

УДК 576.3 (045)

Л. В. Сібрук, д.т.н., **О. М. Ключко**, к.б.н., **Н. С. Фоменко**, **Б. Д. Москаленко**

ДНП Державний університет «Київський авіаційний інститут», м. Київ

СТАНДАРТИЗАЦІЯ НАЛАГОДЖЕННЯ СУЧАСНОГО МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ У МЕРЕЖАХ УСТАНОВ ПРИРОДООХОРОННОЇ ТА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ДІЯЛЬНОСТІ УКРАЇНИ: 3G, 4G

В Україні базові станції 3G / 4G Інтернету зазвичай розташовані у райцентрах, населення у віддалених селах не має доступу до швидкісного інтернету. Це впливає на організацію, роботу мереж біостанцій, наукових баз у заповідниках, заказниках, фермерських господарствах.

Зроблено огляд технології та принципу побудови широкосмугового бездротового зв'язку 3G; розглянуто радіоінтерфейс у мережах 3G. Розглянуто проблеми, пов'язані із вихідною потужністю базової станції та спектром випромінювання її передавача; послуги, що надаються у 3G.

Зроблено огляд технології та принципу побудови широкосмугового бездротового зв'язку 4G технології. Розказано про перехід до 4G, LTE мережі, принципи їх побудови й функціонування; розглянуто функції MME. Рекомендовано алгоритм налагодження зв'язку, розказано про особливості підбору антени для 3G і 4G LTE мереж. Отже, стаття є керівництвом для тих, хто хоче організувати високоякісний зв'язок у віддалених локаціях у сільському господарстві й природоохоронних галузях.

Ключові слова: *аналіз та моделювання, MIMO, SISO, хвильовий канал, TDD, UMTS, FDD, LTE*

L. V. Sibruk, DrSc, **O. M. Klyuchko**, PhD, **N. S. Fomenko**, **B. D. Moskalenko**

SETTING UP OF MODERN MOBILE COMMUNICATION IN THE NETWORKS OF AGRICULTURAL AND NATURE PROTECTION INSTITUTIONS IN UKRAINE: STANDARDS 3G, 4G

In Ukraine, 3G / 4G Internet base stations are usually located in district centers, the population in remote villages does not have access to high-speed Internet. This affects the organization and operation of networks of biostations, scientific bases in reserves, sanctuaries, and farms.

The technology and principle of building 3G broadband wireless communication are reviewed; the radio interface in 3G networks is considered. The problems associated with the output power of the base station and the radiation spectrum of its transmitter are considered; services provided in 3G. The technology and principle of building 4G broadband wireless communication are reviewed.

The transition to 4G, LTE networks, the principles of their construction and operation are discussed; the functions of MME are considered. The communication setup algorithm is recommended, the features of antenna selection for 3G and 4G LTE networks are discussed.

A conclusion was made regarding the selection of antennas for use in rural areas, in country houses, bases of reserves and sanctuaries, farm centers, production or warehouse premises in agriculture, located outside cities at a considerable distance from the transmitting stations of cellular operators. It was established that in such locations antennas of higher gain should be used - from 15 to 24 dBi. Such antennas have narrower directional patterns, but allow to amplify the signal and improve the speed of mobile Internet at long distances, especially the latest modifications of the "Wave Channel" MIMO antennas. In addition, in conditions of rugged terrain and poor conditions of signal reception and transmission, it is possible to receive the Internet using a MIMO antenna of the 900 MHz band, as a last option with a low data transfer rate.

An algorithm for organizing mobile communications for information exchange in networks of environmental protection and agricultural institutions is proposed.

This connection setup algorithm has been successfully tested by the authors and can actually be implemented in practice. However, when setting up such a service in our conditions, it is recommended to do so with the help and participation of specialists.

Keywords: *analysis and modeling of panel and wave channel antennas, MIMO, SISO, wave channel, TDD, UMTS, FDD, LTE*

DOI 10.32684/2412-5288-2025-2-27-7-18

Вступ

Сучасна ситуація в Україні вимагає інтенсивного розвитку, модифікації та швидкої модернізації практично всіх галузей економіки, сільськогосподарства. Більше того, в умовах сучасної війни в Україні проведення таких заходів може бути життєво необхідним. У наші дні ряд галузей, пов'язаних із екологічною безпекою, природоохоронною діяльністю, сільським господарством України потребують забезпечення послугами надійного сучасного мобільного зв'язку. Найбільш надійний, доступний населенню та апробований варіант його здійснюють натеper згідно 3G, 4G технологій [1–4]; для практичного виконання функцій у вищезазначених галузях наразі це хороший варіант. У наших попередніх роботах ми частково й коротко вже описували власний досвід впровадження таких технологій [5–7]. Зазначені галузі характеризуються великим розосередженням своїх робочих установ по території країни, більша їх частина знаходиться у віддалених сільських місцевостях. Це й великі посівні площі, які необхідно обробляти, рибні господарства та численні інші фермерські господарства, пункти моніторингу стану довкілля, наукові бази на заповідних територіях, лісові господарства тощо – часто вони об'єднані у функціональні мережі. Й усі вони потребують надійного зв'язку для нормального забезпечення свого функціонування. Маючи достатній досвід розробки інформаційних систем для мереж біостанцій [5–9], ми бачимо необхідність надати установам цих галузей наразі гарні комунікаційні можливості, за потреби – телекомунікаційні, що ми вже демонстрували раніше [5–8]. У основу запропонованих нами методів та комплексів виконаних робіт покладено 3G, 4G технології сучасного мобільного зв'язку, теорія та практична реалізація яких описані у [1–4], та надалі у [9–14]. Один із авторів цієї публікації – інженер у галузі електроніки Н. Фоменко має досвід вирішення задач створення надійного мобільного зв'язку у сільській місцевості України; його практичний досвід та теоретичні знання іншого автора – доц. Ключко О.М. покладені у основу цієї публікації. Попередні результати цих робіт вже були коротко опубліковані у [5–7]. Дана стаття є найбільш повною узагальнюючою публікацією на цю тему – фактично, вона містить алгоритм практичного налагодження сучасного мобільного зв'язку за 3G та 4G технологіями (див. нижче), та певний набір необхідних для цього теоретичних знань.

