

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-27>

УДК 621.396.4

СТЕПАНОВ Михайло

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0001-6376-4268>

e-mail: 2m.stepanov@gmail.com

ЛАВРІНЕНКО Владислав

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0009-0008-4914-5805>

e-mail: Lavrinenko_@ukr.net

ЗВ'ЯЗОК ЕЛЕМЕНТІВ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ

У цій статті акцентується увага на актуальності використання сенсорних мереж, з метою моніторингу транспортних засобів, описано основні безпекові та бізнес задачі, котрі покликані вирішувати подібні системи. Виділено та описано функціональне призначення основних логічних компонентів для дистанційного моніторингу, наведено загальну структурну схему подібних систем. Основна увага приділена вибору бездротового інтерфейсу, названо існуючі популярні технології та висловлено міркування стосовно переваги використання наявних гетерогенних мереж з точки зору універсальності даного підходу. Також зазначено важливість розширення абонентської ємності у випадку використання наявної розбудованої інфраструктури. Таким чином, мета статті – розглянути актуальність використання гетерогенних стільникових мереж зв'язку, як бездротового каналу передачі даних для систем моніторингу з прицілом на мережі 5-го покоління, котрі покликані вирішити поточні обмеження у пропускній здатності, затримці та надійності у порівнянні з попереднім. Приділяється увага категоріям, параметрам та можливим сценаріям розгортання мереж п'ятого покоління у випадку самостійної та несамостійної архітектури, для котрої наводиться схема. Висновки статті ґрунтуються на проаналізованих матеріалах про гнучкість, функціональність мереж 5G та теоретично розрахованому сценарію з попередньо визначеними умовами для відрізка траси, оточеної середньовисотною забудовою з певною густиною населення, з метою забезпечення заданою гарантованою швидкістю абонентів сенсорної мережі.

Ключові слова: моніторинг, сенсори, транспорт, стільникові мережі, гетерогенні мережі, LTE, IoT, 5G.

STEPANOV Mikhailo, LAVRINENKO Vladyslav

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

COMMUNICATION OF ELEMENTS OF THE SENSOR NETWORK OF THE MONITORING SYSTEM

This paper focuses on the relevance of using sensor networks for the purpose of monitoring vehicles and describes the main security and business problems that can be solved by such systems. The functional purpose of the general logical components for remote monitoring is highlighted and described, also a general structural diagram of similar systems is given. The primary attention is paid to the choice of a wireless interface. The existing popular technologies are named and considerations are expressed regarding the advantage of using existing heterogeneous networks from the point of view of the universality of this approach. The importance of expanding subscriber capacity in the case of using the existing developed infrastructure is also indicated. Thus, the purpose of the paper is to consider the relevance of using heterogeneous cellular communication networks as a wireless data transmission channel for monitoring systems aimed at 5th-generation networks, which are designed to solve the current limitations in bandwidth, delay, and reliability compared to the previous one. Attention is paid to the categories, parameters, and possible deployment scenarios of fifth-generation networks in the case of autonomous and non-autonomous architecture, for which a diagram is provided. The conclusions of the article are based on the analyzed materials about the flexibility and functionality of 5G networks and a theoretically calculated scenario with predefined conditions for a segment of the route surrounded by urban-low or medium rise with a specific population density, to ensure a given guaranteed speed of sensor network subscribers.

Keywords: monitoring, sensors, transport, cellular networks, heterogeneous networks, LTE, IoT, 5G.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Підвищення загальної ефективності організації управління та переведення процесу управління транспортними засобами (ТЗ) на більш високий, якісний рівень, забезпечується впровадженням сенсорних мереж, зокрема систем моніторингу, як за окремими транспортними засобами так, і за цілим флотом у випадку організацій [1].

Сучасні системи моніторингу встановлені на борт ТЗ, можуть забезпечити безперервне автоматичне вимірювання заданого переліку параметрів, що можуть певним чином характеризувати стан ТЗ, з метою діагности, прогнозування, та забезпечення своєчасного ремонту [1].

Різні виробники, як безпосередньо транспортних засобів, так і сторонні компанії, що спеціалізуються на встановленні такого типу обладнання, пропонують різні варіації таких систем, з метою вирішення цілого ряду не тільки аспектів пов'язаних з безпекою учасників дорожнього руху, але і вирішення бізнес задач, наприклад [2]:

- ефективне та цільове використання транспортного засобу, його маршрутизація;

- підвищення організації, зменшення простоїв;
- контроль за витратою матеріально-технічного забезпечення, зокрема витрати палива;
- ідентифікація, допуск та контроль стану водія;
- контроль за датчиками, відповідальних за стан ТЗ та додаткового обладнання;
- організація диспетчеризації та оперативного оповіщення, передача тривожного сигналу у випадку надзвичайної ситуації;
- за потреби, організація двонаправленого зв'язку з водієм.

