text{ Тбіт}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1} \cdot \text{с}^2$; 3 – $0.1 \text{ Тбіт}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1} \cdot \text{с}^2$; 4 – $10^{-2} \text{ Тбіт}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1} \cdot \text{с}^2$; 5 – $10^{-3} \text{ Тбіт}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1} \cdot \text{с}^2$; 6 – $10^{-4} \text{ Тбіт}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1} \cdot \text{с}^2$; 7 – $10^{-5} \text{ Тбіт}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1} \cdot \text{с}^2$; 8 – $10^{-6} \text{ Тбіт}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1} \cdot \text{с}^2$

Якщо процес насичення йде швидше, ніж у (14), пропонується така модель:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C}{\tau_0} - \beta C^3, \quad C(0) = C_0. \quad (17)$$

де $\tau_0 = \text{const}$, β – розмірний коефіцієнт, що описує процес гальмування еволюції. Рівняння (17) має стаціонарний розв'язок:

$$C_\infty = \frac{1}{\sqrt{\beta \tau_0}}.$$

Таблиця 8. Залежність максимального значення швидкості C_∞ та тривалості T передачі інформації від параметра β ($\Delta I = 1$ Гбіт)

Параметр мережі	Параметр β , $\text{Тбіт}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1} \cdot \text{с}^2$						
	10	1	0.1	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
C_∞ , Тбіт/с	0.2	0.63	2.0	6.3	20	63	200
T , мкс	$5 \cdot 10^3$	$1.6 \cdot 10^3$	500	160	50	16	5

Тоді (17) доцільно представити у вигляді:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{C}{C_\infty^2 \tau_0} (C_\infty^2 - C^2), \quad C(0) = C_0. \quad (18)$$

Розв'язок (18) подаємо таким співвідношенням:

$$C(t) = C_0 \frac{C_\infty}{\sqrt{(C_\infty^2 - C_0^2) e^{-2t/\tau_0} + C_0^2}}. \quad (19)$$

За $\beta \rightarrow 0$ та $C_\infty \rightarrow \infty$ рівняння (19) перейде у (4).

Залежність $C(t)$ для різних значень параметра β наведено на рис. 3. Із рис. 3 можна бачити, що зменшення β супроводжується сповільненням процесу гальмування еволюції та зростання C_∞ .

Результати обчислень C_∞ для різних значень β наведено у табл. 8. Дані цієї таблиці свідчать, що покоління 6, 7 та 8G можуть з'явитися, відповідно, за значень параметра β , рівного 0.1, 10^{-3} та $10^{-5} \text{ Тбіт}^{-2} \cdot \text{рік}^{-1} \cdot \text{с}^2$.

5. Обговорення

Покладемо, що поколінням 6, 7 та 8G відповідають швидкості передачі інформації одиниці, десятки та сотні терабіт на секунду. Для найпростішої моделі ці покоління з'являться у 2030, 2035–2040 та 2040–2045 роках, відповідно. Якщо процес еволюції триватиме прискореними темпами, то для моделі (10) покоління 6, 7 та 8G зможуть настати у 2030, 2032–2033 та 2034 роках. Для моделі (11) це має статися у 2027–2028, 2030 та 2032 роках.

У випадку сповільнення еволюції для моделі (12) маємо терміни 2035–2040, 2050–2055 та 2060-ті роки. Якщо справедлива модель (13), то покоління 6G настане лише наприкінці XXI століття. Покоління 7 та 8G у рамках цієї моделі за $\tau_1 \approx 10$ років неможливі. Їхня реалізація можлива за $\tau_1 \approx 25 \dots 30$ років.

З моделями (14) та (16) справи йдуть складніше. Збільшення значень C_∞ суттєво залежить

від параметрів α і β . Для досягнення C_∞ порядку або більше 400 Тбіт/с параметр α має не перевищувати 10^{-4} Тбіт $^{-1}$ ·рік $^{-1}$ ·с, а параметр β має перебувати в межах $10^{-6} \dots 10^{-5}$ Тбіт $^{-2}$ ·рік $^{-1}$ ·с 2 . При цьому покоління 6, 7 та 8G можливі приблизно в 2030—2035, 2035—2040 та 2040—2045 роках, відповідно. Додамо, що конкретні значення параметрів α та β визначаються рівнем розвитку технологій.

