

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Інститут інформатики та радіоелектроніки
Факультет радіоелектроніки та телекомунікацій
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра радіотехніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

(ступінь вищої освіти)

на тему: ДОСЛІДЖЕННЯ АНТЕНИ МІМО

Виконав: студент(ка) 4 курсу, групи РТ-918сп

Спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)

«Інформаційні мережі зв'язку»

Сірінюк Роман Володимирович

(прізвище та ініціали)

Керівник Бугрова Т.І.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»
 (повне найменування закладу вищої освіти)

Інститут, факультет Інститут інформатики та радіоелектроніки, ФРЕТ
 Кафедра Радіотехніки та телекомунікацій
 Ступінь вищої освіти Бакалавр
 Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
(код і найменування)
 Освітня програма (спеціалізація) «Інформаційні мережі зв'язку»
(назва освітньої програми (спеціалізації))

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри РТТ
 К.Т.Н., доц. Морщавка С.В
 « » травня 2021 року

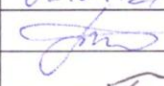
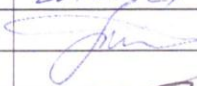
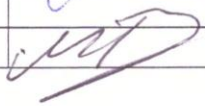

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ (РОБОТУ) СТУДЕНТА(КИ)

Сіріньок Романа Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема проекту (роботи) Дослідження антени МІМО
 керівник проекту (роботи) Бугрова Тетяна Іванівна, к.т.н., доцент,
прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом закладу вищої освіти від «30» квітня 2021 року 164
- Строк подання студентом проекту (роботи) 26 травня 2021
- Вихідні дані до проекту (роботи) Дослідити антену МІМО типу NanoStation2 – подовжувач WiFi. Географічна область для проведення досліджень – Олександрівський район. Дослідити теоретично та експериментально рівень прийнятого сигналу на різних відстанях, отримати діаграми спрямованості шляхом моделювання в HFSS та методом прямого вимірювання.
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Тестування сучасної моделі антени МІМО, моделювання в Ansys Electronics Desktop (HFSS 18.2), створення структурної схеми пристрою, тестування на дальність дії на місцевості та за допомогою спеціального програмного забезпечення, безпосереднє вимірювання діаграм спрямованості в натурному вигляді та порівняння експериментальних результатів з теоретичними.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Презентація 15 слайдів

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1-4	Бугрова Т.І., доцент	02.04.21	25.05.21
			
Нормоконтроль	Мороз Г.В., ст.викладач		

7. Дата видачі завдання « 2 » квітня 20 21 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Моделювання антени в середовищі Ansys Electronics Desktop	5.04-12.04	
2	Тест на дальність дії антени	019.04-29.04	
3	Безпосереднє вимірювання діаграм спрямованості	09.05	
4	Оформлення пояснювальної записки	10.05-19.05	
5	Перевірка ПЗ на добросовісність	21.05	
6	Підготовка презентації в Power Point	25.05	
7	Захист	04.06	

Студент(ка)


(підпис)

Сірінюк Р.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник проекту (роботи)


(підпис)

Бугрова Т.І.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

ПЗ: 54 сторінки, 31 рисунок, 1 таблиця, 9 джерел

Об'єкт дослідження – антена МІМО Nanostation 2.

Мета роботи – створити 3D модель антени МІМО та на її основі отримати характеристики спрямованості та узгодження антени.

Методи дослідження – метод електродинамічного моделювання, чисельні методи, інженерні методи.

Основні результати полягають в частотних залежностях коефіцієнтів стоячої хвилі, коефіцієнтів відбиття, діаграм спрямованості в діапазоні робочих частот антени, а також у вимірюваннях дальності дії Nanostation 2 як подовжувача мобільного інтернету та визначенні швидкості передавання даних на різних каналах станції. Результати експериментальних досліджень добре узгоджуються з розрахунковими даними.

Область застосування – телекомунікаційні мережі зв'язку, мобільний інтернет.

АНТЕНА, ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ, КОЕФІЦІЄНТ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ, ТЕХНОЛОГІЯ МІМО, ЗАГАЛЬНЕ ПІДСИЛЕННЯ, ДАЛЬНІСТЬ ДІЇ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	7
1 ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ТЕХНОЛОГІЮ МІМО.....	10
1.1 Історія МІМО.....	10
1.2 Еволюція МІМО.....	13
1.3 Робота технології МІМО.....	15
1.4 Дослідження продуктивності МІМО систем п'ятого покоління в неселективному каналі Релея.....	17
2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.....	24
2.1 Структура МІМО.....	24
2.2 Основні відомості про антени.....	25
2.3 Антенні технології.....	29
2.4 Види антен.....	32
3 МАКЕТИНГ.....	35
3.1 NanoStation2 – короткі відомості.....	35
3.2 Проект ANSYS ELECTRONICS.....	36
3.3 Структурна схема NanoStation2.....	40
4 ЕКСПЕРИМЕНТ.....	42
4.1 Дослідження на дальність дії.....	42
4.2 Метод безпосереднього вимірювання діаграм спрямованості	45
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	54

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АС	–	абонентська станція
БС	–	базова станція
Км	–	кілометри
МГц	–	Мегагерц
УКХ	–	ультракороткі хвилі
BTS	–	(Base Telecommunication Station) базова телекомунікаційна станція
CDMA	–	множинний доступ з кодовим розділенням каналів
COST	–	Cooperation for Scientific and Technical Research
DCS	–	Digital Communication Systems
ITU	–	International Telecommunication Union
GSM	–	Global System Mobile
PCS	–	Personal Communication Systems
LTE	–	Long-TermEvolution
MMDS	–	Multichannel Multipoint Distribution System
MIMO	–	Multiple Input Multiple Output
MIMO-	–	Multiple-input, multiple-output orthogonal frequency-division
OFDM		multiplexing
UMTS	–	Universal Mobile Telecommunications System
WiFi	–	стандарт бездротової передачі цифрових даних
WWiSE	–	Wave Works Interactive Sound Engine

ВСТУП

В наш час зв'язок четвертого покоління 4G LTE в Україні функціонує досить давно. За цей відрізок часу оператори значно розширили зону покриття своїх мереж LTE і вона тепер доступна не тільки жителям великих міст, але і не великих населених пунктів, що знаходяться в сільській місцевості, на островах та в горах. Але не дивлячись на те, що покриття постійно розширюються і поліпшуються у багатьох користувачів як великих міст, так і віддалених населених пунктів спостерігаються проблеми зі зв'язком і часто виникає потреба в посиленні слабкого сигналу та встановлення зовнішньої антени. За допомогою них ми можемо економити на часі (так як швидкість передачі даних в будь яку точку світу займає декілька секунд) та на ресурсах (тому що базова станція та приймач зв'язку більш дешевші ніж десятки та навіть сотні кілометрів дроту) що є дуже рентабельною та економічно вигідно.

В Україні працює 5 стільникових операторів. Це національні оператори Київстар, Водафон Україна і Лайфселл, які надають послуги в стандартах GSM 900/1800 МГц (голосовий зв'язок), UMTS 2100 МГц (3G інтернет) і LTE 1800/2600 МГц (4G інтернет). Інтертелеком який надає послуги зв'язку в стандарті CDMA на частоті 800 МГц (голосовий зв'язок і 3G інтернет). І нарешті Трімоб, з покриттям тільки в великих містах та їх околицях – GSM 900/1800 МГц (голосовий зв'язок), UMTS 2100 МГц (3G інтернет).

Антенна перетворює енергію високочастотного коливання від передавача в електромагнітну хвилю, здатну поширюватися в просторі. Або в разі прийому, виробляє зворотне перетворення – електромагнітну хвилю, в ВЧ коливання.

Як відомо, чим нижче частота – тим більше довжина хвилі і тим далі вона може поширюватись від джерела (БС – базова станція). І відповідно чим більше частота, тим менше довжина хвилі і тим менше дальність поширення таких хвиль та менше здатність такого сигналу долати перешкоди.

Так наприклад на частотах 800 МГц і 900 МГц довжина хвилі становить приблизно 33-34 см, а на частоті 1800 МГц – близько 16 см.

Максимальна дальність поширення радіохвиль залежить від потужності передавача, рельєфу місцевості і наявності або відсутності різних перешкод. Так наприклад на частоті 800 МГц дальність складає 35-37 км від базової станції, а на частоті 1800 МГц – 10-12 км. На частоті 2600 МГц і того менше – близько 7 км.

Чим менше частота, тим більше довжина хвилі, що дозволяє хвилям швидше долати різні перешкоди, але тим менше ємність БС і нижче теоретична швидкість передачі даних. І навпаки, чим вище частота, тим менше довжина хвилі, тим гірше вона долає перешкоди і менше дальність поширення радіохвиль, але більше ємність БС і вище теоретична швидкість передачі даних. Тому базові станції 4G LTE на частоті 2600 МГц встановлені переважно у великих містах в місцях з великою концентрацією активних користувачів. У таких зонах теоретично можна отримати швидкість мобільного інтернету вище, ніж в місцях роботи вишок на частоті 1800 МГц. У дрібних населених пунктах, в сільській місцевості, між містами, де концентрація населення менше (а відповідно і менше активних користувачів) встановлюються базові станції, що працюють на частоті 1800 МГц. Вони мають ємність менше і нижче теоретичну швидкість передачі даних, зате покривають більше території.

Тому для отримання задовольняючих показників швидкості передачі даних багато хто (навіть великі компанії) використовують антени із різними технологіями.

Однією з них є технологія MIMO.

MIMO (Multiple Input Multiple Output; множинні входи, множинні виходи) – метод просторового кодування сигналу, що дозволяє збільшити смугу пропускання каналу, при якому для передачі даних використовуються дві і більше антени і така ж кількість антен для прийому. Передавачі та приймачі

рознесені на таку відстань, щоб досягти мінімального взаємного впливу один на одного між сусідніми антенами. Технологія MIMO використовується в бездротових мережах Wi-Fi, WiMAX, LTE для збільшення пропускної здатності та більш ефективного використання частотної смуги. Фактично MIMO дозволяє в одному частотному діапазоні і заданому частотному коридорі передавати більше даних, тобто збільшити швидкість. Досягається це за рахунок використання декількох передавальних і приймальних антен.

Антенa MIMO представляє собою дві смужкових резонаторних 3G / 4G антени з розносом в просторі та по поляризації під нахилом $+ 45^\circ$ або -45° . Мінімальна кореляція (взаємозв'язок) 3G/4G сигналів досягається за рахунок особливого рознесення антен в просторі. Особливе розташування забезпечує високу надійність і підвищує продуктивність системи зв'язку.