Попри різноманіття пропонованих на ринку систем та програмних комплексів, до основних компонентів дистанційного моніторингу (рис 1.) можна віднести [3]:

- 1) датчики різного типу, встановлені з метою моніторингу різних параметрів, зокрема стану компонентів ТЗ, рівню рідин, швидкості тощо;
 - 2) модуль збору даних, завдання якого полягає у зчитуванні та зборі даних від різних типів датчиків з метою їх передачі модулем зв'язку;
 - 3) модуль зв'язку з бездротовою мережею, завдання якого полягає в передачі даних з транспортних засобів на сервери, що використовуються мережею бездротового зв'язку, стільниковою мережею зв'язку або навіть супутниковою зв'язку. Це дозволяє віддалено отримувати дані з транспортних засобів у реальному часі;
 - 4) сервер та програмне забезпечення, що забезпечує збір, збереження, обробку та аналіз отриманих даних, з метою генерації звітів, статистичного представлення, відображення інформації в реальному часі та формування зворотного зв'язку за потреби;
 - 5) інтерфейс користувача або мобільний додаток для взаємодії з системою моніторингу.
- Залежно від фізичної реалізації, наведені логічні компоненти можуть поєднуватися.

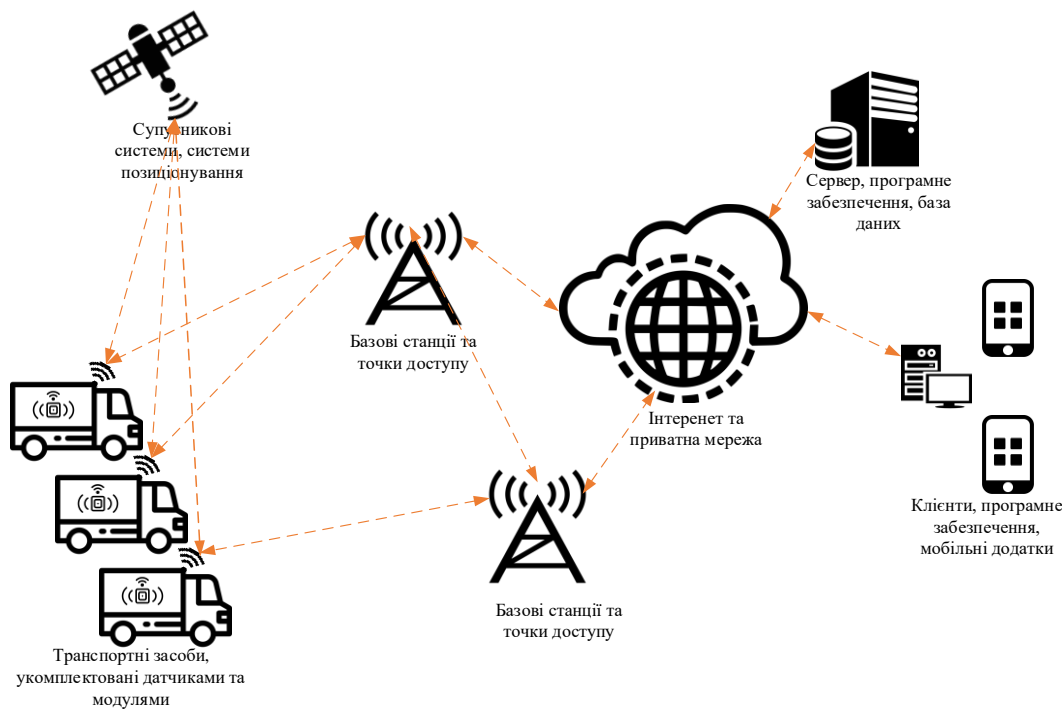


Рис. 1. Загальна структурна схема компонентів системи моніторингу транспортних засобів

Вибір бездротової технології. Під час реалізації подібних систем важливою складовою залишається вибір бездротового інтерфейсу. Вибір застосовуваних технологій залежить від того, яка пропускна здатність необхідна, діапазону передачі, частоти передачі, ліцензування. До прикладу, в одному з досліджень, де науковці ставили за мету відстежувати та контролювати швидкість туристичних човнів, щоб запобігти ерозії ґрунтів, як технічне завдання закладався діапазон відстеження в 10 км та звіт щохвилини. Було проаналізовано та порівняно деякі найбільш поширені технології, що використовуються в концепції мережі Інтернету речей, аналіз наведено в таблиці 1 [4].

Таблиця 1.

Варіанти технологій бездротового зв'язку в сфері Інтернету речей

Технологія	Діапазон передачі	Пікова швидкість передачі даних	Ліцензування/ Підписка
RFID	3 (м)	424 (кбіт/с)	Ні
Bluetooth	10 (м)	1 (Мбіт/с)	Ні
ZigBee	10 (м)	256 (кбіт/с)	Ні
WiFi	100 (м)	320 (Мбіт/с)	Ні
NB-IoT	10 (км)	204.8 (кбіт/с)	Так
LoRa	20 (км)	50 (кбіт/с)	Ні
UMTS/GSM	30 (км)	9.6 (кбіт/с)	Так
SigFox	40 (км)	100 (біт/с)	Так

Дослідники у свою чергу обрали технологію, що задовольняла їх потреби та не вимагала ліцензування частот для розгортання та використання.