Виникає принципове питання про межі зростання швидкості передачі інформації. Чи є обмеження на максимальне значення C_∞ ? Чим вони можуть бути викликані? Будемо розрізняти фундаментальні, умовно фундаментальні та науково-технічні обмеження.

Фундаментальні обмеження обумовлені загальними законами природи. Кінцеве значення швидкості світла та електромагнітних хвиль у цілому накладає обмеження на відстань поширення хвиль. Технології 6G, 7G та 8G базуватимуться на квантових обчисленнях. У квантовій теорії та квантових технологіях обмеження пов'язані з кінцевим значенням сталої Планка. До фундаментальних обмежень слід віднести і максимальну частоту $f_{\max}$ в спектрі електромагнітних хвиль, яка може використовуватися для бездротового зв'язку. Ця частота $f_{\max} \approx 1$ ПГц = 10^3 ТГц. Сигнали оптичного діапазону не можуть використовуватися у системах зв'язку з поширенням у вільному просторі через велику потужність завад у цьому діапазоні, викликаних сонячним випромінюванням, джерелами освітлення тощо. За ще більших частот виникає проблема іонізації повітря квантами електромагнітного випромінювання. Фундаментальним обмеженням є також ширина спектра терагерцового діапазону (близько 1000 ТГц). Якщо для бездротового зв'язку буде використано смугу спектра $\Delta f_{\max}$ в 100 ТГц, то, відповідно до формули Шеннона, максимальна (потенційна) швидкість передачі інформації

$$C_{\max} = \Delta f_{\max} \log_2(1 + q), \quad (20)$$

де $q = P_s/P_n$ — відношення сигнал/шум, за значень логарифма 3...10 не перевищує 300...1000 Тбіт/с. Це і є фундаментальне обмеження на величину $C_{\max}$. Це означає, що покоління 8G є останнім у бездротовому зв'язку.

До умовно фундаментальних обмежень віднесемо обмеження, які можна подолати за рахунок

радикальних нововведень. Такими нововведеннями можуть бути радіофотонні технології, використання нанотехнологій, штучного інтелекту, розробка нових видів сигналів, типів модуляції тощо. Умовно фундаментальні проблеми також пов'язані зі зростанням рівня завад у міру збільшення обсягів інформації, яка передається, рівня енергоспоживання, безпеки, щільності мережі, затримок у мережі, вартості тощо. Актуальною залишається необхідність подолання проблем, пов'язаних з конфіденційністю, нормативними питаннями, міждержавною стандартизацією, сумісністю засобів і систем, етичними міркуваннями та глобальним співробітництвом.

Поступово умовно фундаментальні обмеження переходять у науково-технічні обмеження, які в міру розвитку технологій можна буде подолати. Винятком є обмеження, які принципово можна здолати, проте процес подолання не є доцільним, оскільки певний якісний показник пристрою чи системи набуває неприйнятних значень. Наприклад, недоцільно збільшувати потужність сигналу, а отже, потужність радіопередавача для значного збільшення $C_{\max}$ (див. формулу (20)). Раціонально збільшувати $\Delta f_{\max}$.

Уже в процесі реалізації засобів покоління 6G будуть використані новітні технології, такі як Massive MIMO (Multiple-Input Multiple-Output, тобто масова технологія множинного входу, множинного виходу), IoE (Internet of Everything, тобто всеохоплюючий Інтернет) та IoT (Internet of Things, тобто Інтернет речей) та інші [22]. Зокрема, передбачається використовувати цифрові антенні решітки, технології штучного інтелекту, більш ефективні керування реальними фізичними об'єктами посередництвом цифрових команд тощо. У рамках технології 6G, а тим більш 7G та 8G, не обійтися без таксономії, тобто вчення про принципи та практику класифікації та систематизації складно організованих об'єктів і систем з ієрархічною будовою.

Є всі підстави припускати, що системи зв'язку 6G та подальші стануть інтелектуальними, тривимірними, надгустими, інтегрованими, терабітно-пентабітними, терагерцовими, тактильними, сенсорно-скануючими. Припускається, що системи будуть включати до себе повсюдно підключений інтелект, зондування навколишнього середовища, голографічну телеприсутність, до-

повнену реальність, тактильну телекомунікацію, 3D-позиціонування тощо.