В даному дипломному проекті досліджується антенa «NanoStation2».

1 ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ТЕХНОЛОГІЮ МІМО

1.1 Історія МІМО

Перші дослідження МІМО за часту приводять до дослідницьких робіт 1970-х років, що стосуються багатоканальних цифрових систем передачі та інтерференції (перехресних перешкод) між парами проводів в кабельному зв'язці: AR Kaye і DA George (1970), Branderburg and Wyner (1974) і W. van Etten (1975, 1976) [1]. Хоча це не є прикладами використання багатопроменевого поширення для передачі декількох інформаційних потоків, деякі математичні методи усунення взаємних перешкод виявилися корисними для розробки МІМО. В середині 1980-х Джек Зальц з Bell Laboratories просунув це дослідження ще далі, досліджуючи розраховані на великі потоки користувачів системи, що працюють за «взаємно-перехресно пов'язаних лінійних мережах з адитивними джерелами шуму», такими як мультиплексування з тимчасовим поділом і системи радіозв'язку з подвійною поляризацією.

На початку 1990-х років були розроблені методи підвищення продуктивності стільникових радіомереж і забезпечення більш агресивного повторного використання частот. Множинний доступ з просторовим розділенням каналів (SDMA) використовує спрямовані або інтелектуальні антени для зв'язку на одній і тій же частоті з користувачами в різних місцях та межах діапазону однієї і тієї ж базової станції. Система SDMA була запропонована Річардом Роєм і Бьюорном Оттерстеном, дослідниками з ArrayComm, в 1991 році. В їх патенті США (№ 5515378, виданому в 1996 році) описаний метод збільшення пропускної спроможності з використанням «масиву прийомних антен на базовій станції» з «безліч віддалених користувачів».

Технологію МІМО можна віднести до досить молодих розробок. Перші дослідження та розробки проходили в компанії Bell Laboratories, а у 1996 році

компанією Airgo Networks був випущений перший MIMO-чипсет під назвою True MIMO. Найбільший розвиток технологія MIMO отримала на початку XXI століття, коли бурхливими темпами почали розвиватися бездротові мережі Wi-Fi і стільникові мережі 4G. А зараз технологія MIMO щосили використовується в мережах 4G LTE і Wi-Fi 802.11b / g / ac, а також в майбутніх мережах 5G і Wi-Fi 6.

Арогьясвами Паулрадждж і Томас Кайлат запропонували метод зворотного мультиплексування на основі SDMA в 1993 році. В їх патенті США (№ 5,345,599, виданому в 1994 р) описаний метод мовлення з високою швидкістю передачі даних шляхом поділу високошвидкісного сигналу «на кілька повільніших сигналів». Передаватися від « просторово розділених передавачів » і відновлюватися приймаючої антеною на основі відмінностей в « напрямках приходу ». Полрадждж був нагороджений престижною премією Марконі в 2014 році за його новаторський внесок в розвиток теорії і додатків антен MIMO. Його ідея використання декількох антен як на передавальних, так і на приймальних станціях – що є основою нинішнього максимуму, високошвидкісних мобільних систем Wi-Fi і 4G – революція в області високошвидкісного бездротового зв'язку.

У квітневій статті 1996 року і подальшому патенті Грег Релі запропонував використовувати природне багатопроменеве поширення для передачі декількох незалежних інформаційних потоків з використанням суміщених антен і багатовимірної обробки сигналів. У документі також визначено практичні рішення для модуляції (MIMO-OFDM), кодування, синхронізації і оцінки каналу. Пізніше в тому ж році (вересень 1996 г.) Джерард Дж. Фошина представив доповідь, в якому також припустив, що можна збільшити пропускну здатність бездротового зв'язку, використовуючи те, що автор назвав «багаторівневою просторово-часовою архітектурою».

Грег Релі, В.К. Джонс і Майкл Поллак заснували Clarity Wireless в 1996 році, побудували і протестували прототип системи MIMO. Cisco Systems придбала Clarity Wireless в 1998 році. Bell Labs побудувала лабораторний прототип, що демонструє технологію V-BLAST (Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time) в 1998 році. Арогьясвами Полраджд заснував Iospan Wireless в кінці 1998 року для розробки продуктів MIMO-OFDM. Iospan була придбана Intel в 2003 році. V-BLAST ніколи не продавався, і ні Clarity Wireless, ні Iospan Wireless не поставляли продукти MIMO-OFDM до того, як були придбані.

Технологія MIMO стандартизована для бездротових локальних мереж, мереж мобільного зв'язку 3G і мереж мобільного зв'язку 4G і в даний час широко використовується в комерційних цілях. Грег Релі і В.К. Джонс заснували Airgo Networks у 2001 році для розробки наборів мікросхем MIMO-OFDM для бездротових локальних мереж. В кінці 2003 року Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) створив робочу групу для розробки стандарту бездротової локальної мережі, що забезпечує швидкість передачі призначених для користувача даних не менше 100 Мбіт / с. Було дві основних конкуруючих пропозиції: TGn Sync підтримали такі компанії, як Intel і Philips, A WWiSE підтримали такі компанії, як Airgo Networks, Broadcom і Texas Instruments. Обидві групи погодилися, що стандарт 802.11n буде заснований на MIMO-OFDM з варіантами каналів 20 МГц і 40 МГц. TGn Sync, WWiSE і третє речення (MITMOT, підтримуване Motorola і Mitsubishi) були об'єднані в так зване Спільна пропозиція. У 2004 році Airgo стала першою компанією, яка почала поставляти продукцію MIMO-OFDM. Qualcomm придбала Airgo Networks в кінці 2006 року. Останній стандарт 802.11n підтримував швидкість до 600 Мбіт/с (з використанням чотирьох одночасних потоків даних) і був опублікований в кінці 2009 року.

Сурендра Бабу Мандава і Арогьясвами Полраджд заснували Veeem Communications в 2004 році для виробництва наборів мікросхем MIMO-OFDM

для WiMAX. Компанія була придбана Broadcom в 2010 році. WiMAX був розроблений як альтернатива стільниковим стандартам, заснований на стандарті 802.16e і використовує MIMO-OFDM для забезпечення швидкості до 138 Мбіт/с. Більш просунутий стандарт 802.16m забезпечує швидкість завантаження до 1 Гбіт/с. Загальнонаціональна мережа WiMAX була побудована в США компанією Clearwire, дочірньою компанією Sprint-Nextel, і до середини 2012 року охоплювала 130 мільйонів точок присутності (PoP). Згодом Sprint оголосила про плани розгорнути LTE (стандарт стільникового зв'язку 4G) в 31 місті до середини 2013 року і закрити свою мережу WiMAX до кінця 2015 року.

Перший стільниковий стандарт 4G був запропонований NTT DoCoMo в 2004 році. Довгострокова еволюція (LTE) заснована на MIMO-OFDM і продовжує розвиватися в рамках проекту партнерства третього покоління (3GPP). LTE визначає швидкість приймання мережі до 300 Мбіт/с, швидкість вихідного каналу до 75 Мбіт / с і параметри якості обслуговування, такі як низька затримка. LTE Advanced додає підтримку пікосоти, фемтосот і каналів з декількома несучими шириною до 100 МГц. LTE підтримали оператори GSM / UMTS і CDMA.

Перші послуги LTE були запуснені в Осло і Стокгольмі компанією TeliaSonera в 2009 році. В даний час діє більше 360 мереж LTE в 123 країнах з приблизно 373 мільйонами підключень (пристроїв).

1.2 Еволюція MIMO

До того моменту, коли технологія MIMO була специфікована в релізі, йшло активне поширення по світові стандарту 3G. Були спроби поєднати мережі третього покоління з технологією MIMO, але широкого розповсюдження вони не отримали. За даними Всесвітньої Асоціації Постачальників Мобільного Устаткування (Global mobile Suppliers Association,

GSA) від 04.11.2010 на той момент з 2776 типів пристроїв з підтримкою HSPA, представлених на ринку, тільки 28 моделей підтримують MIMO. До того ж впровадження MIMO мережі з низьким проникненням MIMO-терміналів призводить до зниження пропускної здатності мережі. Компанія Nokia розробила технологію для мінімізації втрат пропускної здатності, але вона показала б свою ефективність тільки в тому випадку, коли проникнення MIMO-терміналів склала б не менше 40% абонентських пристроїв. Додаючи до вище сказаного, варто нагадати, що 14 грудня 2009 року відбувся запуск першої в світі мобільної мережі на базі технології LTE, яка дозволяла досягти набагато більш високих швидкостей. Виходячи з цього видно, що оператори були націлені на найшвидше розгортання мереж LTE, ніж на модернізацію мереж третього покоління.

На сьогоднішній день можна відзначити бурхливе зростання обсягу трафіку в мережах рухомого зв'язку 4 покоління, і щоб забезпечити необхідну швидкість всім своїм абонентам, операторам доводиться шукати різні методи щодо підвищення швидкості передачі даних або щодо підвищення ефективності використання частотного ресурсу. MIMO ж дозволяє в наявній смузі частот передавати майже в 2 рази більше даних за той же часовий проміжок при варіанті 2x2. Якщо ж використовувати антенну реалізацію 4x4, то, на жаль, максимальна швидкість завантаження інформації складе 326 Мбіт/с, а не 400 Мбіт/с, як передбачає теоретичний розрахунок. Це пов'язано з особливістю передачі через 4 антени. Кожній антені виділені певні ресурсні елементи (RE) для передачі опорних символів. Вони необхідні для організації когерентної демодуляції і оцінки каналів.

1.3 Робота технології MIMO

Найчастіше, технологія MIMO використовується в Wi-Fi [5]. Користуючись цією технологією швидкість передачі даних зростає до 300 Мегабіт в секунду. До того ж, завдяки MIMO – бездротова мережа стала швидше передавати інформацію навіть там, де рівень прийому сигналу мінімальний. Так само, як і в Wi-Fi, в 4G швидкість перевищила поріг 300 Мегабіт в секунду.

Головна перевага MIMO – відмінне і стабільне з'єднання навіть на великій відстані від станції.

Так в чому полягає сенс технології MIMO? Другими словами: розподілив потік на декілька каналів можна пустити їх різними шляхами через кілька антен, і прийняти їх такими ж антенами. Якщо ми будемо передавати по двох каналах MIMO одну і ту ж інформацію з невеликою затримкою, закодувавши її попередньо, ми можемо відновити втрачені символи на приймальній стороні, що еквівалентно покращенню відношення сигнал / шум до 10-12 дБ. Така технологія призводить до зростання швидкості.