Таким чином, з одного боку під кожну поставлену задачу по моніторингу необхідно використовувати індивідуальний підхід, з іншого універсальність може допомогти пришвидшити розгортання та зменшити собівартість системи в окремих випадках.

Зрозуміло, що системи моніторингу органічно мають вливатися в концепцію "розумних міст" для підвищення рівня автоматизації та покращення логістики. В основі таких процесів завжди лежить всеосяжна мережа, оскільки перш ніж речі та сенсори можуть обмінюватися даними та працювати без проблем, їм потрібна надійна мережа для функціонування. Саме тому для більшого флоту транспортних засобів та на більшій площі відстеження, вищого рівня автоматизації, універсальним підходом буде використання наявних гетерогенних мереж стільникового зв'язку, через їх досить високий відсоток зони покриття на території України (рис. 2)[5].

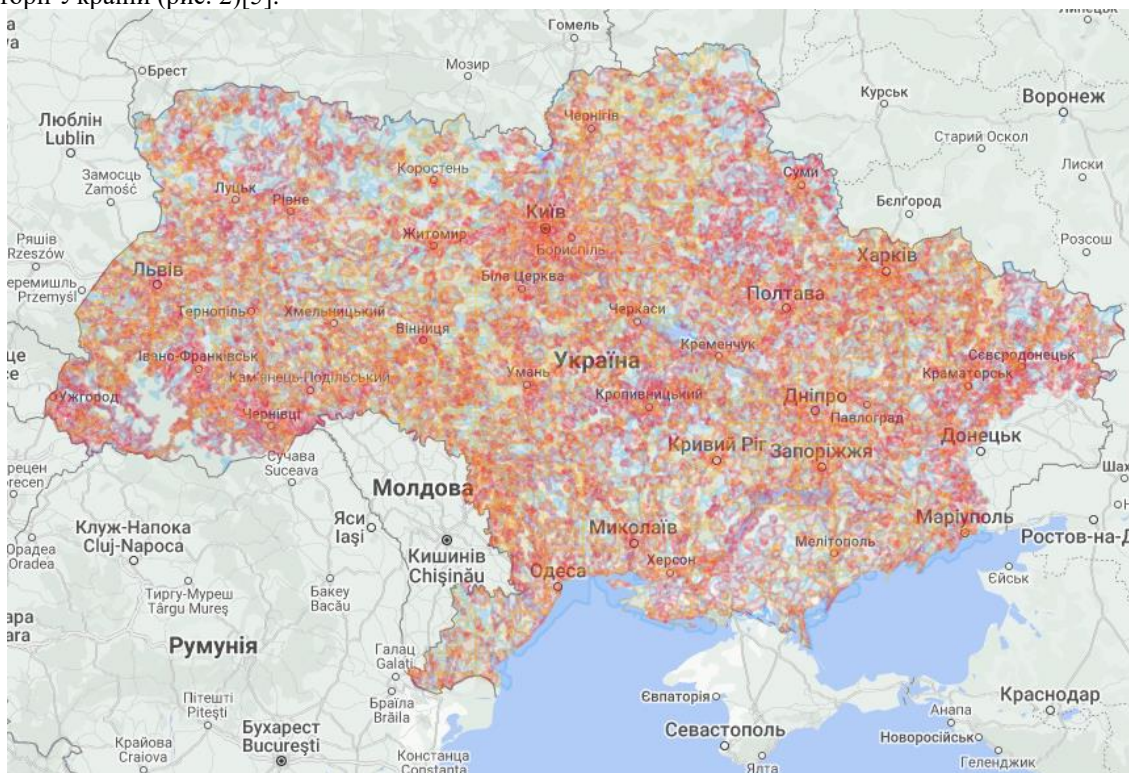


Рис. 2. Зона покриття LTE в Україні трьома найбільшими операторами стільникового зв'язку [5].

У випадку моніторингу транспортних засобів та для розбудови такої сенсорної мережі, важливим є збільшення абонентської ємності, оскільки станом на 01.01.2020 згідно публічної інформації про кількість діючих ліцензій за видами діяльності на право провадження господарської діяльності з перевезення пасажирів, небезпечних вантажів та небезпечних відходів автомобільним транспортом, міжнародні перевезення пасажирів та вантажів автомобільним транспортом, кількість таких транспортних засобів становила 142759 [6]. Таким чином, якщо оснащувати системами моніторингу таку кількість ТЗ, що постійно зростає, необхідно брати до уваги, що паралельно існують та користуються послугами мережі мільйони інших абонентів та пристроїв з світу "Інтернету речей", зокрема за підрахунками Еріксон - 1,3 мільярда пристроїв, що використовують 4G/5G [7]. Так, вже у звіті від Samsung Electronics за 2021

зазначалося, що мобільна технологія LTE, з урахуванням різноманітних послуг і вимог, які висуває сучасна індустрія мобільного зв'язку, сама по собі не здатна забезпечити необхідну пропускну здатність, затримку та надійність, з наведенням порівняння поколінь з точки зору максимальних показників (таблиця 2) [8].