Відмітимо, що 3G та 4G технології мобільного зв'язку наразі не вважаються найновішими та забезпечуються системами, які вже достатньо освоєні, потребують обладнання, якого достат-

ньо на ринку та має порівняно помірні ціни. Зв'язок четвертого покоління 4G LTE в Україні діє досить давно. За цей час оператори значно розширили зону покриття своїх мереж LTE і тепер доступна не тільки жителям великих міст, але й невеликих населених пунктів, що знаходяться в сільській місцевості. Незважаючи на те, що покриття постійно розширюються і покращуються, у багатьох користувачів як великих міст, так і віддалених населених пунктів спостерігаються проблеми зі зв'язком і часто виникає потреба у посиленні слабкого сигналу та встановлення зовнішньої антени. У містах це може відбуватися через щільну міську забудову або конструкцію приміщення та матеріали, з яких воно виготовлено. Для сільської місцевості це може бути наслідком значного віддалення багатьох населених пунктів від базових станцій (далі – БС) операторів зв'язку, наявності різноманітних перешкод у вигляді густих високих лісопосадок, рельєфу місцевості тощо, які заважають поширенню. Однак за допомогою додаткової зовнішньої антени можна в рази підсилити слабкий сигнал та збільшити швидкість прийому та передачі мобільних даних і на великих відстанях у сільській місцевості. Ці та інші варіанти вирішення проблем можна знайти у матеріалі нижче.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Еволюція розвитку мобільного бездротового зв'язку та забезпечення ним клієнтів у галузях природоохоронної діяльності та сільськогосподарства України. Система LTE (Long Term Evolution, довготривала еволюція) була розроблена для того, щоб надати користувачам доступ до різноманітних сервісів, а також до Інтернету через протокол IP. Мережа LTE складається з багатьох вузлів. Усі вузли мережі прийнято поділяти на дві категорії: вузли, які стосуються мережі радіодоступу (Radio Access), і вузли опорної мережі (Core Network). Ключовим елементом, що визначає ефективність будь-якої радіомережі, є алгоритми та механізми, що використовуються для передачі даних між БС та МС. Далі розглядаються основні характеристики мережі LTE, стосуються мережі радіодоступу [1].

Відповідно до вимог до системи LTE, при радіусі стільника до 5 км повинні підтримуватися всі параметри спектральної ефективності, пропускнуої спроможності та роботи з мобільними абонентами. При радіусі стільника від 5 до 30 км допускається погіршення в показниках продуктивності.

Для забезпечення двох-направленої передачі між базовою та мобільною станціями технологією LTE підтримується як частотний (FDD), і тимчасової дуплекс (TDD). Для частотного дуп-

лексу визначено 15 парних частотних діапазонів (частоти від 800 МГц до 3,5 ГГц), а тимчасового вісім. При цьому ширина радіоканалу може бути різною. Допустимі такі значення: 1,4/3/5/10/15/20 МГц. Як системи множинного доступу в LTE використовуються OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) у низхідному каналі та SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) у висхідному. При використанні технології OFDMA весь спектр розбивається на піднесучі, ортогональні один одному. Залежно від ширини каналу, що використовується, загальна кількість піднесучих може бути 72, 180, 300, 600, 900 або 1200. Кожна з піднесучих може мати свій вигляд модуляції. Можуть використовуватися такі модуляції: QPSK, 16QAM, 64QAM. Може бути організований також множинний доступ.

Матеріал у статті подано у наступному порядку. У першій частині виконано послідовно: короткий огляд технології та принципу побудови широкопasmового бездротового зв'язку 3G; розглянуто радіоінтерфейс у мережах 3G. По тому виконано огляд технології та принципу побудови широкопasmового бездротового зв'язку 3G. Виконано огляд проблем, пов'язаних із вихідною потужністю базової станції та спектром випромінювання передавача БС. Розглянуто послуги, що надають у технології 3G.

Стосовно другої частини статті, то у ній зроблено огляд технології та принципу побудови широкопasmового бездротового зв'язку 4G технології. Розказано про перехід до 4G та роль швидкості при здійсненні мобільного зв'язку в Інтернеті. Розказано про LTE мережі, принципи їх побудови та функціонування. Розглянуто функції ММЕ (Mobility Management Entity).

Формулювання мети статті (постановка завдання)

У статті наведено апробований авторами алгоритм налагодження зв'язку у природоохоронній сфері та сільському господарстві, розказано про особливості підбору антени для 3G і 4G LTE мереж для здійснення зв'язку у сільській місцевості України, у її віддалених локаціях, у яких і знаходяться зазначені установи, центри заповідників, заказників, рибних господарств та інших фермерських господарств, між якими й бажано обладнати сучасний мобільний зв'язок. Поєднавши такі установи та центри у мережу для обміну інформацією та для зв'язку їх із загально-визначеним функціональним центром.

Метою даної публікації є надання необхідної теоретичної та практичної інформації тим, хто має намір налагодити сучасний мобільний зв'язок у мережах установ у природоохоронній

сфері та сільському господарстві України на основі досвіду авторів виконання таких робіт.

Виклад основного матеріалу

Виклад основного матеріалу розпочнемо з теоретичного підґрунтя, необхідного для успішного виконання окресленого кола робіт (підрозділи 1-10), після цього опишемо власний досвід виконання таких робіт (11-13).

1. Короткий огляд технології та принципу побудови широкопasmового бездротового зв'язку 3G

UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) – технологія стільникового зв'язку, розроблена Європейським інститутом стандартів телекомунікацій (ETSI). Стільникові мережі, що використовують цю технологію, відносять до мереж третього покоління (мереж 3G). До основних відмінностей мереж UMTS від мереж GSM відносять використання широкопasmових сигналів (сигнал може займати смугу або 5 МГц, або 1,6 МГц), і використання широкопasmової технології множинного доступу з кодовим поділом каналів (W-CDMA). У даній статті розглядаються основні засади побудови мереж третього покоління, їх архітектура, вводяться базові поняття, що стосуються як самих мереж, і до наданих послуг [2]. В основу принципів побудови мережі UMTS покладено розділення двох аспектів: фізичної реалізації окремих мережевих блоків та формування функціональних зв'язків між ними. При цьому завдання фізичної реалізації вирішуються, виходячи з концепції області (domain), а функціональні зв'язки розглядаються в рамках шару (stratum).

Первинним поділом на фізичному рівні є поділ архітектури мережі на область обладнання користувача (User Equipment Domain) і область мережної інфраструктури (Infrastructure domain.).

Обладнання користувача — це сукупність терміналів користувача (ТК) з різними рівнями функціональних можливостей, що використовуються мережними абонентами для доступу до UMTS-послуг. Зауважимо, що ТК можуть бути сумісні з іншими, крім UMTS, інтерфейсами доступу, наприклад, працювати в сумісному GSM-режимі [3]. В область мобільного користувача відносять дані і процедури, що до них відносяться, що дозволяють ідентифікувати мережного абонента, або навпаки, відмовити йому в доступі в мережу з яких-небудь причин. Такі дані, процедури реалізовані в ідентифікаційній карті, що видається при придбанні ТК.

Звернемося до області мережної інфраструктури, яка, у свою чергу, розділена на область мережевого доступу (Access Network Domain) та область базової мережі (Core Network Domain).

Такий поділ зумовлений бажанням чітко розмежувати процеси, пов'язані з бездротовим доступом ПТ в мережу радіоінтерфейсу, і всі інші процеси. Іншими словами, область доступу до мережі містить функції, специфічні для даного методу бездротового доступу, в той час як функції базової мережі в принципі можуть використовуватися з будь-якими методами доступу. Опорною точкою, що розмежовує області мережного доступу та базової мережі, є "точка Іu".