Для поділу каналів застосовується поляризація. У мережах WI-FI технологія MIMO працює в стандартах IEEE 802.11n і IEEE802.11ac і підтримується вже багатьма пристроями. В темі, пов'язаної з MIMO є такий термін, як кабельні збірки. Кабельні збірки – це кабель, який з'єднує антену і передавальний пристрій (модем, роутер). Для правильного вибору кабельної збірки, потрібно точно знати відстань від антени до пристрою. У збірку входять кабель і два роз'єми.

Є ще такий термін, як поляризація. Поляризація хвиль. Хвилі, у яких напрями електричного і магнітного полів зберігаються незмінними в просторі або змінюються за певним законом, називаються поляризованими.

Поляризація буває похилою, вертикальною, горизонтальною, обертальною

Розрізняють 3G і 4G антени.

Зовнішні антени застосовуються в наступних випадках:

- швидкість з'єднання нижче, ніж заявив оператор;
- нестійка зв'язок;
- слабкий сигнал або його повна відсутність.

Антени бувають декількох видів: панельні, стаціонарні, кругові, мульти-стандартні, універсальні, спрямовані, всюди-спрямовані, секторні та багато інших.

При виборі антени потрібно знати такі характеристики як:

- робочий діапазон частот (МГц);
- посилення;
- вхідний опір;
- передавання вперед / назад;
- рівень бічних пелюсток;
- допустима потужність;
- поляризація;
- матеріал корпусу;
- матеріал випромінювача;
- до яких пристроїв підходить.

Кожна з характеристик важлива при виборі антени. Розглянемо деякі з них докладніше, для того, щоб правильно вибрати антену.

Вхідним опором антени є ставлення напрямки на затискач до електрики на вході фідера. Величину цього опору потрібно обов'язково знати, так як необхідно правильно поєднати антену і кабель. Вхідний опір антени має активні і реактивні частини.

Робочий діапазон частот – це визначення вимог до ширини смуги пропускання антени.

Ми живемо у вік інновацій. У добу, коли кожен день, створюється щось нове, корисне і унікальне. Технологія МІМО, якраз є однією з інновацій.

1.4 Дослідження продуктивності МІМО систем п'ятого покоління в неселективному каналі Релея

Відомі основні принципи мобільних мереж п'ятого покоління, впровадження яких в світову практику йде з 2020 року [3]. У зв'язку з цим виникає інтерес до методів реалізації основних положень майбутнього покоління. Серед основних положень особливе місце займає продуктивність мереж, оскільки стрімко зростає як кількість користувачів, так і питомий обсяг інформації, на одну особу. До теперішнього часу виникли нові напрямки, які потенційно при певних умовах можуть забезпечити істотне зростання продуктивності. До них слід віднести технології в рамках системи МІМО (Multiple-Input-Multiple-Output). Ця система з безліччю антен на передавальному та приймальних боках добре зарекомендувала себе в боротьбі з деградацією характеристик мереж в міських умовах, викликаних великою кількістю променів. В рамках системи були розроблені технології, що дозволяють покращувати характеристики зв'язку при певних параметрах каналу. До них відносяться:

- уявлення МІМО у вигляді паралельних каналів SISO (Simple-input-Multiple-output);
- просторове мультиплексування (Spatial Multiplexing – SMX);
- просторово-часове кодування (Space Time Coding – STC);
- просторова модуляція сигналів (Spatial Modulation – SM);

– технологія вибору передавальної антени в послідовності випромінювачів сигналів (Transmit Antenna Selection – TAS).

Найбільший інтерес представляють нові, найменш вивчені, напрямки 4 і 5 в порівнянні з технологіями 1 – 3 при дослідженні продуктивності і завадостійкості мереж MIMO в міських умовах. Мережі та канали з щільною міською забудовою, включаючи канали всередині приміщень, відносяться до плоских каналів при передачі сигналу з вузькосмуговою модуляцією, до яких відносяться M-ічні сигнали. Однак ці ж канали при передачі широкосмугових сигналів OFDM, WCDMA відносяться до частотно-селективних. При аналізі мереж MIMO необхідно враховувати умови поширення сигналів і застосовності мереж до цих умов. Нижче будуть розглянуті системи MIMO стосовно частотно-незалежних каналів. Завданням аналізу є пошук оптимальних умов реалізації MIMO, що забезпечують найбільшу ємність системи та необхідний рівень завадостійкості.

Розглянемо розкладання системи MIMO на паралельні канали. Канальна модель системи MIMO в умовах частотно-незалежного багатопроменевого каналу в матричній формі описується рівнянням:

$$Y = Hx + n, \quad (1.1)$$

де Y є матриця-стовпець сигналів приймача, що описує ансамбль сигналів на елементах приймальної решітки;

x – матриця-стовпець сигналів передавача, що описує ансамбль сигналів, випромінюваним кожним з елементів передавальної решітки;

n - матриця-стовпець адитивних шумів приймача і перешкод, створених розсіювальною середою в просторі між передавачем і приймачем;

H - прямокутна комплексна матриця каналу розмірності $M \times N$. Компонент цієї матриці є комплексний коефіцієнт передачі каналу між j -ою передавальною

антенною і i -ою приймальною антенною. При цьому, M – кількість антен в приймальній решітці, N – кількість антен в передавальній решітці.

На рисунку 1.1 представлена схема променів, що зв'язує передавальну і приймальну антенні решітки.

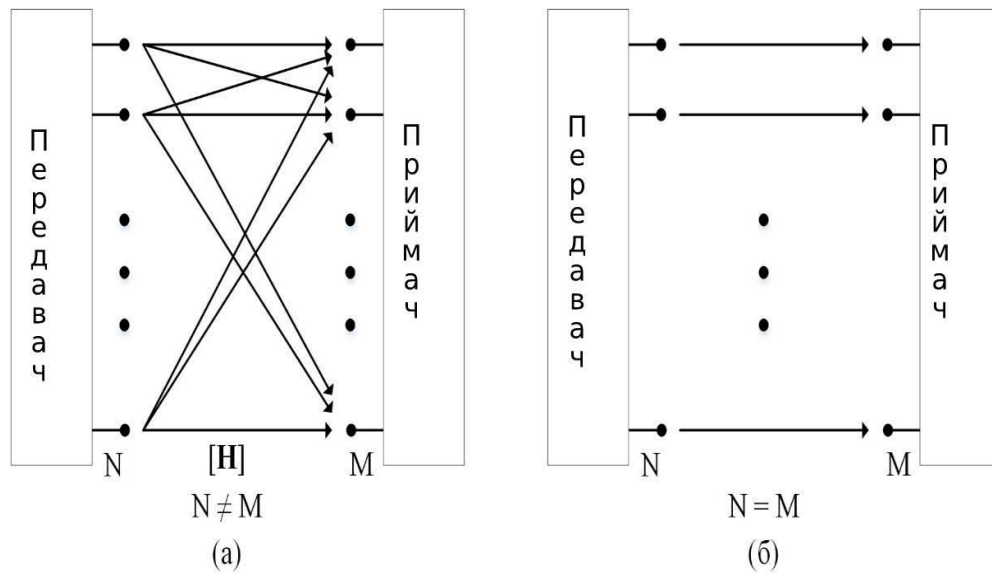


Рисунок 1.1 — Система MIMO

Перетворення складної системи потоків в систему паралельних потоків від передавача до приймача (рис. 1б) здійснюється відомим з теорії матриць сингулярним розклад матриці H у вигляді:

$$H = U \Sigma V^H \quad (1.2)$$

У цьому рівнянні U і V унітарні матриці розмірів $M \times M$ і $N \times N$ відповідно $U^H U = 1_M$ та $V^H V = 1_N$, і Σ – є діагональна матриця сингулярних значень d_j матриці H розміром $M \times N$. Відомо, що сингулярні значення d_j і власні значення λ_j пов'язані співвідношенням:

$$d_j = \sqrt{\lambda_j} \quad (1.3)$$

Кількість антенних елементів на передавачі і приймачі, як правило, різняться ($M \neq N$). Приклад – базова і мобільна станції. Випромінювання N антен розподіляється на M прийомних антен. Щоб уявити реальний канал у вигляді віртуальних паралельних каналів SISO, необхідно допустити рівність антен передавача і приймача. Цією рівністю є мінімальне число M або N , яке в математичних моделях є рангом каналної матриці. В результаті перетворень показано, що кожен елемент вектору y_i може бути представлений таким чином:

$$y_i = \sqrt{\lambda} * X_i + [U^H n]_i \quad (1.4)$$

Це рівняння характерно тим, що має тільки відповідні промені від передавача до приймача. Відсутні каналні промені h_{ij} . Тобто MIMO канали перетворені в віртуальні паралельні SISO канали.

Коли інформація про канали відсутня на передавачі, потужність передавача зазвичай рівномірно розподіляється по випромінюючих елементах антенної решітки. Однак, коли інформація відома передавачеві, потужність передавача може бути оптимально розподілена по випромінюючим некорельованим елементам з метою максимально збільшити спектральну ефективність. Цей спосіб називається алгоритмом «заповнення водою» (water-filling algorithm). Цей алгоритм дозволяє сконцентрувати випромінювальну потужність тільки в «хороших» просторових каналах і не витратити енергетичні ресурси передавача на спроби передати інформацію через «погані» просторові канали. «Хороші» канали – це канали, які мають високу ЗСШ, «погані» –

навпаки. В результаті застосування цього алгоритму оптимальна спектральна ефективність визначається формулою:

$$\eta = \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{p_i}{\sigma^2} \lambda_i \right) = \sum_{i=1}^N \log_2 \left(\left(\bar{Y} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\lambda_i} \right) \frac{\lambda_i}{N} \right) \quad (1.5)$$

Розкладання на паралельні віртуальні потоки – це одна з стратегій збільшення ємності системи MIMO. Істотний вплив, що обмежують її можливості, надає кореляція сигналів на передавальній і приймальній антенних решітках.

Коваріаційні матриці ансамблів сигналів на елементах приймальних і передавальних антенних решіток R_y і R_x відповідно, запишемо у вигляді:

$$R_y = E\{yy^H\} = HR_xH^H + \sigma_n^2 \mathbf{1}_n \quad (1.6)$$

У цьому рівнянні надрядковий індекс N означає ермітове сполучення, символ E означає математичне очікування (середнє значення) випадкової величини, розташованої в фігурних дужках.