Таблиця 2.

Порівняння LTE та 5G.

Показник	4G	5G
Пікова швидкість передачі даних	1 (Гбіт/с) (низхідний канал)	20 (Гбіт/с)(низхідний канал)
Швидкість передачі даних користувача	10 (Мбіт/с)	100 (Мбіт/с)
Ефективність використання спектру	-	X3
Пропускна здатність	0.1 (Мбіт/М ²)	10 (Мбіт/М ²)
Затримка	10 (мс)	1,000,000/КМ ²
Щільність підключення	100,000/КМ ²	1,000,000/КМ ²
Енергоефективність мережі	-	X100
Мобільність	350 (км/год)	500 (км/год)
Смуга пропускання частот	Аж до 20 (МГц)	Аж до 1 (ГГц)

Отже, щоб запобігти перевантаженню та забезпечити необхідну ємність, можна покращувати мережу радіо доступу, зокрема рухатися в бік технологій 5-го покоління, а саме 5G New Radio, котрі пропонують різні сценарії розгортання, доступу до сервісу, надійний зв'язок з низькою затримкою та енергоефективність. Інновації, що привносить 5G, окреслено в трьох широких категоріях: вдосконалений мобільний широкопasmовий зв'язок (eMBB), масовий зв'язок машинного типу (mMTC), ультранадійний зв'язок із низькою затримкою (URLLC) (рис. 3)[9].

Передбачається, що eMBB має відповідати певним вимогам, в залежності від середовища розгортання, покриття та мобільності абонента. Зокрема, для моніторингу транспортних засобів, важлива можливість забезпечувати послуги зв'язку для високомобільних абонентів, тобто відслідковуваних ТЗ, як в умовах щільної міської забудови, так і в умовах сільської місцевості (таблиця 3)[10].

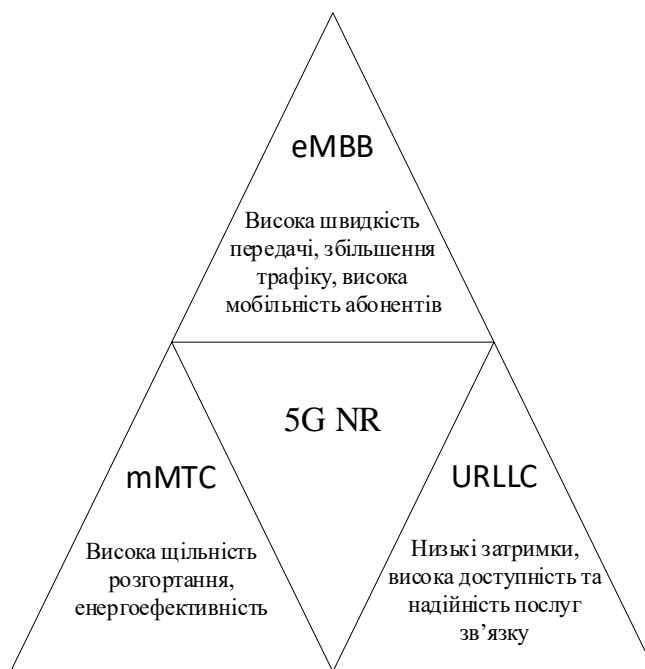


Рис. 3. Сценарії використання 5G.

Таблиця 3.

Вимоги до ефективності для різних сценаріїв швидкості та щільності трафіку[10]

Сценарій	Випробувана швидкість передачі даних (Низхідна лінія зв'язку)	Випробувана швидкість передачі даних (Висхідна лінія зв'язку)	Пропускна здатність ділянки (НЛЗ)	Пропускна здатність ділянки (ВЛЗ)	Загальна щільність користувачів	Фактор активності	Швидкість переміщення обладнання абонента	Покриття
Для міста	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	100 (Гбіт/с/км ²)	50 (Гбіт/с/км ²)	[10,000]/(км ²)	20 %	Пішоходи та користувачі транспортних засобів (аж до 120 км/год)	Вся мережа
Для сільської місцевості	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	1 (Гбіт/с/км ²)	500 (Мбіт/с/км ²)	[100]/(км ²)	20 %	Пішоходи та користувачі транспортних засобів (аж до 120 км/год)	Вся мережа
Щільна забудова	300 (Мбіт/с)	50 (Мбіт/с)	750 (Гбіт/с/км ²)	125 (Гбіт/с/км ²)	[25,000]/(км ²)	10 %	Пішоходи та користувачі транспортних засобів (аж до 60 км/год)	Ділова частина міста
Швидкісний потяг	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	15 (Гбіт/с/потяг)	7.5 (Гбіт/с/потяг)	[1,000]/потяг	30 %	Користувачі у потягах (аж до 500 км/год)	Вздовж залізниць
Швидкісний транспортний засіб	50 (Мбіт/с)	25 (Мбіт/с)	100 (Гбіт/с/км ²)	50 (Гбіт/с/км ²)	[4,000]/(км ²)	50 %	Користувачі в транспортних засобах (аж до 250 км/год)	Вздовж доріг