Область доступу до мережі містить фізичні елементи, що дозволяють керувати ресурсами бездротового доступу, а також механізми доступу до базової мережі. Область базової мережі складається з фізичних елементів, які забезпечують підтримку безпосередньо мережових та телекомунікаційних послуг, таких як управління мережевими ресурсами, визначення розташування користувача, передача по мережі службової інформації, поєднання з іншими мережами та ін. Виходячи з цих завдань, область базової мережі поділяється ще три області: область обслуговуючої мережі (Serving Network Domain), область домашньої мережі (Home Network Domain) і область транзитної мережі (Transit Network Domain).

Область мережі обслуговування (часто її називають просто областю обслуговування) — це та частина базової мережі, до якої здійснено користувальницьке підключення, що включає функції, локальні по відношенню до точки користувальницького доступу і, отже, змінюються при переміщенні користувача. Обслуговуюча область призначена для маршрутизації викликів та інформації користувача, вона здатна взаємодіяти і з домашньою областю для забезпечення користувачьких послуг, і з транзитною областю — для забезпечення послуг з передачі службової інформації [5].

Область домашньої мережі (домашня область) являє собою частину базової мережі, в якій зосереджені функції постійного відстеження, контролю та керування розташуванням користувача, тобто безвідносно до поточної точки доступу користувача. Ідентифікаційна карта пов'язує кожного користувача зі своєю домашньою областю, отже, у домашній області також має знаходитись інформація, необхідна для ідентифікації, а також інформація про послуги доступні даному користувачеві. Область транзитної мережі (транзитна область) є сполучною ланкою між обслуговуючою областю та віддаленим абонентом. Опорними точками, що розмежовують обслуговуючу та домашню області, а також обслуговуючу та транзитну області, є "точка Zu" та "точка Yu" відповідно.

2. Радіоінтерфейс у мережах 3G

Принцип кодового поділу каналів (КПК). В основі роботи мереж мобільного зв'язку третього покоління (3G) лежить кодовий поділ каналів. При кодовому розділенні каналів виділення (фільтрацію) конкретного каналу виробляють процесорному блоці приймача в результаті математичної обробки прийнятого сигналу. Для цього сигнал, що передається радіоінтерфейсом, закривають двома кодами: скремблюючим і каналотворюючим. Скремблюючі коди використовують для виділення безлічі сигналів, що випромінюються одним джерелом: конкретною базовою або абонентською станцією. Канало-утворюючі коди дозволяють розділити сигнали одного джерела.

3. Огляд технології та принципу побудови широкопasmового бездротового зв'язку 3G

Наземний сегмент радіопідсистеми UMTS може бути реалізований відповідно до ієрархічної багаторівневої структури та мати 3 основні рівні:

- піко-стілники (зона 1) — забезпечують покриття всередині приміщень та в тих будинках (або поверхах будівель), де спостерігається підвищений попит на послуги високошвидкісної передачі даних (відеоконференції, мультимедіа тощо). Принципи розгортання рівня піко-сот багато в чому залежить від максимально необхідного радіусу дії тих чи інших навколишніх умов (всередині чи поза приміщень). Абоненти мають низьку рухливість (швидкість пересування < 10 км/год) і можуть користуватися високошвидкісними послугами;

- мікро-стілники (зона 2) необхідні обслуговування абонентів поза приміщень шляхом покриття окремих вулиць і забезпечення додаткової ємності передачі трафіку, непідтримуваного рівнем макростілників. Абоненти в мікростілниках мають середню рухливість (швидкість пересування > 10 км/год) і можуть користуватися мовними послугами та послугами з передачі даних;

- макро-стілники (зона 3) забезпечують суцільне покриття великих районів міських, приміських та сільських зон, де абоненти мають високу рухливість (швидкість пересування автомобілем) і можуть користуватися, як правило, послугами з передачі мови та даних.

Додатковим рівнем є фемто-стілники.

4. Вихідна потужність базової станції

Під потужністю на виході передавача базової станції (БС) розуміється середня потужність, що підводиться до входу антени. Обмеження на значення максимальної та мінімальної вихідної потужності специфікаціями не встановлюються. Як типові значення максимальної вихідної поту-

жності БС використовується діапазон значень 31–43 дБм.

Мінімальні вимоги до максимальної вихідної потужності БС. У нормальних умовах максимальна вихідна потужність БС повинна залишатися в межах ± 2 дБ, а в екстремальних умовах – в межах $\pm 2,5$ дБ від заявленого у специфікаціях виробника обладнання.

Управління вихідною потужністю передавача БС. Базова станція повинна мати можливість зміни вихідної потужності передавача з кроком 1 дБ як обов'язкова умова і з кроком 0,5 дБ як додаткова умова. Динамічний діапазон регулювання потужності в каналі користувача повинен відповідати значенням від РБС мін = –28 дБ (і менше) до РБС макс = –3 дБ (і більше). Таким чином, при потужності передавача БС, що дорівнює 43 дБм, потужність в одному кодовому каналі може становити від 15 до 40 дБм. Частота динамічного регулювання потужності дорівнює 1500 Гц.

5. Спектр випромінювання передавача БС

Займана смуга частот. Під займаною смугою частот розуміється смуга, не більше якої зосереджено 99% загальної випромінюваної енергії сигналу БС. Смуга частот БС, що займається, при швидкості маніпуляції (чіпової швидкості) 3,84 Мчп/с не перевищує 5 МГц.

Позасмугові випромінювання. Позасмугові випромінювання передавача БС примикають безпосередньо до смуги і є продуктами процесу модуляції, але не виключають побічних випромінювань.

Технології високошвидкісної передачі даних вниз (HSDPA – High Speed Downlink Packet Access) та вгору (HSUPA – High Speed Uplink Packet Access) багато в чому близькі до пакетної передачі даних, що використовується в стандарті GSM з використанням технології GPRS/EDGE. Передачу здійснюють окремими пакетами, застосовуючи в залежності від стану траси різні модуляційно-кодуєчі схеми та повторну передачу неприйнятих пакетів. Технологію HSDPA використовують практично на всіх мережах UMTS, що розгортаються. Що стосується високошвидкісного пакетного доступу вгору HSUPA, пробні запуски розпочато з 2007 р. У HS-DSCH відсутні дві основні особливості CDMA, а саме змінюється коефіцієнт розширення спектру (variable SF) і швидке управління потужністю; вони замінені на адаптивну модуляцію та кодування: Adaptive Modulation and Coding (AMC), короткий розмір пакету, мультикодовий режим та автоматичний повтор запиту L1 Hybrid Automatic repeat request (HARQ). Заміна швидкого керування потужністю на AMC дає ефектив-

ний вираш у потужності завдяки виключенню витрат на керування потужністю. Коефіцієнт розширення спектра зафіксований на SF=16, що дає добрий дозвіл швидкості. Для того, щоб збільшити каналну швидкість адаптації та ефективність AMC, розмір пакету був зменшений з 10–20 мс до 2 мс, що відповідає трьом TS. Для зменшення затримок в керуванні каналом виконання частини функцій на рівні MAC для HS-DSCH перенесено в Node B.