Розкладання MIMO на паралельні віртуальні канали SISO дозволяє збільшити ємність системи. Нормалізована на один Герц частоти ємність системи MIMO, тобто спектральна ефективність η некорельованих передавальних сигналів визначається рівнянням:

$$\eta = \log_2 \left| I_N + \frac{1}{\sigma^2} HR_xH^H \right| = \log_2 \left| I_M + \frac{1}{\sigma^2} R_x H^H H \right| \quad (1.7)$$

Це вихідні рівняння, на підставі яких визначаються формули і алгоритми, що оптимізують спектральну ефективність системи при різних умовах.

Цей висновок слід розглядати лише як напрямок для оцінки ємності системи МІМО. Однак при оцінці виникає кілька умов, які дають різні результати. До цих умов відносяться:

- а) чи відомі параметри каналу передавача чи ні, вважаючи, що вони завжди відомі приймачу;
- б) співвідношення кількості антен передавача і приймача;
- в) кореляційні властивості каналу, передавача і приймача.

До них слід додати просторово-часові коди передавача і способи обробки сигналів в приймачі. Перші три умови прийняті до уваги при подальшому дослідженні. Обробка сигналів в приймачі прийнята найкраща – MRC (Maximal Ratio Combining).

При нерівному числі антен на передавачі і приймачі вектор r , що визначає розподіл амплітуд сигналів в приймальній решітці на підставі рівняння, визначається співвідношеннями:

$$r = H^H y = H^H H x + \bar{n}. \quad (1.8)$$

У цьому рівнянні вектор r має порядок $N \times 1$. Звернемо увагу на матрицю $H^H H$. Ця матриця так само, як і матриця $H H^H$, використовується при моделюванні умов МІМО. Так як матриця H має порядок $M \times N$, то матриця $H H^H$ має порядок $M \times M$, а, матриця $H^H H$ – порядок $N \times N$. Порядок матриці визначає кількість власних значень матриці, причому, кількість ненульових значень (ранг матриці) визначається властивостями каналу і може дорівнювати одиниці, якщо сигнали повністю корельовані.

Матриці $H^H H$ і $H H^H$ відносяться до типу матриць Уїшарт (Wishart), що характеризують багатовимірні хі-квадрат розподілу. Ці матриці мають різні коваріаційні матриці, елементи яких визначаються відстанями між сусідніми випромінюючими елементами передавальної і приймальної антенних решіток.

Відмінність цих матриць один від одного дозволяє оцінювати ємність системи при різних значеннях числа антен на передавачі та приймачі.

На підставі рівнянь і обумовлених властивостей, які їх супроводжують, отримані оцінки ємності каналу МІМО для випадку незалежності променів на елементах приймальної решітки.

Середня місткість визначається рівнянням:

$$E(\eta) = \sum_{i=1}^n E \left[\log_2 \left(1 + \frac{\bar{y}}{N} \lambda_i \right) \right] = \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} \log_2 \left(1 + \frac{\bar{y}}{N} \lambda_i \right) f_{\lambda_i}(\lambda_i) d\lambda_i \quad (1.9)$$

Іншою важливою характеристикою каналу є гарантована ємність (outage capacity). Ця характеристика визначає ймовірність, що ємність нижче заданого граничного рівня:

$$P(\eta < \eta_{out}) = P(\log_2 \prod_{i=1}^n (1 + \frac{\bar{y}}{N} \lambda_i) < \eta_{out}) = P(\prod_{i=1}^n (1 + \frac{\bar{y}}{N} \lambda_i) < 2^{\eta_{out}}) \quad (1.10)$$

При плануванні мережі та визначенні меж стільники зручно користуватися саме цією характеристикою.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1 Структура MIMO

У різних реалізаціях MIMO мається на увазі одночасна передача в одному фізичному каналі кількох незалежних повідомлень [4]. З метою реалізації дії MIMO застосовують багато-антенні системи: на передавальній стороні є N_t передавальних антен, а на приймальній стороні N_r приймальних. Дана структура приведена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Найпростіша антена MIMO

Такий кут поляризації дозволяє каналам перебувати в рівних умовах, оскільки при горизонтально-вертикальній орієнтації випромінювачів одна з поляризаційних складових неминуче отримала б більше загасання при поширенні уздовж земної поверхні. Сигнали, випромінювані незалежно кожним монополю, поляризовані взаємно ортогонально з досить високою взаємною розв'язкою по крос-поляризаційній складовій (не менше 20 дБ). Аналогічна антена використовується і на приймальній стороні. Такий підхід дозволяє одночасно передавати сигнали з однаково-несучими, модульованими по-різному.

Принцип поляризаційного поділу забезпечує подвоєння пропускну здатності лінії радіозв'язку в порівнянні з випадком одиночного монополя (в

ідеальних умовах прямої видимості при ідентичною орієнтації приймальних і передавальних антен).

Таким чином, по суті будь-яку систему з подвійною поляризацією можна вважати системою МІМО.

2.2 Основні відомості про антени

Вся бездротова передача даних заснована на процесі поширення електромагнітного поля від джерела в навколишній простір [2]. Антена грає роль цього джерела поля. Сам процес випромінювання починається з того, що під дією високочастотних електромагнітних полів в випромінюючій системі (антені) з'являються сторонні струми і заряди. Токи і заряди в свою чергу підводяться від генератора по фідерному тракту (або фідера від слова "to feed" – живити).

Таким чином, в систему випромінювання електромагнітного поля входять: генератор коливань, фідер і випромінювач. Звичайно, сам фідер і генератор безпосередньо в випромінюванні не беруть участь (або точніше – не повинні брати участь, якщо вони правильно сконструйовані), рисунок 2.2.

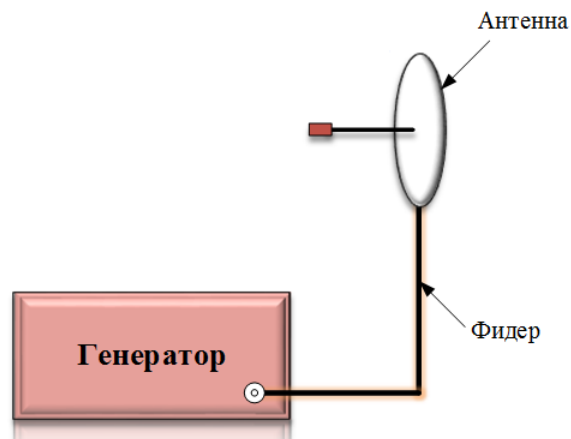


Рисунок 2.2 — Структура антени

Будь-яка антена має так званий принцип "подвійності", який говорить про те, що будь-яка антена може бути як передавальною (тобто перетворювати хвилі лінії передачі в розхідні по навколишньому просторі хвилі), так і приймальні (здійснювати зворотне перетворення).

Незалежно від реалізації і виду антени, вона характеризується наступними основними параметрами:

Діаграма спрямованості (ДС). Цей розподіл напруженості (або енергії) поля в просторі, показує в яких напрямках і з якою потужністю випромінює антенна система. Будується ця залежність, як правило, в сферичній системі координат. Залежно від виду діаграми (від того, наскільки діаграма "гостра") розрізняють ізотропні антени, слабо-направленні, високо-направленні. Від виду діаграми спрямованості залежать такі важливі характеристики антени як коефіцієнт спрямованої дії (КСД) і коефіцієнт посилення (КП). Нижче ми розглянемо вид діаграми спрямованості, а також КСД і КП однією з самої простих антен в різних площині.

Коефіцієнт корисної дії антени. Він повинен бути досить високим, а втрати – малими, саме з цієї причини при реалізації антен використовують металеві конструкції, що володіють високою провідністю і діелектрики з малими втратами.

Узгодження лінії передачі з навантаженням. Так як і передавальна і приймальна антени з'єднуються з лінією живлення, то її вхідний опір має бути погоджено з хвильовим опором лінії. Інакше виникатиме небажане виникнення відбитих хвиль, а наявність останніх – це завжди зменшення випромінюваної потужності і джерело додаткових перешкод.

Вага і габарити. Ясно, що при реалізації будь-якого пристрою потрібно прагнути до отримання його найменших масштабних розмірів, проте, відзначимо, що розміри антени однозначно пов'язані з основною довжиною хвилі, на якій працює антена. Взагалі в антенній техніці не існує поняття

"велика" і "маленька" антена. Розміри антени прийнято характеризувати в довжинах хвиль. Якщо a – це діаметр дзеркала (наприклад, дзеркальної антени), то її розмір можна записати так: це означає, що в діаметр дзеркала укладається 8 довжин хвиль. Якщо таке дзеркало працює в діапазоні 2.4 ГГц (довжина хвилі 12,5 см), то його діаметр становитиме 1 метр, а якщо це діапазон 900 МГц (довжина хвилі 33 см) – то діаметр вже більше 2.5 метрів (рисунок 2.3).

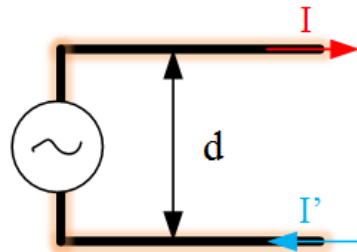


Рисунок 2.3 – Подвійно-спрямована лінія

Випромінювання буде відсутнє за рахунок того, що струми I і I' знаходяться в протифазі, що призводить їх до взаємної компенсації. Для отримання випромінювання можна розвести кінці подвійно-направленої лінії, щоб поля від струмів I , I' не могли компенсувати один одного (рисунок 2.4).

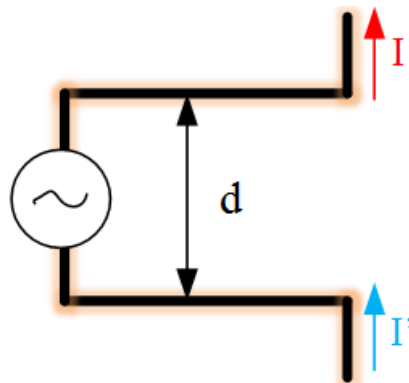


Рисунок 2.4 — Розімкнута подвійно-направлена лінія

Така антена отримала назву симетричного вібратора. Розподіл струму в вібраторі залишається таким же, яким воно було на відповідній ділянці подвійно-направленої лінії. Для дослідження поля, що випромінюється антенами з проводів, зручно представляти таку антену у вигляді сукупності елементарних електричних вібраторів (ЕЕВ) малої довжини (малої в порівнянні з довжиною хвилі). У межах кожного такого елементарного вібратора амплітуду і фазу струму можна вважати незмінними. В кінцевому підсумку загальна поле, випромінювання антен, можна розрахувати як суму полів, що випромінювали окремими елементарними вібраторами (в теорії це називається принцип суперпозиції).

На практиці ЕЕВ реалізується у вигляді диполя Герца. Ця антена є першим реалізованим випромінювачем електромагнітних коливань (рисунок 2.5).