Оскільки найбільш перспективна стратегія розгортання мереж 5G загального користування полягає в збереженні операторами зв'язку існуючих мереж та максимальному перевикористанні наявної інфраструктури, в Україні варто першочергово очікувати варіанти розгортання, що будуть відноситися до архітектури, визначеної як «Non-Stand Alone» (NSA) (рис.4). [11] Оператори зможуть зберігати попередні інвестиції і наявну зону покриття мереж LTE, поступово модернізуючи мережу.

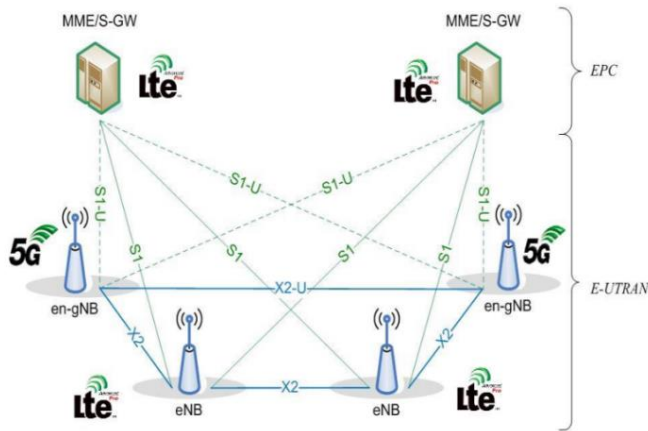


Рис. 4. NSA Архітектура (3GPP)

В залежності від умов розгортання, мережі, дослідники з Ericsson вбачають три типові сценарії використання (сільська/приміська місцевість, міська малоповерхова забудова та щільна міська висотна забудова), що ілюструють різні аспекти розгортання Massive MIMO, технології, що безпосередньо пов'язана з 5G NR (рис. 5) [12].

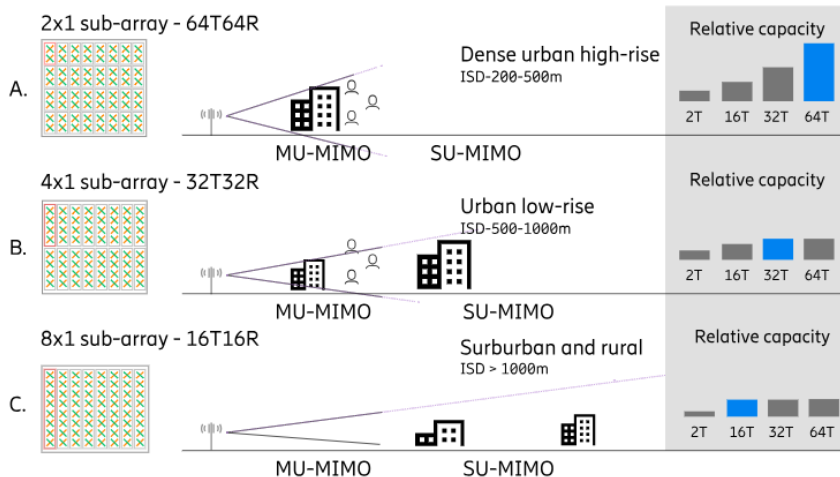


Рис. 5. Приклади сценаріїв розгортання для масивів MIMO 64T64R, 32T32R і 12T16R оприлюднені Ericsson [12]

Найбільш логічними місцями розгортання на ранніх стадіях в Україні являються ті, де поточна стільникова мережа LTE перевантажена, тобто в умовах міської забудови, зокрема щільної міської середньо- та висотної забудови.

Ключові діапазони частот, котрі заплановано використовувати під 5G в Україні, такі ж, як у Європі — 700 (МГц) і 3,4-3,8 (ГГц) [13,14], тобто належні до першого частотного діапазону FR1 відповідно до релізу 16 (таблиця 4) [15].

Таблиця 4.

Перший частотний діапазон 5G NR.

5G-NR-FR1 operational bands			
Band	Frequency [MHz]	Bandwidth [MHz]	Duplexing method
n77	3300-4200	10-100	TDD
n78	3300-3800	10-100	TDD
n79	440-5000	40-100	TDD
n80	1710-1785	5-30	SUL
n81	880-915	5-20	SUL
n82	832-862	5-20	SUL
n83	703-748	5-20	SUL
n84	1920-1980	5-20	SUL
n86	1710-1780	5-40	SUL
n90	2496-2690	10-100	TDD

Розрахунок зони покриття. Розуміючи перспективність даних технологій, можна зробити деякі припущення, спрощення, використати наявні дані для спроби теоретичного проектування зони покриття

безпроводних стільникових мереж у межах частини великої кільцевої дороги в місті Київ, котра є важливою транспортною артерією міста, на базі існуючих методичних даних для попередніх поколінь [16]. Задаймо початкові параметри, таблиця 5:

Таблиця 5.