6. Головні результати

З використанням усереднених даних про параметри мереж бездротового зв'язку поколінь 1G–5G та перспективного покоління 6G отримано регресії, що описують зростання швидкості та зменшення тривалості передачі інформації від часу впритул до 2050 року. Запропоновано рівняння, що описують еволюцію основних параметрів бездротового зв'язку. Показано, що з 1979 року і до цього часу зростання швидкості передачі інформації описується рівнянням класичної нестійкості. При цьому головний параметр системи зв'язку зростає за експоненціальним законом. Запропоновано моделі прискореної еволюції стільникового зв'язку майбутніх поколінь. Показано, що прискорена еволюція теоретично можлива приблизно до 2033–2034 років, до того ж вона допускає можливість існування вибухової нестійкості.

Більш реальними є запропоновані моделі сповільненої еволюції стільникового зв'язку, одна з яких описує ефект насичення, обумовлений експоненціальним зростанням характерного часу еволюції, а інша описує суттєве сповільнення зростання швидкості передачі інформації.

Запропоновано моделі FG-еволюції, що призводять до ефекту насичення, викликаного сповільненням темпів зростання швидкості передачі інформації за рахунок зростання цієї швидкості. Проаналізовано роль фундаментальних, умовно фундаментальних і науково-технічних обмежень. Обґрунтовано, що, швидше за все, покоління 8G буде останнім у еволюції бездротового зв'язку. Це покоління може з'явитися не раніше 2040–2045 років. При цьому максимальне значення швидкості передачі інформації становитиме 300...1000 Тбіт/с.

Дослідження Л.Ф. Чорногора та М.Б. Шевелева виконані за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держреєстрації 0122U001476, 0124U000461, 0124U000478).

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Laiho J., Wacker A., Novosad T., eds. *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*. 2nd ed. John Wiley & Sons, LTD, 2006. 629 p.
2. Sharma P., Sharma D., Singh, R.K. Evolution of mobile wireless communication networks (0G-8G). *Int. J. App. Eng. Res.* 2015. Vol. 10, Iss. 6. P. 14765–14778.
3. Mourad A., Yang R., Lehne P. H., de la Oliva A. Towards 6G: Evolution of Key Performance Indicators and Technology Trends. *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*. Levi, Finland, 2020. P. 1–5. DOI: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083759
4. Solyman A.A., Yahya Kh. Evolution of wireless communication networks: from 1G to 6G and future perspective. *Int. J. Electr. Comput. Eng.* 2022. Vol. 12, Iss. 4. P. 3943–3950. DOI: 10.11591/ijece.v12i4.pp3943-3950
5. Giribaldi G., Colombo L., Simeoni P., Rinaldi M. Compact and wideband nanoacoustic pass-band filters for future 5G and 6G cellular radios. *Nat. Commun.* 2024. Vol. 15. 304. DOI: 10.1038/s41467-023-44038-9
6. Sharma V., Nayanam K. Sixth Generation (6G) to the Waving Seventh (7G) Wireless Communication Visions and Standards, Challenges, Applications. *Int. J. Adv. Res. Sci. Tech.* 2024. Vol. 13, Iss. 2. P. 1248–1255. DOI: 10.62226/ijarst20241319
7. Bhatia S., Mallikarjuna B., Gautam D., Gupta U., Kumar S. and Verma S. *The Future IoT: The Current Generation 5G and Next Generation 6G and 7G Technologies*. 2023 *Int. Conf. on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies (DICCT)*. Dehradun, India, 2023. P. 212–217. DOI:10.1109/DICCT56244.2023.10110066
8. Kumar A., Gaur N., and Nanthaamornphong A. Improving the latency for 5G/B5G based smart healthcare connectivity in rural area. *Sci. Rep.* 2024. Vol. 14, Iss. 1. 6976. DOI: 10.1038/s41598-024-57641-7
9. Basha P.H., Prathyusha G., Rao D.N., Gopikrishna V., Peddi P., and Saritha V. AI-Driven Multi-Factor Authentication and Dynamic Trust Management for Securing Massive Machine Type Communication in 6G Networks. *Int. J. Intel. Sys. Appl. Eng.* 2023. Vol. 12, Iss. 1S. P. 361–374. URL: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/3422>. Date of Access: May 03, 2024
10. Yao Yu., Dong D., Cai C., Huang S., Yuan X., and Gong X. Multi-UAV-assisted Internet of Remote Things communication within satellite-aerial-terrestrial integrated network. *EURASIP J. Adv. Signal Process.* 2024. 10. DOI: 10.1186/s13634-023-01101-3
11. Lin H., Garg S., Hu J., Kaddoum G., Peng M., and Hossain M.S. A Blockchain-Based Secure Data Aggregation Strategy Using Sixth Generation Enabled Network-in-Box for Industrial Applications. *IEEE Trans. Ind. Inf.* 2021. Vol. 17, Iss. 10. P. 7204–7212. DOI: 10.1109/TII.2020.3035006
12. 2023 *IEEE 97th Vehicular Technology Conference, VTC 2023-Spring*. Proc. Florence, Italy, 20–23 June 2023.
13. Guan K., He D., Ai B., Chen Y., Han C., Peng B., Zhong Z., Kürner T. Channel Characterization and Capacity Analysis for THz Communication Enabled Smart Rail Mobility. *IEEE Trans. Vehicular Tech.* 2021. Vol. 70, Iss. 5. P. 4065–4080.