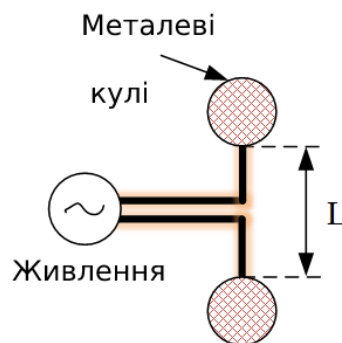


Рисунок 2.5 — Диполь Герца

Такий випромінювач можна зробити, якщо на кінцях тонких проводів (довжиною L , меншої довжини хвилі) встановити з'єднуючі тіла з великою ємністю (наприклад, металеві кулі). Заряджені кулі створюють струми, які значно вище ємнісних струмів між проводами. Так забезпечується рівномірний

розподіл струму вздовж провідника. Відзначимо, що на практиці диполь Герца практично не використовується.

2.3 Антенні технології

Антенні технології в багато антенних MIMO системах можна розділити на два види: традиційні методи, що включають просторове мультиплексування і просторово-часове кодування та нові методи, що включають просторову модуляцію із селекцією передавальних.

У першому випадку (просторове мультиплексування, наприклад, BLAST) два символи одночасно випромінюються в одному часовому слоті. При цьому, спектральна швидкість в каналі визначається рівнянням $R_{BLAST} = N_r \log_2 M$ bpcu (bits per channel use), M – порядок модуляції M-PSK / M-QAM, N_t – число випромінювачів в антенній решітці передавача.

У разі просторово-часового кодування, наприклад, схема Аламоуті, два ортогональних символи одночасно випромінюються в два тимчасових слота. При цьому $R_{AL} = \log_2 M$, bpcu.

Нові методи вимагають більш детальних пояснень. Стосовно до двох антен просторова модуляція працює просто: біт 1 випромінює активна антена, біт 0 інша антена не випромінює. При передачі послідовного потоку з одиниць і нулів антени перемикаються, як клавіші на піаніно. При двох антенах виграш малий, не більше 3 дБ, але, чим більше число передавальних антен, тим більше виграш в продуктивності і в завадостійкості. Припустимо, що з n передавальних антен в решітці m різних антен є активними, причому кожна активна антена має свій кодовий набір нулів і одиниць. Число комбінацій з n по m визначається співвідношенням:

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!} \quad (2.1)$$

Так наприклад, $C_4^2 = 6$; $C_6^3 = 20$; $C_8^4 = 70$. Число комбінацій стрілко зростає з ростом числа передавальних антен, частина з яких є активними. Цей фактор, який впливає з теорії просторової модуляції, призводить до виграшу основних характеристик системи МІМО, в тому числі економічної ефективності системи. Цей важливий параметр має тенденцію зменшуватися з ростом спектральної ефективності при традиційних технологіях МІМО. Просторова модуляція особливо ефективна в міліметровому діапазоні, як планують в 5G, при антенах з багатьох десятків випромінювачів, підтримуючи 4-5 активних.

Чому ця технологія називається просторової модуляцією? Цю назву вона отримала, доповнюючи плоску зоряну діаграму комплексного сигналу просторової координати активних випромінювачів, що створює тривимірну просторову діаграму.

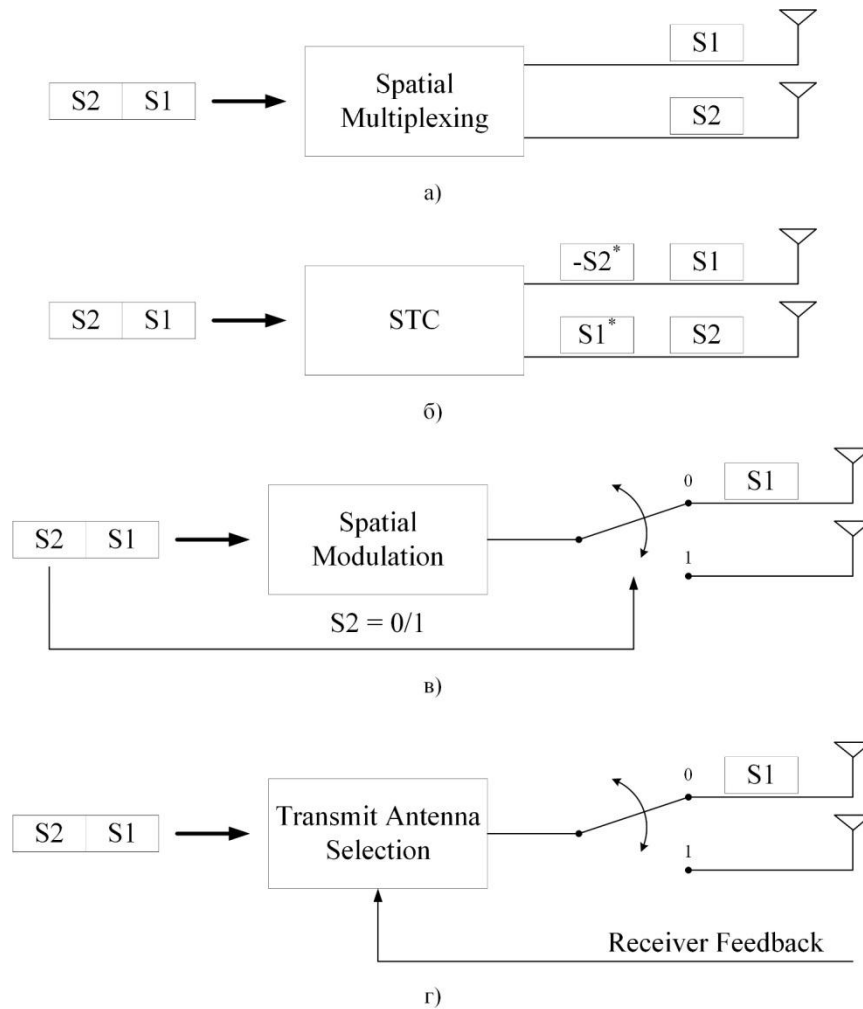


Рисунок 2.6 — Методи антенних технологій

Метод селекції передавальних антен (TAS – Transmit Antenna Selection) полягає в тому, що антенна система представляється у вигляді обраної послідовності одиночних випромінювачів інформаційних сигналів. Вибір випромінювача здійснюється на основі параметрів каналу, наприклад, «хорошого каналу», який визначається приймальною антеною решіткою і по зворотному каналу передається передавачеві для вибору активної антени. Цей метод нагадує схему SIMO (одна передавальна антена і багато приємних) з MRC селективної обробкою в приймачі, але з істотним доповненням – обробка

сигналу проводиться не по одній спотвореній копії, а за кількома, що зменшує ймовірність помилки (рисунок 2.6).

Вибір технології з перерахованих вище визначається вимогами і умовами зв'язку.

2.4 Види антен

Анени бувають декількох видів: панельні, стаціонарні, кругові, мульти-стандартні, універсальні, спрямовані, всюди-спрямовані, секторні та багато інших.

Розрізняють 3G і 4G антени.

Зовнішні антени застосовуються в наступних випадках:

- а) швидкість з'єднання нижче, ніж заявив оператор;
- б) нестійка зв'язок;
- в) слабкий сигнал або його повна відсутність.

При виборі антени потрібно знати такі характеристики як:

- а) робочий діапазон частот (мГц) ;
- б) посилення;
- в) вхідний опір;
- г) ставлення вперед / назад;
- д) рівень бічних пелюсток;
- е) допустима потужність;
- ж) поляризація;
- з) матеріал корпусу;
- и) матеріал випромінювача;
- к) до яких пристроїв підходить.

Кожна з характеристик важлива при виборі антени.

Вхідним опором антени є ставлення напрямки на затискач до електрики на вході фідера. Величину цього опору потрібно обов'язково знати, так як необхідно правильно поєднати антену і кабель. Вхідний опір антени має активні і реактивні частини.

Робочий діапазон частот – це визначення вимог до ширини смуги пропускання антени.

Ми живемо у вік інновацій. У добу, коли кожен день, створюється щось нове, корисне і унікальне. Технологія MIMO, якраз одна з інновацій.

Розглянемо деякі антени докладніше.

Для прикладу візьмемо антени фірми Antex.

A) Потужна широко-смугова антена 3G / 4G / 2G / WIFI з підтримкою технології MIMO 2x2.

Підсилення 15-17,5 dBi.

Панельна антена AGATA MIMO 2x2 призначена для використання в комплекті обладнання бездротових систем передачі даних стандартів:

- 2G (EDGE, GPRS на частотах GSM1800);
- 3G (UMTS 2100);
- 4G (WIMAX, LTE1800, LTE2600);
- WI-FI (IEEE 802.11b, g, n) і в інших системах діапазону 1700–2700 МГц.

AGATA MIMO 2x2 є вузькою антеною і ідеально підходять для використання в системах зв'язку «точка-точка» і «точка-множинна». Антена являє собою конструкцію з двох просторово рознесених синфазних решіток з ортогональними поляризаціями.

Активні випромінювачі антени надійно укріті від опадів у пластиковий корпус, котрий захищений від ультрафіолету. Входи антени мають коротке замикання по постійному струму між зовнішнім і внутрішнім провідниками, що знижує ймовірність накопичення статичної електрики на вході модему і робить необов'язковим застосування грозозрядників (при невеликій довжині

з'єднувального фідера між модемом і антеною). Кріплення дозволяє закріпити антену на вертикальній трубі, передбачено регулювання кута нахилу антени. Також завдяки конструкції кріплення можливо плавну зміну нахилу поляризації.

Б) Першою універсальною виносною антеною є Nitsa-5 MIMO 2x2 з підтримкою LTE-A (до 300 Мб/с). Nitsa-5 MIMO 2x2 призначена для використання в комплекті зі стільниковими телефонами, модемами або репітерами стандартів LTE800 / GSM900 / GSM1800 / UMTS900 / UMTS2100 / WIFI2400 / LTE2600. Активні випромінювачі антени укріті в пластиковий корпус. Кріплення дозволяє змінювати кут нахилу антени і нахил поляризації. Рекомендується до використання на відстанях до 10 км від базової станції. Завдяки підтримці технології MIMO, дана антена буде універсальним рішенням для будь-якого швидкісного стандарту.

В) Універсальна панельна антена 15-17 dBi (1.7-2.7ГГц).