Початкові параметри теоретичної системи

FR, МГц	F, МГц	Δf_k , МГц	M	C	$R_{аб}$, Мбіт/с	Схема MIMO, k	Тип графіку
3400-3800	400	40	3	1	50	32	Веб-графік

де, FR – діапазон частот, в якому працює система; F – смуга частот, виділена оператору за умовами ліцензії для розгортання системи стільникового зв'язку, МГц; Δf_k – смуга частот одного радіоканалу(для 5G може бути аж до 100 МГц), МГц; M – кількість секторів у стільнику; C – розмірність кластера; $R_{аб}$ – гарантована абонентська швидкість, Мбіт/с; k – коефіцієнт, що враховує застосування технології MIMO;

Тоді загальна кількість частотних каналів, виділених для розгортання мережі бездротового зв'язку (1) [16]:

$$n_k = \text{int} \left(\frac{F}{\Delta f_k} \right) = \frac{400}{40} = 10, \quad (1)$$

Кількість частотних каналів для обслуговування абонентів в одному секторі одного стільника(2) [16]:

$$n_{чк_с} = \text{int} \left(\frac{n_k}{M \cdot C} \right) = \frac{10}{3} = 3; \quad (2)$$

Кількість потенційних абонентів (3)[16]:

$$N_A = Z \cdot \mu \cdot \rho \cdot S = 0,8 \cdot 0,5 \cdot 3097 \left(\frac{\text{осіб}}{\text{км}^2} \right) \cdot 20 (\text{км}^2) = 24776 (\text{осіб}) \quad (3)$$

де Z- запланована частка ринку, μ -проникнення даного типу сервісу [16], ρ -щільність населення в даному регіоні [17], S- площа території на котрій планується розгортання системи, визначмо ділянку вздовж відрізка дороги в 10 км, та зону шириною в 2 км, з переважно низько- та середньовисотною забудовою вздовж траси.

Пропускна здатність базової станції в секторі R (5) [16]:

$$m = k \cdot \log_2 M = 32 \cdot \log_2 256 = 256 \quad (4)$$

$$R = \frac{n_{чк_с} \cdot N_{рб} \cdot n_{пн} \cdot N_{сим}^{рб} \cdot V_{сц} \cdot m}{T_{рб}} = \frac{3 \cdot 275 \cdot 12 \cdot 4 \cdot 1/3 \cdot 256}{1 \cdot 10^{-3}} = 3379,2 \left(\frac{\text{Мбіт}}{\text{с}} \right) = 3379 \left(\frac{\text{Мбіт}}{\text{с}} \right) \quad (5)$$

де, $N_{рб}$ –кількість ресурсних блоків у виділеній смузі частот радіоканалу, в даному випадку аж до 275 [15], $n_{пн}$ –кількість носійних частот в ресурсному блоці 12 [15], $N_{сим}^{рб}$ – кількість символів OFDM в часовому слоті [15, 16, 17], $V_{сц}$ –швидкість каналного коду, m –кількість рівнів модуляції, M –кількість можливих станів модуляції, $T_{рб}$ –тривалість часового слоту, k –коефіцієнт, що враховує застосування технології MIMO.

Кількість абонентів в стільнику $N_{аб_с}$ (6)[18]:

$$N_{аб_с} = \frac{M \cdot R}{R_{аб}} \cdot k_{ос} = \frac{3 \cdot 3379 \left(\frac{\text{Мбіт}}{\text{с}} \right)}{50 \left(\frac{\text{Мбіт}}{\text{с}} \right)} \cdot 10 = 2027 (\text{осіб}), \quad (6)$$

де, $k_{ос}$ –oversubscription ratio, коефіцієнт збільшення користувачів через конкуретність середовища [16].

Кількість базових станцій $N_{БС}$ (7) та радіус стільника $R_{ст}$ (8)[16]:

$$N_{БС} = \frac{N_A}{N_{аб_с}} = \frac{24776 (\text{осіб})}{2027 (\text{осіб})} = 12,23 = 12, \quad (7)$$

$$R_{ст} = \sqrt{\frac{2 \cdot S}{3 \sqrt{3} \cdot N_{БС}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 20 (\text{км}^2)}{3 \sqrt{3} \cdot 12}} = 0,8 (\text{км}). \quad (8)$$

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Отже, було окреслено та розглянуто важливість і перспективність систем моніторингу та задачі, що можуть бути вирішені подібними системами в області забезпечення дорожнього руху та з точки зору бізнесу, наведено загальну структурну схему. Враховуючи попередній досвід забезпечення систем моніторингу бездротовим зв'язком, котрий передбачав вибір технологій під конкретну задачу, можемо підкреслити універсальність використання наявних гетерогенних мереж, з точки зору швидкості розгортання та вже наявної зони покриття. Враховуючи розвиток концепції мереж Інтернету речей, необхідність контролю за ТЗ, при наявності інших абонентів, розуміємо необхідність руху в бік мереж 5-го

покоління. Таким чином, модернізуючи мережу в межах частини траси, обмеженої середньовисотною забудовою, з зазначеною густиною населення [19], включаючи можливу конкурентність середовища, за допомогою 12 базових станцій, з розглянутими параметрами, з радіусом стільника в **0,8(км)**, теоретично можна буде забезпечити кожного абонента гарантованою абонентською швидкістю в 50 Мбіт/с, з метою роботи сенсорної мережі, високо мобільних транзитних абонентів в межах площі 20(км²).