6. Послуги у 3G

Служби користувача поділяються на 4 класи трафіку:

- 1) Голосовий трафік;
- 2) Поточковий трафік;
- 3) Інтерактивний трафік;
- 4) Фоновий трафік.

Для відповідного класу визначено характеристики якості обслуговування QoS (англ. Quality of Service – якість обслуговування), якому властиві такі ключові показники:

- Клас трафіку;
- Порядок доставки. Несучий канал забезпечує послідовну доставку пакетів;
- Максимальна довжина пакетів даних SDU (Service data unit) у октетах;
- Формат SDU у бітах. Список можливих розмірів (довжина) SDU, у тому числі при захисті даних від помилок;
- Можливість доставки пакетів з помилками;
- Залишковий коефіцієнт помилок (BER);
- Відносний рівень помилкових SDU;
- Затримка (на рівні 95 % потоку);
- Максимальна швидкість передачі;
- Гарантована швидкість передачі;
- Пріоритет трафіку на даній несучій;
- Призначення (зняття) пріоритетів;
- Клас пріоритетів;
- Клас затримок. Пріоритети трафіку інтерактивного та фонового класів;
- Клас надійності. Комбінація залишкового BER та відносного рівня помилок SDU;
- Клас пропускної спроможності.

Максимальна швидкість. У разі передачі телефонного трафіку наскрізна затримка не може перевищувати 150 мс при допустимій втраті інформаційних блоків не більше 3 %; при передачі потокового трафіку допустимі втрати блоків менше 1 %, а у разі передачі інтерактивного трафіку втрати блоків неприпустимі, а затримка може дорівнювати одиницям секунд при передачі однієї сторінки даних. Інтерактивний та фоновий трафік передають з підтвердженням, у зв'язку з чим необхідність повторної передачі блоків, прийнятих з помилками, не дозволяє фіксувати величину припустимої затримки, яка може бути

визначена лише статистично [1–4].

7. Огляд технології та принципу побудови широкопasmового бездротового зв'язку 4G

Перехід до 4G та роль швидкості мобільного Інтернету. Напевно багато хто знає, що мобільний трафік зростає експоненційно. Причини такого зростання є наступними: а) зростання кількості мобільних пристроїв; б) різноманітність контенту, в т.ч. "важкого"; в) бажання знати всі новини; г) перегляд HD-відео.

Які ж виникають проблеми при малій швидкості Інтернету? Під час відтворення відео та аудіо відбувається буферизація, тобто. спочатку частина відео або аудіо завантажуються в буфер і після цього ми можемо його відтворити. При малих швидкостях буферизація проходить повільно, тому ролик відтворюватиметься уривками. Є 2 виходи: або поставити на паузу, або знизити якість (якщо це можливо), але у разі потокового мовлення паузи немає і залишається тільки другий варіант (зменшити якість), причому ми втрачимо частину інформації, оскільки це мовлення в режимі онлайн. Звичайно, якщо ви щось берете з Інтернет, наприклад з Play Market - швидкість визначає час очікування до завантаження файлу.

Крім швидкості Інтернету, слід враховувати пінг. Пінг показує затримку пакетів даних. У мережах 3G затримка становить від 80 і більше мілісекунд. Для онлайн ігор затримка вище 100 мілісекунд стає помітною: починаються гальмування, все починає смикатися і грати стає дуже важко. За допомогою технології HSPA+ у мережах 3G вдалося суттєво збільшити швидкість та зменшити затримки. Пінг із HSPA+ становить приблизно 60 мс. У 4G базові станції отримали можливість виконувати функцію маршрутизації трафіку, і контролер, який вносив затримку, став непотрібним. Завдяки цьому ми маємо пінг нижче, ніж у мережах 3G. Отже, швидкість Інтернету відіграє важливу роль і дозволяє ширше користуватися всіма можливостями мобільного пристрою.

Підсумок. Маючи високу швидкість, користувач може: а) Дивитися відео та слухати музику без пауз та високої якості; б) Поліпшити якість голосового, відео зв'язку; в) Зменшити час очікування, перш ніж завантажити файл.

8. Принципи побудови та функціонування мереж LTE

LTE включає мережу радіодоступу (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN) та вдосконалене пакетне ядро (Evolved Packet Core, EPC). Мережа LTE побудована як сукупність нових базових станцій eNB (Evolved NodeB чи eNodeB), де сусідні eNB з'єднані між собою інтерфейсом X2. eNB підключено до EPC

за допомогою інтерфейсу S1. У літературі є інформація щодо взаємодії нових елементів в архітектурі мережі: S-GW (Serving Gateway) – обслуговуючих шлюзів, що містять ПЗ управління за протоколом MME (MME – Mobility Management Entity) тощо.

Структура мережі LTE є наступною. Ядро мережі EPC (Evolved Packet Core) складається з обслуговуючого шлюзу S-GW (Serving Gateway), шлюзу для виходу на пакетні мережі P-GW (Packet Data Network Gateway), структури управління протоколом Mobility Management MME (Mobility Management Entity), пов'язаної з S-GW та eNodeB сигнальними інтерфейсами.

Функції eNodeB (Evolved NodeB):

eNodeB поєднує в собі функції базових станцій та контролерів мереж 3-го покоління:

- забезпечує передачу трафіку та сигналізації по радіоканалу,
- керує розподілом радіоресурсів,
- забезпечує наскрізний канал трафіку до S-GW,
- підтримує синхронізацію передач і контролює рівень перешкод у стільнику,
- забезпечує шифрацію та цілісність передачі по радіоканалу, вибирає MME та організує сигнальний обмін з ним,
- стискає заголовки IP-пакетів,
- підтримує послуги мультимедійного мовлення,
- при використанні структури з підсилювачами потужності на антенній щоглі організує управління (пояснення див. у тексті) антеннами за спеціальним інтерфейсом Iuant.

Інтерфейс S1 підтримує передачу даних з S-GW та сигналізації через MME. Зазначимо, що eNB може мати з'єднання з кількома S-GW.

Інтерфейси X2 використовують для організації хендверів між сусідніми базовими станціями, у тому числі і при балансуванні навантаження між ними. У цьому інтерфейси X2 може бути логічними, тобто. їх організації не обов'язково реальне фізичне з'єднання між eNB.

Функції обслуговуючого шлюзу S-GW:

- а) маршрутизація пакетів даних, що передаються,
- б) встановлення якісних показників (Quality of Service, QoS) послуг, що надаються,
- в) буферизація пакетів для UE, які перебувають у стані Idle Mode,
- г) надання облікових даних для тарифікації та оплати виконаних послуг.

S-GW є якірною структурою, що забезпечує мобільність абонентів.

Кожну працюючу UE обслуговує певний S-GW. Теоретично UE може бути пов'язана з кількома пакетними мережами; тоді її обслуговуватимуть кілька серверів S-GW.