Панельна антена AGATA MIMO 2x2 BOX з герметичним боксом для USB 3G / 4G модему є готовим рішенням для посилення сигналу 2G / 3G / LTE. Тип антени – синфазна решітка. Рекомендується для використання на кордонах зон обслуговування, при слабкому і нестійкому рівні сигналу. Завдяки застосуванню USB-подовжувача з кабелю типу FTP CAT5 стало можливим виключити втрати сигналу на ділянці антена-модем.

Дане рішення дозволяє отримати вигреш в посиленні сигналу до 6 дБ, що може бути вирішальним фактором у поліпшенні зв'язку.

3 МАКЕТИНГ

3.1 NanoStation 2 – короткі відомості

NanoStation 2 – зовнішня точка доступу від компанії Ubiquiti Networks (UBNT), що працює в найпопулярнішому діапазоні 2.4 ГГц.

Надійна, проста конструкція NanoStation 2, перевірена часом, не вимагає температурного захисту при установці на вулиці. Інтегрована антена посиленням 10 dBi з програмною регулюванням поляризації (вертикальна / горизонтальна). У конструкції NanoStation 2 реалізований роз'єм для підключення зовнішньої антени. Живлення створене за схемою POE, полегшує установку. Вихідна потужність передавача 26 dBm (400 мВт). На рис. 3.1-3.2 зображено NanoStation 2: корпус, друкована плата та антена.



Рисунок 3.1 – Антена NanoStation 2

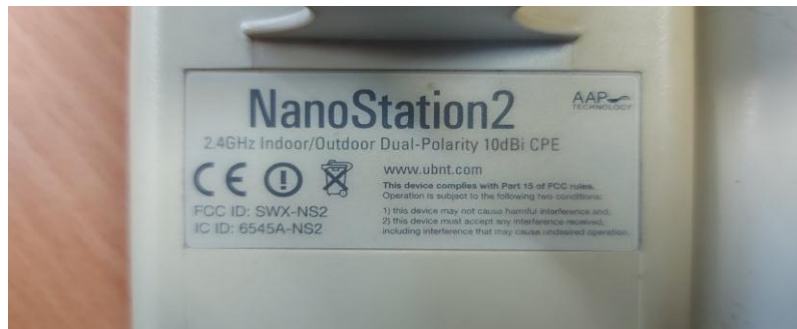


Рисунок 3.2 – Зображення шильдика

3.2 Проект ANSYS ELECTRONICS

ANSYS Electronics Desktop – це комплексна платформа, яка дозволяє інженерам-електротехнікам проектувати і моделювати різні електричні, електронні та електромагнітні компоненти, пристрої та системи [6]. В єдиному інтерфейсі ANSYS Electronics Desktop користувачі можуть створювати віртуальні електромагнітні та теплові моделі майбутніх пристроїв, встановлювати зв'язки між міждисциплінарними проектами, розробляти моделі системного рівня. В рамках робочого місця доступні всі передові розрахункові модулі, таким як ANSYS HFSS, ANSYS Maxwell, ANSYS Q3D Extractor і ANSYS Icepack з використанням електричних (ECAD) і механічних CAD (MCAD) геометричних моделей. Крім того, проект, створений в ANSYS Electronics Desktop може бути імпортований в простір ANSYS Workbench для проведення міждисциплінарних розрахунків з механічними, гідрогазодинамічними пристроями вирішення. Робоче місце в рамках одного інтерфейсу дозволяє працювати в 2D / 3D із кінцевими елементними моделями і симуляторами ланцюгів в режимі ко-симуляції.

Будь-які види розрахункових модулів можуть бути розміщені в одному проекті Electronic Desktop. Наприклад, можливо комбінувати в одному проекті

різні типи дизайну, такі як HFSS, Maxwell, Circuit або IcePak. Схеми можуть використовуватися для об'єднання різних моделей польових пристроїв вирішення і створення моделей більш високого рівня системи за допомогою динамічних посилань.

Робоче середовище ANSYS Electronics Desktop має всі необхідні розрахункові модуля ANSYS для вирішення електромагнітних завдань. Тісна інтеграція між модулями забезпечує безпрецедентну простоту настройки і використання при вирішенні складних завдань проектування і оптимізації. Це основне робоче місце для ANSYS HFSS, ANSYS Maxwell, ANSYS Q3D Extractor, ANSYS Twin Builder і т.д.

В системі ANSYS Electronics (рис. 3.3) для NanoStation 2 було вибрано такі матеріали:

- а) друкована плата – анодований алюміній;
- б) підкладка – склотекстоліт FR4;
- в) кріплення – пластик;
- г) антена – мідь.

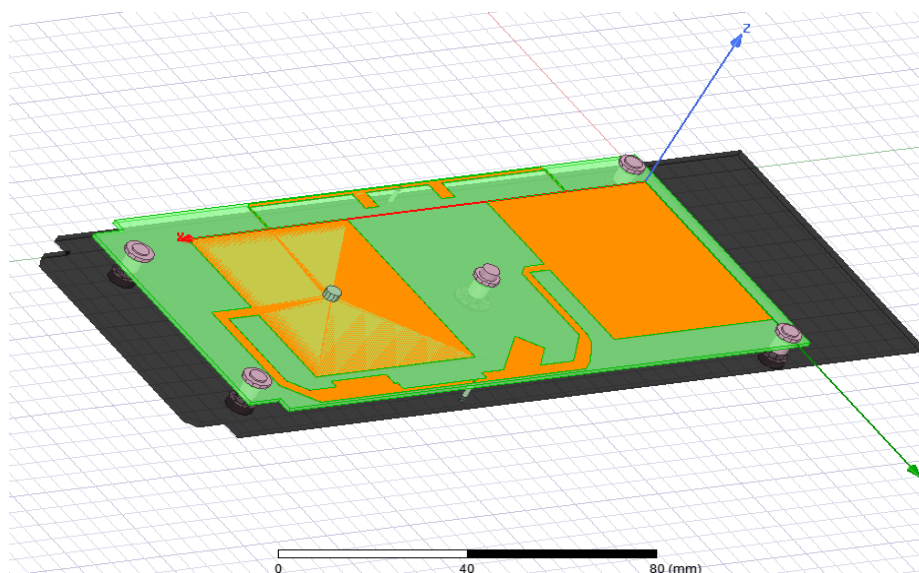


Рисунок 3.3 –Зображення антени в середовищі ANSYS ELECTRONICS

Розрахунок антени надав нам такі діаграми спрямованості (Рисунок 3.4)

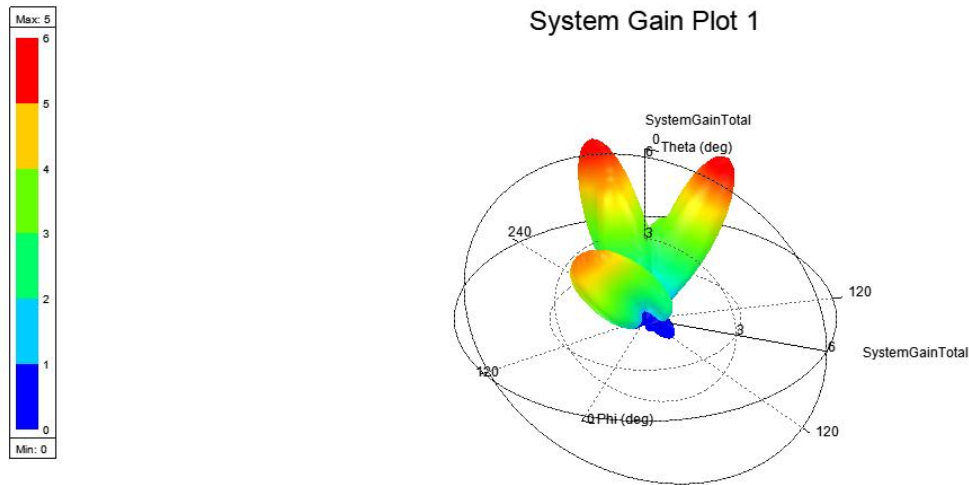


Рисунок 3.4 – Загальне підсилення антени

Загальне підсилення системи – це сумарне підсилення антеною плюс підсилення радіосистеми. Чистий вигравш системи – це величина вигравшу системи, що залишилася після вирахування ефекту вільного простору і всіх інших втрат при поширенні із загального вигравшу системи (Рис. 3.5, 3.6)

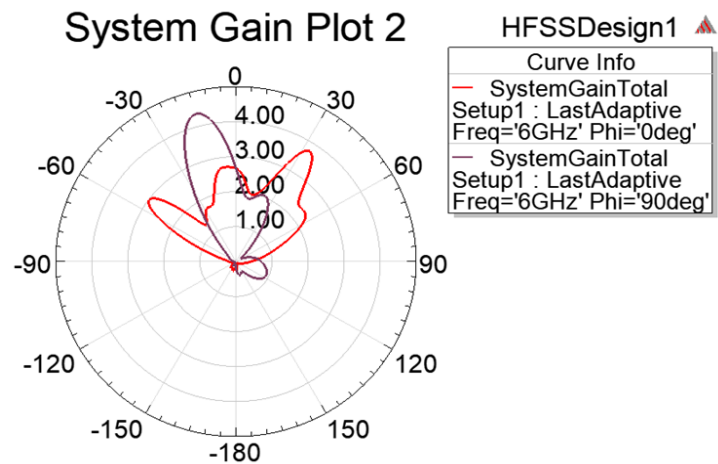


Рисунок 3.5 – Загальне підсилення антени

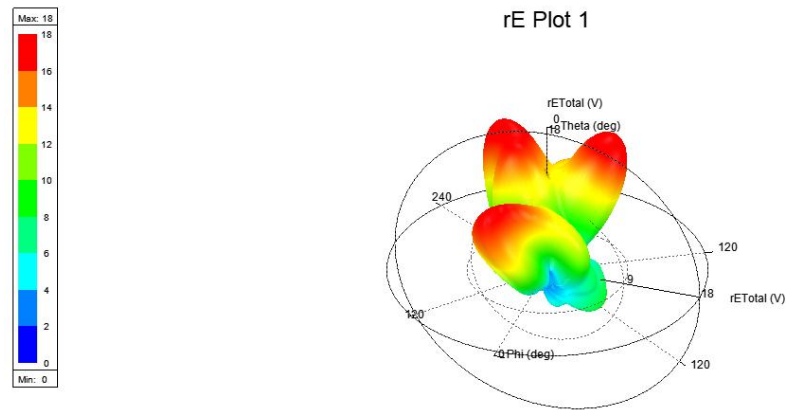


Рисунок 3.6 – Діаграма спрямованості антени NanoStation2

S-параметри описують реакцію мережі з N портами на сигнал (и), що надходить на будь-які або всі порти. Перше число в нижньому індексі відноситься до порту відповіді, а друге число відноситься до порту інциденту. Таким чином, S_{21} означає відповідь порту 2 через сигналу порту 1 (Рисунок 3.7).