14. Yin L., Yang R., Yao Yu. Channel Sounding and Scene Classification of Indoor 6G Millimeter Wave Channel Based on Machine Learning. *Electronics*. 2021. Vol. 10, Iss. 7. 843. DOI: 10.3390/electronics10070843
15. Kumar A., Gupta M., Pitchappa P., Wang N., Szriftgiser P., Ducournau G., Singh R. Phototunable chip-scale topological photonics: 160 Gbps waveguide and demultiplexer for THz 6G communication. *Nat. Commun.* 2022. Vol. 13. 5404. DOI: 10.1038/s41467-022-32909-6
16. Liu Z., Zhang M., Zhang C., Hu Z. 6G Network Self-Evolution: Generating Core Networks. *2023 IEEE Int. Conf. Communications Workshops (ICC Workshops)*. Rome, Italy, 2023. P. 625–630. DOI: 10.1109/ICCWorkshops57953.2023.10283790
17. Vaigandla K.K., Azmi N., Podila R., Karne R.K. A Survey on Wireless Communications: 6G and 7G. *Int. J. Sci., Tech. Manag.* 2021. Vol. 2, Iss. 6. P. 2018–2025. DOI: 10.46729/ijstm.v2i6.379
18. Kanno A., Seamless Convergence between Terahertz Radios and Optical Fiber Communication Toward 7G Systems. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2023. Vol. 29, Iss. 5. 8600509. DOI: 10.1109/JSTQE.2023.3311793
19. Rao A.S., Sreeja Mole S.S., Rajeshwar Raju D.V. Beyond 5G and 6G: A Comprehensive Overview of 7G Wireless Communication Technologies. *Eur. Chem. Bull.* 2023. Vol. 12, Iss. 4. P. 9725–9739. DOI: 10.48047/ecb/2023.12.si4.875
20. Shoewu O.O., Ayangbekun Oluwafemi J. Insights into the development trends in 7G mobile wireless networks. *J. Adv. Eng. Technol.* 2020. Vol. 8, Iss. 1. 02. DOI: 10.5281/zenodo.3930583
21. Yuan Yi., Huang Yu., Luo F.-L. *Metasurfaces for Wireless Communications: Designs and Implementations*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press, 2024. 320 p. DOI: 10.1201/9781003381259
22. Wang C.-X., You X., Gao X., Zhu X., Li Z., Zhang C., Wang H., Huang Y., Chen Y., Haas H., Thompson J.S., Larsson E.G., Renzo M.D., Tong W., Zhu P., Shen X., Poor H.V., Hanzo L. On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies, and Testbeds. *IEEE Commun. Surv. Tutor.* 2023. Vol. 25, Iss. 2. P. 905–974. DOI: 10.1109/COMST.2023.3249835
23. Xiu L. *The Turn of Moore's Law from Space to Time*. Springer Singapore, 2022. XXIV. 323 p. DOI: 10.1007/978-981-16-9065-5
24. Xiu L. Time Moore: Exploiting Moore's Law From The Perspective of Time. *IEEE Solid-State Circuits Mag.* 2019. Vol. 11, Iss. 1. P. 39–55. DOI: 10.1109/mssc.2018.2882285