9. Функції P-GW (Packet Data Network Gateway)

Шлюз для виходу на пакетні мережі P-GW організує точку доступу до зовнішніх IP-мереж. Відповідно, P-GW є якірним шлюзом для забезпечення трафіку. Якщо абонент має статичну IP-адресу, то P-GW її активізує. У випадку, якщо абонент повинен отримати на час сеансу зв'язку динамічну IP-адресу, P-GW запитує її з сервера DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) або сам виконує необхідні функції DHCP, після чого забезпечує доставку IP-адреси абоненту. До складу P-GW входить PCEF (Policy and Charging Enforcement Function), який забезпечує якісні характеристики послуг на зовнішньому з'єднанні через інтерфейс Sgi і фільтрацію пакетів даних. При обслуговуванні абонента в домашній мережі функції P-GW та S-GW можуть виконувати як два різні, так і один пристрій. Інтерфейс S5 є тунельним з'єднанням GPRS або Proxу Mobile Irv6. Якщо P-GW та S-GW знаходяться у різних мережах (наприклад, при обслуговуванні абонента в роумінгу), то інтерфейс S5 замінюють на інтерфейс S8[8].

10. Функції MME (Mobility Management Entity)

Керуючий блок MME насамперед підтримує виконання процедур протоколу Mobility Management: забезпечення безпеки роботи в мережі під час підключення UE та вибір S-GW, P-GW. MME пов'язані з HSS своєї мережі у вигляді інтерфейсу S6a. Інтерфейс S10, який з'єднує різні MME, дозволяє обслуговувати UE при переміщеннях абонента, а також при його знаходженні в роумінгу.

11. Підбір антени для налагодження зв'язку

Антену є фактично інтерфейсом, у якій відбувається перетворення високочастотної електромагнітної енергії у системі передавача в електромагнітну хвилю, здатну поширюватися у просторі. Або у разі прийому, здійснює зворотне перетворення - електромагнітну хвилю, у ВЧ коливання. Виконаний комплекс робіт було здійснено із застосуванням "3G/4G MIMO антена Yagi с усилением 20 dBi и рабочим диапазоном частот 1700–2170 МГц" (3G/4G UMTS/LTE антени Стрела RNet (MIMO 2x2) 1700–2170 МГц с усилением 20 дБ). Для системи з такою антеною виявилася справедливою наступна закономірність. Нами було зареєстровано, що чим нижча частота, тим більша довжина хвилі і тим далі вона може поширюватися від джерела-антени (БС). І відповідно чим більша частота, тим менша довжина хвилі і тим менша дальність поширення таких хвиль і менша здатність такого сиг-

налу долати перешкоди. Приміром на частотах 800 МГц і 900 МГц довжина хвилі становить приблизно 33-34 см, але в частоті 1800 МГц - близько 16 см. Максимальна дальність поширення радіохвиль залежить від потужності передавача, рельєфу місцевості та наявності чи відсутності різних перешкод.

Приміром на частоті 800 МГц дальність становить 35-37 км від базової станції, але в частоті 1800 МГц - 10-12 км. На частоті 2600 МГц ще менше - близько 7 км. Чим менше частота, тим більша довжина хвилі, тим легше хвилі огинають/долають різні перешкоди, але тим менша ємність БС і нижче теоретична швидкість передачі даних. І навпаки, чим більше частота, тим менше довжина хвилі, і тим гірше вона долає перешкоди та менше дальність поширення радіохвиль, але більше ємність БС і вище теоретична швидкість передачі. Тому базові станції 4G LTE на частоті 2600 МГц встановлені переважно у великих містах у місцях із великою концентрацією активних користувачів. У таких зонах теоретично можна отримати швидкість мобільного Інтернету вищу, ніж у місцях роботи вишок на частоті 1800 МГц. У дрібних населених пунктах, у сільській місцевості, між містами, де концентрація населення менша (а відповідно і менша за активних користувачів) встановлюються базові станції, що працюють на частоті 1800 МГц. Вони мають ємність менше і нижче за теоретичну швидкість передачі даних, зате покривають більшу територію.

Але яку ж антену потрібно купити для посилення зв'язку 3G та 4G LTE у тих чи інших умовах? Як правильно підібрати 4G антену для модему чи роутера? На яких відстанях від БС варто боротися за якісний сигнал та хорошу швидкість передачі даних, а на яких ні? Яка антена краща для міста, яка для будинку в селі, на дачі, або на віддаленій біостанції чи сільській амбулаторії? Відповідь на ці питання ми намагалися дати у своїй роботі, отримані результати описано нижче.

Застосовані методи. У цій роботі ми використали методику аналізу та підбору обладнання для забезпечення якісним мобільним зв'язком у сільській місцевості. Було досліджено та проаналізовано характеристики 3G/4G антени MIMO в робочому діапазоні частот (1700–2100 МГц). Будь-які уповільнювальні структури на основі резонансних елементів (директорні елементи), які формують хвилю, що біжить (уповільнену щодо швидкості поширення сферичного фронту хвилі від випромінюючого елемента) – у широкій смузі частот мають такі 2 властивості: 1) за деякої довжини хвилі, для цього періоду структури настає максимальне уповільнення і досягається

максимальна спрямованість випромінювання (посилення, апертура). При зростанні частоти вище цього максимуму – спрямованість різко падає. Це відбувається коли діюча довжина елементів наближається до $\lambda/2$ і затримка яку вони вносять перетворюється з випередження на запізнення і хвиля, що біжить, розгортається в протилежному напрямку (директори починають поводитися як рефлектори). Хвильовий канал намагаються розрахувати так, щоб максимум характеристики антени був поблизу або трохи вищий за найвищу частоту робочого діапазону (щоб завал не починався в межах розрах. смуги)

2) нижче, ніж частота максимального посилення – спрямованість падає рівномірно зі зниженням частоти досить далеко (приблизно на октаву). Але спрямованість (посилення) падає швидше ніж квадрат частоти, тобто падає також і апертура (в m^2). Антени хвильовий канал не мають рівномірної апертури, вони більш ефективні на верхній частині діапазону і менш ефективні внизу (для антен панельної компоновки зазвичай вірно протилежно – КВП (коефіцієнт використання поверхні) на нижніх частотах зазвичай вище ніж угорі).

Для оцінки спрямованих властивостей (посилення, апертури) хвильових каналів невідомої конструкції – перше що необхідно це виміряти частоту, на якій розробник вибрав максимум посилення та апертури та подивитись, як ця частота співвідноситься з декларованим діапазоном роботи. Фірма R-net вибрала точку максимуму спрямованості на 2030 МГц (18,36 dBi). Як наслідок, вище за цю частоту спрямованість починає різко падати і до 2170 МГц знижується до 13,63 dBi. У передній півсфері починають формуватись потужні (до +7 dBi) бічні пелюстки (на кутах ± 28 градусів до головного напрямку). Максимум апертури знаходиться на частоті 2000 МГц і досягає 1204 cm^2 . Вище цієї частоти апертура різко падає і на 2170 МГц становить лише 368 cm^2 (тобто якщо помістити антену в падаючий потік з фіксованою щільністю $\text{Вт}/\text{m}^2$, то на 2170 МГц антена прийме потужність лише 30 % потужності на частоті 2000 МГц). Вибір такої низької частоти "відсікання" очевидно обумовлений бажанням пожертвувати роботою на частотах 3G і додати пару дБ на частоті аплінка 1710 МГц в діап.1800.