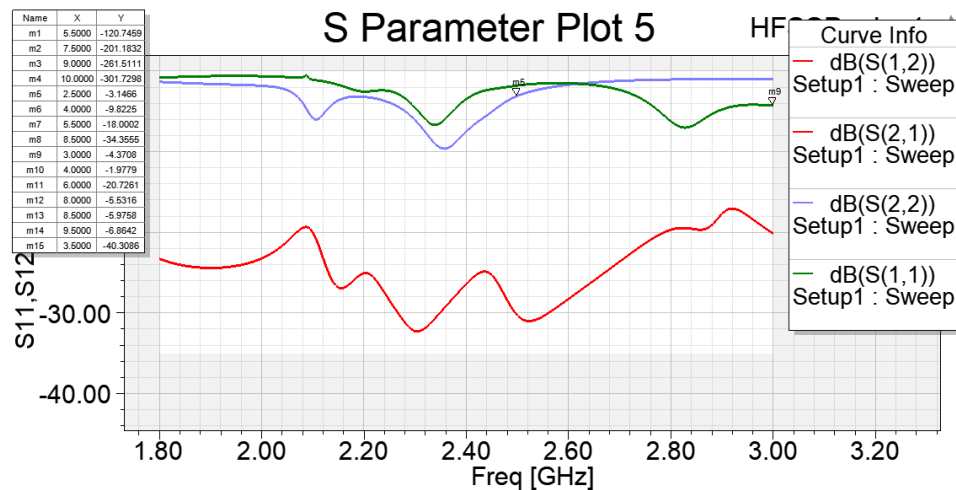


Рисунок 3.7 – Частотна характеристика S-параметрів

Ступінь лінійної поляризації часто кількісно визначають за допомогою коефіцієнта ослаблення поляризації (PER), що визначається як відношення оптичних потужностей в двох напрямках поляризації. Він часто вказується в децибелах і вимірюється шляхом реєстрації залежної від орієнтації передачі потужності поляризатора (Рисунок 3.8).

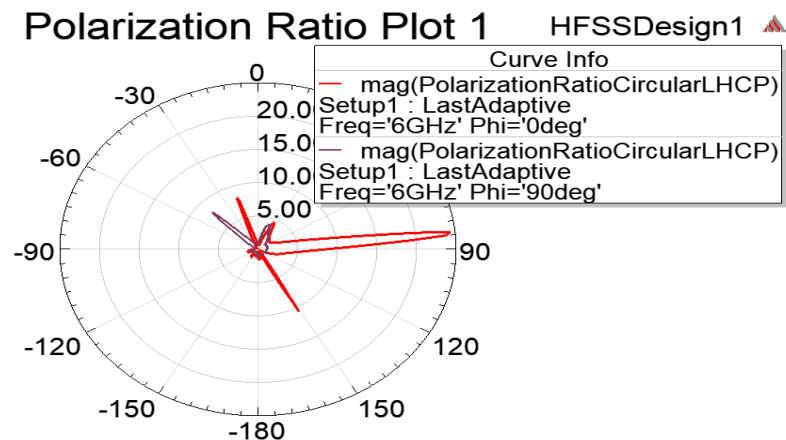


Рисунок 3.8 – Коефіцієнт еліптичності

3.3 Структурна схема роботи NanoStation 2

Для того щоб вибрати структурну схему потрібно звернути увагу на техніко-економічні показники, такі як собівартість та легкість виконання. На рисунку 3.9 зображено структурну схему, яка відповідає зазначеним вище вимогам.

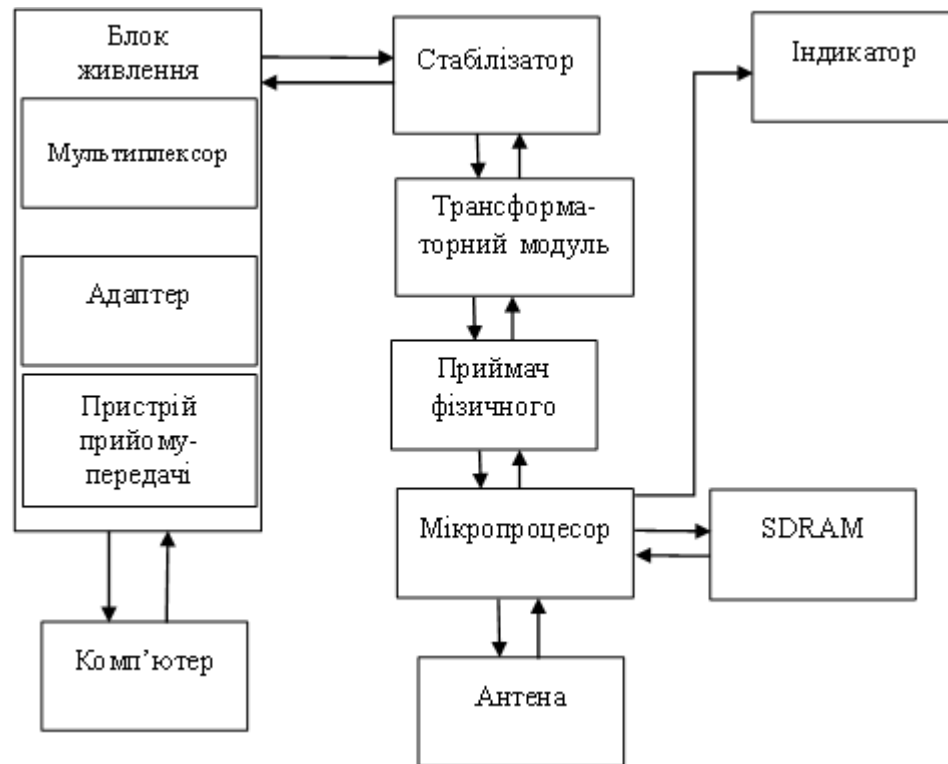


Рисунок 3.9 – Структурна схема NanoStation 2

4 ЕКСПЕРИМЕНТ

4.1 Дослідження на дальність

Для дослідження антени NanoStation 2 на дальність дії було підібрано звичайні умови приймання – передавання вайфай – сигналу, які зображено на рисунку 4.1

Після підключення антени до роутера були вибрані такі відрізки шляху:

- а) 50 метрів;
- б) 100 метрів;
- в) 250 метрів;
- г) 500 метрів;
- д) 1 кілометр;
- е) 1.5 кілометри.



Рисунок 4.1 – Зображення відстані

Для тестування швидкості на мобільний телефон було встановлено додаток Speed Test Master Pro.

Після 50 метрів зв'язок був чудовим, так як видимість сигналу була чітка (Рисунок 4.2).

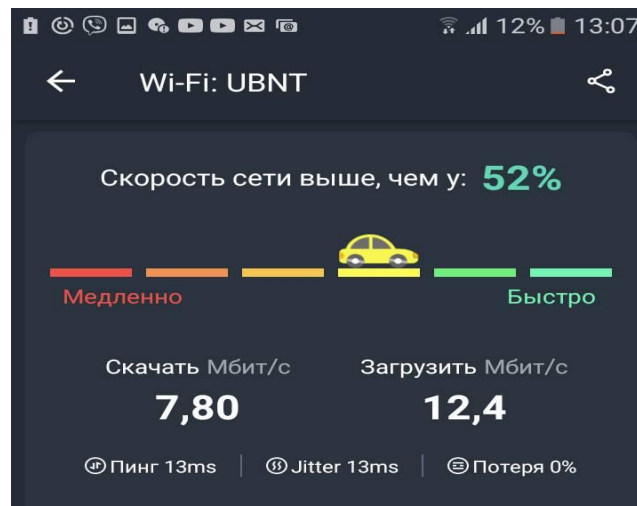


Рисунок 4.2 – Тестування швидкості на відстані 50м

На 100 метрах зміни не відбулися, сигнал WiFi передавався без перешкод (Рисунок 4.3)

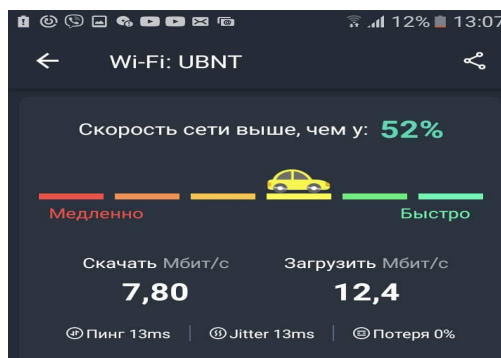


Рисунок 4.3 – Тестування швидкості передавання-приймання даних на відстані 100 м

На 250 метрах було помічено зменшення швидкості передачі даних. Зумовлено це було тим, що на шляху сигналу були лінії електроживлення, які вносять загасання сигналу (Рисунок 4.4).

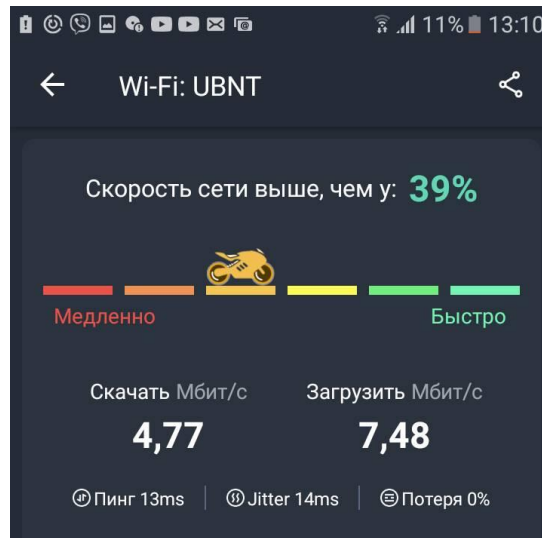


Рисунок 4.4 – Тестування швидкості на відстані 250 м

Через 500 метрів сигнал покращився, але швидкість передачі впала на 15% , це зумовлено тим, що на шляху часто попадалися дерева (Рисунок 4.5).

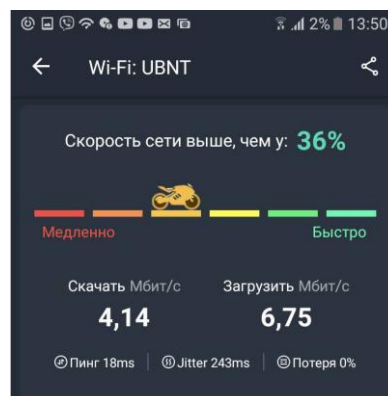


Рисунок 4.5 – Тестування швидкості на відстані 500 м

На відстані в 1 км сигнал значно послаб, а уже на відстані 1.5 км він зовсім зник. Послаблення відбулося у зв'язку з наявністю багатьох перешкод, таких, як лінії електроживлення, дерева, житлові будинки (Рисунок 4.6).