Література

1. І. В. Худяков, «Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів», Наукові нотатки, випуск 67, с. 141-148, 2019.
2. Системи захисту транспорту і вантажів (GPS / GPRS моніторинг, RFID маркування). ВалТек. URL: <https://valtek.com.ua/ua/system-integration/security-control-system/integrated-security-systems/protection-transport-cargo> (дата звернення: 21.07.2023)
3. Gáspár D. P., Szalay D. Z., Aradi S. Highly automated vehicle systems : навчальний посібник. BME MOGI, 2014. URL: https://www.mogi.bme.hu/TAMOP/jarmurendszerk_iranyitasa_angol/index.html (date of access: 21.07.2023)
4. Ramli, Norhafizah, Zabidi, Muhammad, Ahmad, Anuar, Musliman, Ivin. (2019). An Open Source LoRa-Based Vehicle Tracking System. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI), 7, 221-228. <https://doi.org/10.11591/ijeie.v7i2.1174>.
5. MobUA.net - зведена карта покриття всіх 4G/3G операторів. MobUA.net. URL: <https://www.mobua.net/maps/?pos=48,31,6> (дата звернення: 21.07.2023)
6. Статистичні дані по галузі автомобільного транспорту. mtu.gov.ua. URL: <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-po-galuzi-avtomobilnogo-transportu.html> (дата звернення: 21.07.2023)
7. Ericsson mobility report. SE-164 80 Stockholm, Sweden : © Ericsson, 2023. 40 p. URL: <https://www.ericsson.com/49dd9d/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2023/ericsson-mobility-report-june-2023.pdf> (date of access: 21.07.2023).
8. 5G standalone architecture. 129 Samsung-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si Gyeonggi-do, Korea : Samsung Electronics Co., Ltd., 2021. 22 p. URL: https://images.samsung.com/is/content/samsung/assets/global/business/networks/insights/white-papers/0107_5g-standalone-architecture/5G_SA_Architecture_Technical_White_Paper_Public.pdf (date of access: 21.07.2023).
9. Formal (3GPP) Definition. sharetechnote.com. URL: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Definition.html#Formal_Definition (date of access: 21.07.2023).
10. 5G; Service requirements for next generation new services and markets (3GPP TS 22.261 version 15.7.0 Release 15).
11. 3GPP TR 21.915 V15.0.0, Summary of Rel-15 Work Items, 2019.
12. Massive MIMO for 5G networks. 2023. 21 p. URL: <https://www.ericsson.com/49318c/assets/local/reports-papers/white-papers/massive-mimo-for-5g-networks.pdf> (date of access: 21.07.2023).
13. Юрасов С. Екскадрилья нових винищувачів в обмін на частоти під 5G в Україні. Або "підводні камені" на шляху до п'ятого покоління зв'язку. dev.ua. URL: <https://dev.ua/news/5g-2022-ukraine> (дата звернення: 21.07.2023).
14. Позиція Верховного суду України в постанові від 28 лютого 2023 року фактично розблокувала можливість впровадження нових радіотехнологій у смугах радіочастот 3400...3600 МГц. nkrzi.gov.ua. URL: <https://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=99&id=2607&language=uk> (дата звернення: 21.07.2023).
15. Launay F. NG-RAN and 5G-NR: 5G Radio Access Network and Radio Interface : монографія. Wiley-ISTE, 2021. 288 p p91, p27).
16. I. Pyatin, J. Boiko, O. Eromenko and L. Karpova, "Mathematical Modeling of an OFDM Communication System with Efficient Digital Signal Processing," 2023 IEEE 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 2023, pp. 170-175, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275597.
17. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko, "Signal Processing in the Synchronization System of Communication Channel with OFDM," 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 14-18, doi: 10.1109/ATIT58178.2022.10024232.
18. Проектування безпроводових стільникових мереж зв'язку [Електронний ресурс] : навчальний посібник для виконання курсової роботи з дисципліни «Телекомунікаційні безпроводові системи» для студентів усіх форм навчання за напрямом підготовки 6.050903 «Телекомунікації» / НТУУ «КПІ» ; уклад.: В. В. Пілінський, П. В. Попович, С. М. Веретюк. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,52 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 69 с. – Назва з екрана. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/21177>

19. Адміністративно-територіальний устрій Києва. uk.wikipedia.org. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Адміністративно-територіальний_устрій_Києва (дата звернення: 21.07.2023).