12. Антени для 3G і 4G LTE мереж

Антени для 3G і 4G LTE мереж мають суттєві відмінності, зумовлені насамперед поширенням радіохвиль у зазначених стандартах зв'язку. Так, у стандарті 3G UMTS радіохвилі поширюються у вертикальній поляризації і отже антени для таких мереж мають також вертикальну

поляризацію. У стандарті 4G LTE передавальна базова станція ретранслює хвилі як у вертикальній, так і горизонтальній поляризації, а для прийому сигналу використовуються спеціальні антени, які підтримують технологію MIMO (MIMO – англ. Multiple Input Multiple Output) – метод просторового кодування сигналу, що дозволяє збільшити смугу пропускання каналу, в якому передача даних та прийом даних здійснюються системами з кількох антен).

MIMO антени, які використовуються для посилення сигналу в мережах 4G LTE – це, як правило, панельні антени різних видів і коефіцієнтів посилення. Вони мають у своїй конструкції дві антени, одна з яких має вертикальну поляризацію, а друга – горизонтальну. За рахунок цього такі антени краще підсилюють та стабілізують сигнал, тим самим збільшуючи швидкість передачі даних. У MIMO антенах є два виходи, до яких через коаксіальний кабель можна підключити два антенних роз'єми в модемі або роутері (для повноцінної роботи в мережах 4G LTE з антеною абонентський пристрій модем або роутер має підтримувати технологію MIMO і мати два антенні роз'єми).

Також для 4G мереж використовують і звичайні антени типу "Хвильовий канал" без підтримки MIMO. Такі антени мають досить великі коефіцієнти посилення (в середньому до 15–16 Дб) та вузькі діаграми спрямованості, можуть вловлювати сигнал на відстанях до 20 км (а в окремих випадках і більше) від базової станції, але за рахунок того, що у спрямованих антенах "Хвильовий канал" не має підтримки MIMO (а для мереж LTE це має велике значення) вони добре підсилюють сигнал, але не дають значного приросту швидкості передачі даних. Іншими словами, якщо встановити спрямовану антену типу "Хвильовий канал" і підключити її до модему, то в деяких випадках можна отримати повну шкалу рівня сигналу на пристрої, та швидкість Інтернету буде невисока.

Останнім часом поширюється використання антен MIMO типу "Хвильовий канал" з конструкцією рефлектора та директорів у вигляді круглих дисків («Стріла-5») або двох рознесених у просторі антен "Хвильовий канал" SISO (змонтованих у однаковому напрямку в ортогональній проекції). Це дозволяє поєднати високий коефіцієнт посилення та технологію MIMO. Особливо потужний ефект використання такої антени можуть отримати мешканці сільської місцевості. Наприклад у тих місцях, де звичайна антена "Хвильовий канал" SISO не з'єднується з базовою станцією, або SINR сигналу є від'ємним, при використанні антени MIMO типу "Хвильовий

канал" можна отримати SINR сигналу більше 0 та середню якість передачі даних.

Чим більший коефіцієнт підсилення антени, тим менший кут відхилення від базової станції. Антена посиленням 9 dBi має кут відхилення близько 40 градусів, а антена на 20 dBi – вже менше 20 градусів. Так, наприклад, панельні антени з посиленням 9 dBi працюють не тільки в межах прямої видимості БС, але і добре ловлять відбитий сигнал. Тому їх можна застосовувати в умовах міської забудови, коли неможливо зловити прямий сигнал від вишки, що передає. Така антена зможе вловлювати відбитий сигнал від будівель або інших об'єктів, що стоять поруч.

13. Алгоритм організації мобільного зв'язку у сільській місцевості України

Коли необхідно провести Інтернет для будівлі наукової установи природоохоронного профілю, або для виділеного приміщення на фермі у віддаленій місцевості України, треба виконати кілька описаних нижче кроків. Зрозуміло, що спершу треба вибрати антену - авторами було вибрано антену 3G/4G MIMO Yagi з підсиленням 20 dBi та діапазоном робочих частот 1700–2170 МГц; її робочі характеристики наведено на рис. 1–4 [7].

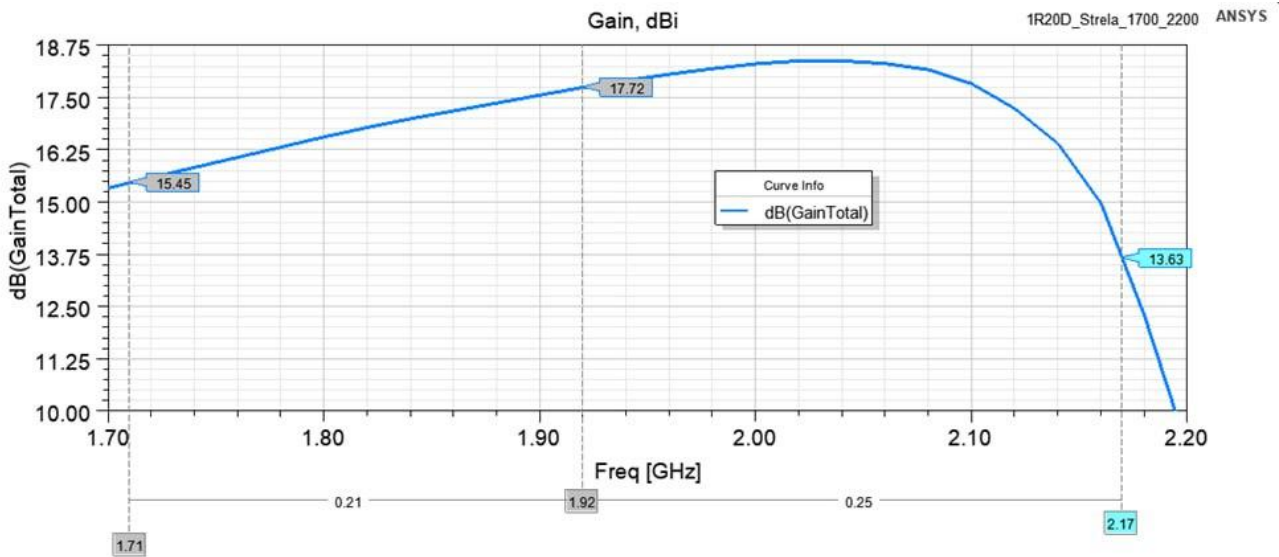


Рисунок 1 – Графік залежності коефіцієнта підсилення від частоти [7]