Стаття надійшла 04.05.2024

REFERENCES

1. Laiho, J., Wacker, A., and Novosad, T., eds., 2006. *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*. 2nd ed. John Wiley & Sons, LTD.
2. Sharma, P., Sharma, D., and Singh, R.K., 2015. Evolution of mobile wireless communication networks (0G–8G). *Int. J. App. Eng. Res.*, **10**(6), pp. 14765–14778.
3. Mourad, A., Yang, R., Lehne, P.H., and de la Oliva, A., 2020. Towards 6G: Evolution of Key Performance Indicators and Technology Trends. In: *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*. Levi, Finland, 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083759
4. Solyman, A.A., and Yahya, Kh., 2022. Evolution of wireless communication networks: from 1G to 6G and future perspective. *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, **12**(4), pp. 3943–3950. DOI: 10.11591/ijece.v12i4.pp3943-3950
5. Giribaldi, G., Colombo, L., Simeoni, P., and Rinaldi, M., 2024. Compact and wideband nanoacoustic pass-band filters for future 5G and 6G cellular radios. *Nat. Commun.*, **15**, 304. DOI: 10.1038/s41467-023-44038-9
6. Sharma, V. and Nayanam, K., 2024. Sixth Generation (6G) to the Waving Seventh (7G) Wireless Communication Visions and Standards, Challenges, Applications. *Int. J. Adv. Res. Sci. Tech.*, **13**(2), pp. 1248–1255. DOI: 10.62226/ijarst20241319
7. Bhatia, S., Mallikarjuna, B., Gautam, D., Gupta, U., Kumar, S., and Verma, S., 2023. The Future IoT: The Current Generation 5G and Next Generation 6G and 7G Technologies. In: *2023 Int. Conf. on Device Intelligence, Computing and Communication Technologies (DICCT)*. Dehradun, India, pp. 212–217. DOI: 10.1109/DICCT56244.2023.10110066
8. Kumar, A., Gaur, N., and Nanthaamornphong, A., 2024. Improving the latency for 5G/B5G based smart healthcare connectivity in rural area. *Sci. Rep.*, **14**(1), 6976. DOI: 10.1038/s41598-024-57641-7
9. Basha, P.H., Prathyusha, G., Rao, D.N., Gopikrishna, V., Peddi, P., and Saritha, V., 2023. AI-Driven Multi-Factor Authentication and Dynamic Trust Management for Securing Massive Machine Type Communication in 6G Networks. *Int. J. Intel. Sys. Appl. Eng.*, **12**(1S), pp. 361–374. Retrieved from: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/3422>. Date of Access: May 03, 2024
10. Yao, Yu., Dong, D., Cai, C., Huang, S., Yuan, X., and Gong, X., 2024. Multi-UAV-assisted Internet of Remote Things communication within satellite–aerial–terrestrial integrated network. *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, **10**. DOI: 10.1186/s13634-023-01101-3
11. Lin, H., Garg, S., Hu, J., Kaddoum, G., Peng, M., and Hossain, M.S., 2021. A Blockchain-Based Secure Data Aggregation Strategy Using Sixth Generation Enabled Network-in-Box for Industrial Applications. *IEEE Trans. Ind. Inf.*, **17**(10), pp. 7204–7212. DOI: 10.1109/TII.2020.3035006
12. *2023 IEEE 97th Vehicular Technology Conference: Proc. VTC 2023-Spring*. Florence, Italy, 20–23 June 2023.
13. Guan, K., He, D., Ai, B., Chen, Y., Han, C., Peng, B., Zhong, Z., and Kürner, T., 2021. Channel Characterization and Capacity Analysis for THz Communication Enabled Smart Rail Mobility. *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, **70**(5), pp. 4065–4080. DOI: 10.1109/TVT.2021.3071242