References

1. I. V. Khudyakov, "Database Models of the Information System for Monitoring the Technical Condition of Vehicles," Scientific Notes, Issue 67, pp. 141-148, 2019.
2. Transport and Cargo Protection Systems (GPS/GPRS Monitoring, RFID Labeling). ValTek. URL: <https://valtek.com.ua/ua/system-integration/security-control-system/integrated-security-systems/protection-transport-cargo> (accessed on 21.07.2023).
3. Gáspár D. P., Szalay D. Z., Aradi S. Highly Automated Vehicle Systems: A Tutorial. BME MOGI, 2014. URL: https://www.mogi.bme.hu/TAMOP/jarmurendszerek_iranyitasa_angol/index.html (date of access: 21.07.2023).
4. Ramli, Norhafizah, Zabidi, Muhammad, Ahmad, Anuar, Musliman, Ivin. (2019). An Open Source LoRa-Based Vehicle Tracking System. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI), 7, 221-228. <https://doi.org/10.11591/ijeel.v7i2.1174>.
5. MobUA.net - Aggregated Map of Coverage for All 4G/3G Operators. MobUA.net. URL: <https://www.mobua.net/maps/?pos=48,31,6> (accessed on 21.07.2023).
6. Statistical Data on the Automotive Transport Industry. mtu.gov.ua. URL: <https://mtu.gov.ua/content/statistichni-dani-pogaluzi-avtomobilnogo-transportu.html> (accessed on 21.07.2023).
7. Ericsson Mobility Report. SE-164 80 Stockholm, Sweden: © Ericsson, 2023. 40 p. URL: <https://www.ericsson.com/49dd9d/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2023/ericsson-mobility-report-june-2023.pdf> (date of access: 21.07.2023).
8. 5G Standalone Architecture. 129 Samsung-ro, Yeongtong-gu, Suwon-si Gyeonggi-do, Korea: Samsung Electronics Co., Ltd., 2021. 22 p. URL: https://images.samsung.com/is/content/samsung/assets/global/business/networks/insights/white-papers/0107_5g-standalone-architecture/5G_SA_Architecture_Technical_White_Paper_Public.pdf (date of access: 21.07.2023).
9. Formal (3GPP) Definition. sharetechnote.com. URL: https://www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Definition.html#Formal_Definition (date of access: 21.07.2023).
10. 5G: Service Requirements for Next Generation New Services and Markets (3GPP TS 22.261 version 15.7.0 Release 15).
11. 3GPP TR 21.915 V15.0.0, Summary of Rel-15 Work Items, 2019.
12. Massive MIMO for 5G Networks. 2023. 21 p. URL: <https://www.ericsson.com/49318c/assets/local/reports-papers/white-papers/massive-mimo-for-5g-networks.pdf> (date of access: 21.07.2023).
13. Yurasov S. Squadrons of New Fighter Jets in Exchange for 5G Frequencies in Ukraine. Or "Hidden Rocks" on the Path to the Fifth Generation of Communication. dev.ua. URL: <https://dev.ua/news/5g-2022-ukraine> (accessed on 21.07.2023).
14. Position of the Supreme Court of Ukraine in a Resolution dated February 28, 2023, Effectively Unlocking the Possibility of Introducing New Radio Technologies in the 3400-3600 MHz Frequency Bands. nkrzi.gov.ua. URL: <https://nkrzi.gov.ua/index.php?r=site/index&pg=99&id=2607&language=uk> (accessed on 21.07.2023).
15. Launay F. NG-RAN and 5G-NR: 5G Radio Access Network and Radio Interface: Monograph. Wiley-ISTE, 2021. 288 p.
16. I. Pyatin, J. Boiko, O. Eromenko and L. Karpova, "Mathematical Modeling of an OFDM Communication System with Efficient Digital Signal Processing," 2023 IEEE 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 2023, pp. 170-175, doi: 10.1109/ACIT58437.2023.10275597.
17. J. Boiko, I. Pyatin and O. Eromenko, "Signal Processing in the Synchronization System of Communication Channel with OFDM," 2022 IEEE 4th International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), Kyiv, Ukraine, 2022, pp. 14-18, doi: 10.1109/ATIT58178.2022.10024232.
18. Design of Wireless Cellular Communication Networks: A Tutorial for Performing Coursework in the Discipline "Wireless Telecommunication Systems" for Students of All Forms of Training in the Direction of 6.050903 "Telecommunications" / NTUU "KPI"; compilers: V. V. Pilinsky, P. V. Popovich, S. M. Veretyuk. – Electronic Text Data (1 file: 1.52 MB). – Kyiv: NTUU "KPI," 2014. – 69 p. – Title from the screen. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/21177>.
19. Administrative-Territorial Structure of Kyiv. uk.wikipedia.org. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Адміністративно-територіальний_устрій_Києва (accessed on 21.07.2023).