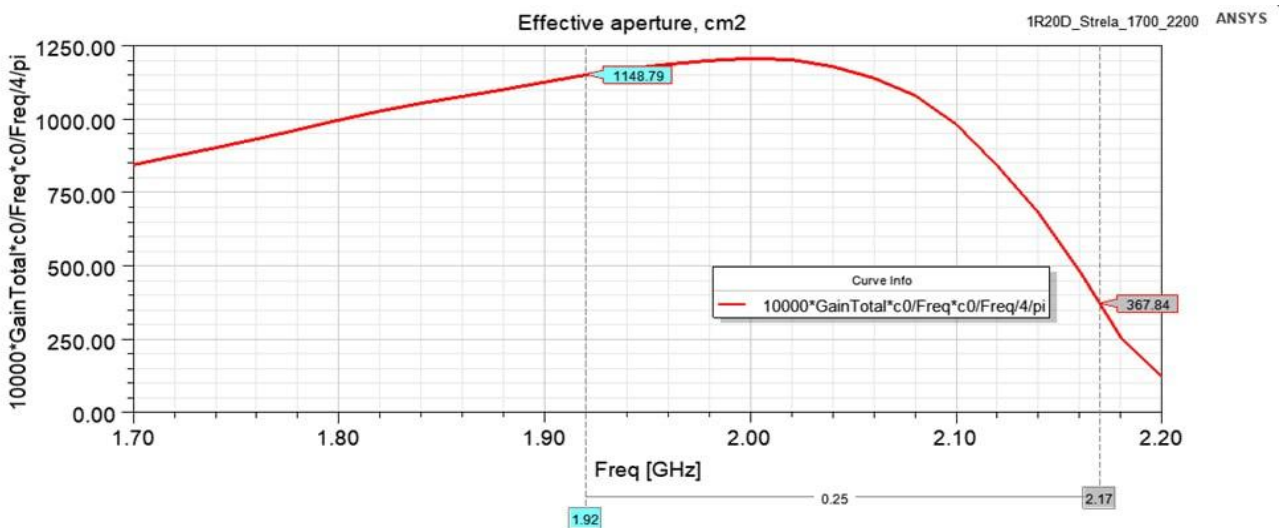


Рисунок 2 – Апертура антени 3G/4G MIMO Yagi з підсиленням 20 dBi та діапазоном робочих частот 1700–2170 МГц [7]



Рисунок 3 – Графік залежності частоти – VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) (Port1) [7]



Рисунок 4 – Графік залежності частоти – VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) (Port2) [7]

Приблизний алгоритм наступних дій:

1. Спершу необхідно закупити кілька різних SIM-карт і, підключивши модем до ноутбука, поїздити з ними околицями селища або бази. Так можна зрозуміти, у кого з операторів краще ловити сигнал, і які базові станції розташовані ближче до вас. Без цих відомостей нормально встановити антену для посилення сигналу мережі вам навряд чи вдасться. Іноді звичайний USB-модем і сам забезпечує хороший прийом. Але це буває лише тоді, коли ви знаходитесь в безпосередній близькості до базової станції, і проходження сигналу нічого не заважає. В інших випадках без "доведення" модему ніяк не обійтись. Тому для виконання цього першого кроку алгоритму варто запросити професіонала.

2. Для збільшення потужності сигналу знадобиться стандартний набір обладнання – його необхідно придбати. Обладнання для Інтернету однакове і для 3G, і для 4G для наших умов: модем для прийому сигналу, Wi-Fi-роутер для його вільної бездротової роздачі всередині будинку,

антена (як і у випадку з модемом, при покупці обов'язково уточніть, на яку частоту вона розрахована), блок живлення або POE-адаптер та кабелі для з'єднання та передачі даних; перехідники. Нехитра схема, але монтувати цю електроніку можна по-різному.

3. Наприклад, модем з роутером (або роутер окремо) можуть бути встановлені в будинку або на горіщі незалежно від антени. Це дозволяє захистити їх від перепадів температур; і так зручніше організувати живлення від розетки. Але з антеною і модем, і роутер у цьому випадку з'єднуюватимуться коаксіальним кабелем. А він має обмеження по довжині – не більше 12 метрів (при використанні товстого кабелю 8D-FB), інакше розпочнуться згасання сигналу, та швидкість Інтернету впаде. При більш тонкому кабелі втрати сигналу ще відчутніші, а товстий кабель не дуже зручно монтувати. Більш надійний варіант, при якому все обладнання монтується відразу на антені, в невеликому боксі. І модем, і Wi-Fi-роутер з'єднуються з антеною підтейлами –

невеликими проводами.

4. Найкращий варіант – коли коаксіального кабелю немає взагалі (тільки пігтейли в антені), а сам модем встановлений у корпус антени у термокожух та підключений пігтейлами на друковану плату вібратора. Пігтейла два, тому що LTE-антена працює в стандарті MIMO і має два несучі сигнали в різних поляризаціях, що дає відмінне поширення радіосигналу. Цей варіант унеможливує втрати в кабелі і дає максимальне посилення. З антени виходить вже звичайний провід USB метрів 7–10 або навіть кабель UTP метрів 30–100 (в антені має бути і роутер), і все це живиться звичайнісіньким POE-адаптером. За допомогою різних схем посилення можна отримати пристойний Інтернет-сигнал на відстані від базової станції до 15–30 км.

5. Якщо всередині будинку «сили» одного роутера Wi-Fi не вистачає, можна організувати в будівлі кілька точок доступу до Інтернету. Схема та ж – додатковий роутер, провід.

6. Загальні рекомендації для встановлення антен для посилення бездротового сигналу такі:

- Чим вище ви піднімете антену, тим буде менше «шуму» при передачі сигналу, а значить, і краще прийом. Але в той же час не варто зловживати збільшенням висоти антени, оскільки зі збільшенням висоти підйому антени підвищується її парусність. Важливо якомога точніше направити антену у бік базової станції. Обертаючи її, необхідно «ловити» напрямком з найкращими показниками RSSI (рівень потужності сигналу, що приймається).

- Зрозумівши оптимальний напрямком та частоту мережі, запам'ятайте її та поставте у пріоритет у налаштуваннях модему (якщо це допускається). Інакше потім він почне «стрибати» по різних частотам у пошуку сигналу.

- Якщо ви використовуєте коаксіальний кабель для з'єднання обладнання, то він повинен бути якомога коротшим.

7. Якщо у вас немає бажання возитися з антенами-підсилювачами, а Wi-Fi сигнал від роутера в деяких зонах будинку занадто слабкий, то деякі фахівці радять поставити додаткові роутери в режимі «репітер». Відбиваючи основний сигнал, вони посилюють його і передають далі адресату (на кшталт електричних підстанцій). Але це рішення має мінуси: роутери, налаштовані на різні режими, можуть конфліктувати один з одним, а передача сигналу «туди-сюди» уповільнює його, заважає працювати швидко. Репітери для 4G і зовсім не рекомендується ставити через їхню високу потужність, здатну вивести з ладу базову станцію.

8. Якщо ж така послуга для вас є можливою,

то найкраще запросити відповідного фахівця для виконання всіх цих робіт з високою якістю.

Висновки та перспективи подальших досліджень.