14. Yin, L., Yang, R., and Yao, Yu., 2021. Channel Sounding and Scene Classification of Indoor 6G Millimeter Wave Channel Based on Machine Learning. *Electronics*, **10**(7), 843. DOI: 10.3390/electronics10070843
15. Kumar, A., Gupta, M., Pitchappa, P., Wang, N., Szriftgiser, P., Ducournau, G., and Singh, R., 2022. Phototunable chip-scale topological photonics: 160 Gbps waveguide and demultiplexer for THz 6G communication. *Nat. Commun.*, **13**, 5404. DOI: 10.1038/s41467-022-32909-6
16. Liu, Z., Zhang, M., Zhang, C., and Hu, Z., 2023. 6G Network Self-Evolution: Generating Core Networks. In: *2023 IEEE Int. Conf. on Communications Workshops (ICC Workshops)*. Rome, Italy, 2023, pp. 625–630. DOI: 10.1109/ICCWorkshops57953.2023.10283790
17. Vaigandla, K.K., Azmi, N., Podila, R., and Karne, R.K., 2021. A Survey on Wireless Communications: 6G and 7G. *Int. J. Sci., Tech. Manag.*, **2**(6), pp. 2018–2025. DOI: 10.46729/ijstm.v2i6.379
18. Kanno, A., 2023. Seamless Convergence Between Terahertz Radios and Optical Fiber Communication Toward 7G Systems. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **29**(5): Terahertz Photonics, pp. 1–9, 8600509. DOI: 10.1109/JSTQE.2023.3311793
19. Rao, A.S., Sreeja Mole, S.S., and Rajeshwar Raju, D.V., 2023. Beyond 5G and 6G: A Comprehensive Overview of 7G Wireless Communication Technologies. *Eur. Chem. Bull.*, **12**(4), pp. 9725–9739. DOI: 10.48047/ecb/2023.12.si4.875
20. Shoewu, O.O., and Ayangbekun Oluwafemi, J., 2020. Insights into the development trends in 7G mobile wireless networks. *J. Adv. Eng. Technol.*, **8**(1), 02. DOI: 10.5281/zenodo.3930583
21. Yuan, Yi., Huang, Yu., and Luo, F.-L., 2024. *Metasurfaces for Wireless Communications: Designs and Implementations*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press. DOI: 10.1201/9781003381259
22. Wang, C.-X., You, X., Gao, X., Zhu, X., Li, Z., Zhang, C., Wang, H., Huang, Y., Chen, Y., Haas, H., Thompson, J.S., Larsson, E.G., Renzo, M.D., Tong, W., Zhu, P., Shen, X., Poor, H.V., Hanzo, L., 2023. On the Road to 6G: Visions, Requirements, Key Technologies, and Testbeds. *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, **25**(2), pp. 905–974. DOI: 10.1109/COMST.2023.3249835
23. Xiu, L., 2022. *The Turn of Moore's Law from Space to Time*. Springer Singapore, XXIV, 323 p. DOI: 10.1007/978-981-16-9065-5
24. Xiu, L., 2019. Time Moore: Exploiting Moore's Law From The Perspective of Time. *IEEE Solid-State Circuits Mag.*, **11**(1), pp. 39–55. DOI: 10.1109/mssc.2018.2882285

Received 04.05.2024

L.F. Chernogor, M.B. Shevelev

V.N. Karazin Kharkiv National University
4, Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

EVOLUTION OF WIRELESS (CELLULAR) COMMUNICATION NETWORKS

Subject and Purpose. One of today's challenges in contemporary radio physics is exploring the terahertz frequency range which holds immense promise for revolutionary new applications in part at the level of wireless communication systems. A substantial frequency capacity of the range theoretically permits a usable frequency band expansion to a hundred terahertz. The data transfer rate can increase by many orders of magnitude, surpassing the capabilities of current networks. An urgent research priority involves assessing the potential growth rates of wireless communication network resources. The immediate purpose of this paper is to suggest simple mathematical models developed to predict the growth rates of wireless (cellular) communication network resources over the next 20 to 25 years.

Methods and Methodology. The research problem receives analytical consideration, systems analysis, and mathematical modeling of the evolutionary pace of wireless communication in new generations.

Results. Using average data on the parameters of 1G to 5G communication networks and 6G in development, we have built regression models representative of the evolution of information transfer rates and data transmission durations until the year 2050. Equations have been derived describing the evolution of the main parameters of wireless communications. The information rate increase since 1979 is shown to obey the instability equation, wherein the main parameter of the communication system exhibits exponential growth. Models featuring accelerated evolution have been proposed along with more realistic, slowed evolution models considering the saturation effect and a substantial slowdown in the information transfer rates. The saturation effect is associated with the exponential growth of the characteristic evolution time and determined by the data rate growth slowdown, with fundamental, conditionally fundamental, and scientific-technical constraints considered. It has been substantiated that 8G is not expected sooner than 2040–2045 and will likely terminate the wireless communication evolution, with a maximum information transfer rate of 300 to 1000 Tbit/s in the terahertz range.

Conclusions. The mathematical models developed by the authors are simple and capable of predicting the growth dynamics of wireless communication network resources.

Keywords: wireless network, network evolution, data rate, delay time, information transfer duration, regression, saturation effect, fundamental constraint.