1. В даній статті предметно та у деталях було детально розглянуто теоретичне підґрунтя для розвитку 3G та 4G LTE технологій для налагодження зв'язку у сільських місцевостях України, щоб забезпечити ним установи та локальні пункти здійснення природоохоронної діяльності та сільського господарства України. Оскільки такі види діяльності характеризуються великими площами здійснення своєї активності переважно у сільських місцевостях, на яких організовані мережі відповідних господарств, то це потребує особливого підходу при налагодженні обміну інформацією між суб'єктами такого господарювання. Дані також практичні рекомендації співробітникам мереж державних установ, фермерських хазяйств, рибних господарств які будуть налагоджувати такі види зв'язку у конкретних місцевостях, кожна з яких має локальні особливості.

2. Після розгляду теоретичних засад організації мобільного зв'язку в сільських віддалених локаціях країни, авторами запропоновано алгоритм виконання відповідних робіт для їх установи, наукової бази або фермерського господарства.

3. Матеріал у статті було викладено у наступному порядку. У першій частині було виконано послідовно: короткий огляд технології та принципу побудови ширококутового бездротового зв'язку 3G; розглянуто радіоінтерфейс у мережах 3G. По тому виконано огляд технології та принципу побудови ширококутового бездротового зв'язку 4G. Виконано огляд проблем, пов'язаних із вихідною потужністю базової станції та спектром випромінювання передавача БС. Розглянуто послуги, що надаються у 3G.

У другій частині статті було зроблено огляд технології та принципу побудови ширококутового бездротового зв'язку 4G технології. Розказано про перехід до 4G та роль швидкості при здійсненні мобільного зв'язку в Інтернеті. Розказано про LTE мережі, принципи їх побудови та функціонування. Також розглянуто функції MME. Нарешті було розказано про алгоритми налагодження зв'язку у природоохоронній сфері та сільському господарстві, про особливості підбору антени для 3G і 4G LTE мереж для здійснення зв'язку у сільській місцевості України, у її віддалених локаціях, у яких і знаходяться установи, центри заповідників, заказників, рибних господарств та інших фермерських господарств, між якими й бажано обладнати сучасний мобільний зв'язок. Розглянуто поєднання таких установ

та центрів у мережу для обміну інформацією та для зв'язку їх із загально визначеним функціональним центром. Таким чином, була надана необхідна теоретична та практична інформація тим, хто має намір налагодити сучасний мобільний зв'язок у мережах установ у природоохоронній сфері та сільському господарстві України.

4. Зроблено висновок стосовно підбору антен для застосування в умовах сільської місцевості, в заміських будинках, базах заповідників та заказників, осередках фермерських господарств, виробничих або складських приміщеннях у сільському господарстві, що знаходяться за межами міст на значній відстані від передавальних станцій стільникових операторів. Встановлено, що у таких локаціях слід використовувати антени більшого підсилення - від 15 до 24 dBi. Такі антени мають більш вузькі діаграми спрямованості, але дозволяють підсилити сигнал та покращити швидкість мобільного Інтернету на великих відстанях, особливо останні модифікації антен "Хвильовий канал" MIMO. Окрім того в умовах пересіченої місцевості та поганих умов прийому-передачі сигналів є можливість отримати Інтернет за допомогою антени MIMO діапазону 900 Мгц, як останній варіант при невеликій швидкості передачі даних.

5. Запропоновано алгоритм організації мобільного зв'язку для обміну інформацією у мережах установ природоохоронної діяльності та сільського господарства. Цей алгоритм налагодження зв'язку був успішно апробований авторами та реально може бути здійсненим на практиці. Все ж при налагодженні такого сервісу у наших умовах рекомендується зробити це за допомогою та з участю фахівців.

Список використаних джерел (References)

1. Molisch, A. F. (2022). *Wireless Communications: From Fundamentals to Beyond 5G*. 3rd Edition. Wiley-IEEE Press. 1008 p. ISBN: 978-1-119-11721-6.
2. Koivusalo, E. (2022). *Converged Communications: Evolution from Telephony to 5G Mobile Internet*. Wiley-IEEE Press. 480 p. ISBN: 978-1-119-86752-4.
3. Sauter, M. (2021). *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. 4th Edition, 624 p. ISBN: 978-1-119-71469-9.
<https://doi.org/10.1002/9781119714712>
4. Yi Huang, (2021). *Antennas: From Theory to Practice*, 2nd Edition, 544 p. ISBN: 978-1-119-09234-6.

5. Klyuchko, O. M. & Beloshitsky, P. V. (2021). *Telecommunication and Digital Technologies for Extreme Conditions in Ukraine: Continuation of EMBS Traditions*, International Conference on Telemedicine & Digital Health, Great Britain, September 21, 2021 (Internet publication).

6. Shutko, V. N. Fomenko, N. S., Klyuchko, O. M. & Kolganova, O. O. (2024). The latest means of communications based on LTE and MIMO technologies in 3G, 4G networks: application for contemporary biomedical practice in rural Ukraine. *Electronics and Control Systems*, 79(1), pp. 61–70, <https://doi.org/10.18372/1990-5548.79.18277>.

V. Shutko, V. N. Fomenko, N. S., & Klyuchko, O. M. (2023). Implementation of 3G, 4G mobile connections technologies in urban and rural regions. *Electronics and Control Systems*, 78(4), pp. 62–68. <https://doi.org/10.18372/1990-5548.78.18277>.

Klyuchko, O. M. & Tulin, K. M. (2-23) *Monitoring of harmful chemicals in environment in war conditions: "EcoIS" information system*. Global Tech Summit-2023. Get Connected And Transform The Future Of Technology. Toronto, Canada, (7-8) August 2023 (I-net publication)

Yuliarman Saragih, Ridwan Satrio Hadikusuma, & Agatha Elisabet S (2022). Evaluation of cellular network performance involving the LTE 1800 band and LTE 2100 band using the drive test method. *Nov2022, J. INFOTEL* 14(4). <https://doi.org/10.20895/infotel.v14i4.833>

Mla Vilakazi, Thomas O. Olwal, Luzango P. Mfupe, & Albert Lysko, (2023). Open Air Interface for 4G Core Network and 4G/5G Base Stations. 3rd Intl Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET 2023), Cape Town, South Africa. Nov2023. <https://doi.org/10.1109/ICECET58911.2023.10389282>

Rihai Wu, Xun Yang, Xia Zhou, & Yibo Wang. (2021). *Enterprise Wireless Local Area Network Architectures and Technologies*, 446 p. <https://doi.org/10.1201/9781003143659>

6G Wireless Communications and Mobile Networking, Ed. By Xianzhong Xie, Bo Rong, Michel Kadoch. (2021), eISBN: 978-1-68108-796-2, ISBN: 978-1-68108-797-9.

<https://doi.org/10.2174/97816810879621210101>
Shaikhul Arefin Khan, Md. Mokarram Hossain Chowdhury & Uthso Nandy, (2023). LTE/LTE-A Based Advanced Wireless Networks. *J. Engineering Research and Reports*, 25(10), pp. 195–199. <https://doi.org/10.9734/jerr/2023/v25i101012>

Designing Energy-Efficient Wireless Access Networks: LTE and LTE-Advanced. Conference of Cairo University. Oct 2023.

Надійшла до редакції 09.07.2025