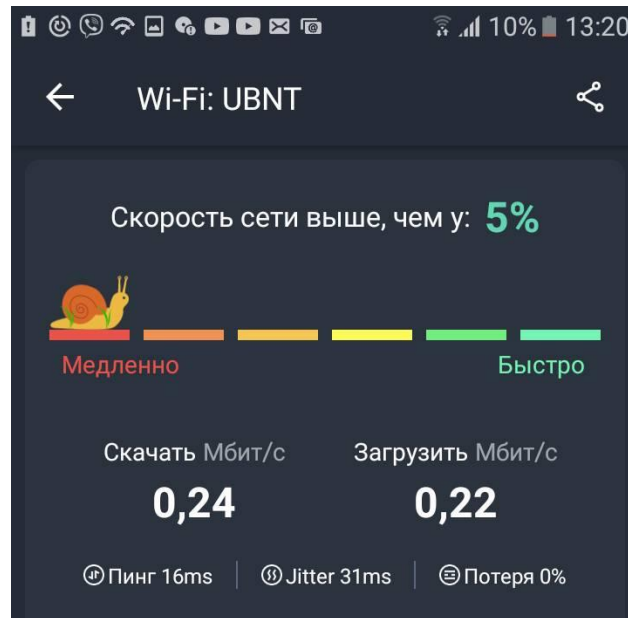


Рисунок 4.6 – Тестування швидкості на відстані 1 км

4.2 Метод безпосереднього вимірювання діаграм спрямованості

Метод безпосереднього вимірювання включає в себе створення станції передачі сигналу, установки антени приймача та вимірювання діаграм спрямованості за допомогою ноутбуку і програми Polar Plot. Під час експерименту були отримані результати на таких частотах: 1200 GHz, 2506 GHz, 2600 GHz, 2750 GHz. Під час роботи були зафіксовані виміри при різних поляризаціях.

На рисунку 4.7 показано експериментальне устаткування.

До устаткування входять такі елементи:

- а) станція передачі сигналу включає в себе генератор [7] сигналу та антену передавача;
- б) відстань було підбрано в межах аудиторії (1,5-1,8 метра);
- в) поворотний пристрій [8] та антену NanoStation2;
- г) вимірювальний підсилювач [9];
- д) комп'ютер з програмою Polar Plot [10].



Рисунок 4.7 – Експериментальне устаткування

Перше вимірювання було проведено на частоті 1200 GHz. На рисунку 4.8 ми можемо побачити експериментальну діаграму спрямованості (при вертикальній поляризації її зображено жовтою лінією, при горизонтальній поляризації – синьою).

На цій частоті ми можемо побачити, що сигнал стабільно надходить у всіх напрямках, та головної пелюстки немає. В ситуації, якщо нам потрібно просто підсилити роботу якоїсь слабшої антени, цей варіант згодиться більш за все (Рисунок 4.8)

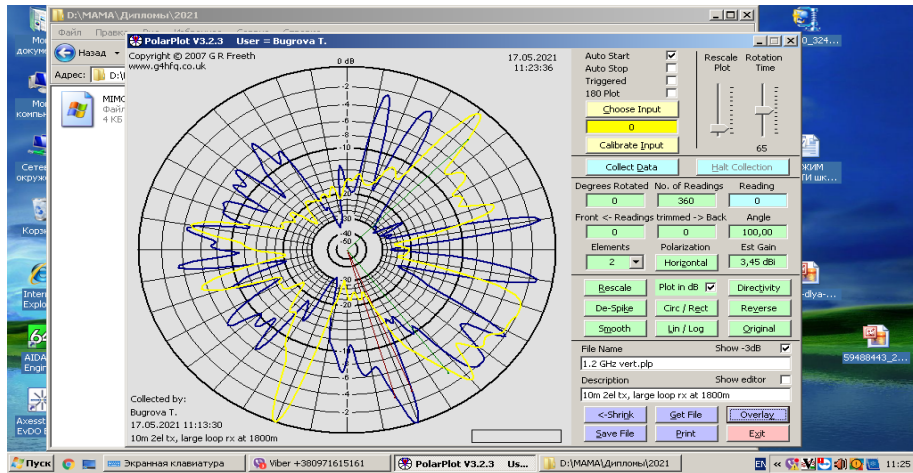


Рисунок 4.8 – Діаграми спрямованості у вертикальній та горизонтальній площині

Ще для більш інформаційного результату було проведено вимірювання при передачі сигналу в горизонтальній поляризації та прийомі і вертикальній на передачі (Рисунок 4.9).

Тут ми можемо побачити що навіть при різних поляризаціях антена пряцює майже у всіх напрямках.

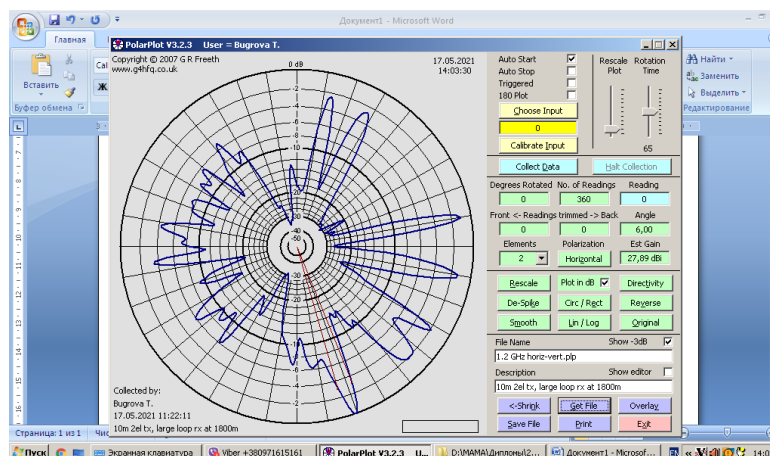


Рисунок 4.9 – Діаграма спрямованості при горизонтальній передачі та вертикальному прийомі

Вимір діаграми спрямованості антени на частоті 2506 GHz показав істотні зміни. В горизонтальній площині у діаграми з'явилася головна пелюстка, у вертикальній їх дві. Зумовлено це зміною частоти та буде корисним, якщо потрібно буде передавати сигнал на віддалений, але один напрямок (Рисунок 4.10).

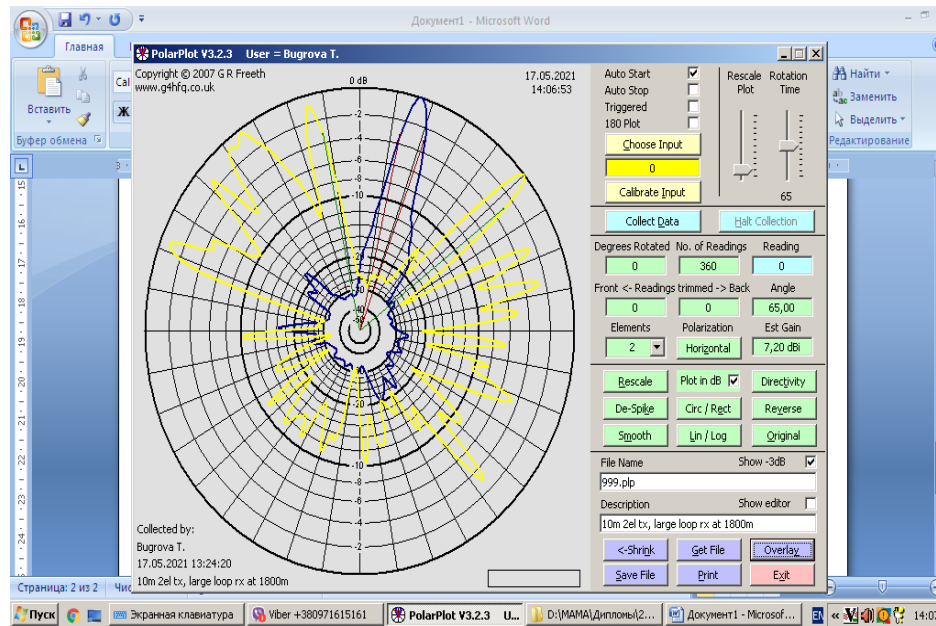


Рисунок 4.10 – Діаграми спрямованості у вертикальній та горизонтальній поляризації

При вимірюванні передачі сигналу в горизонтальній поляризації та прийомі в вертикальній значних змін не було виявлено (Рисунок 4.11).

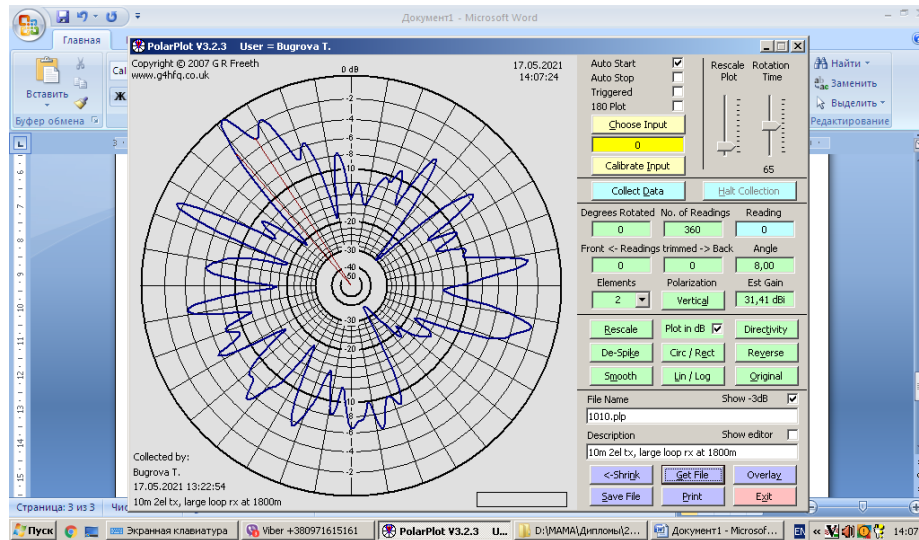


Рисунок 4.11 – діаграма спрямованості при горизонтальній передачі та вертикальному прийомі

При частоті 2600 GHz в вертикальній та горизонтальній площинах ми отримали ще дві додаткових пелюстки (Рисунок 4.12).

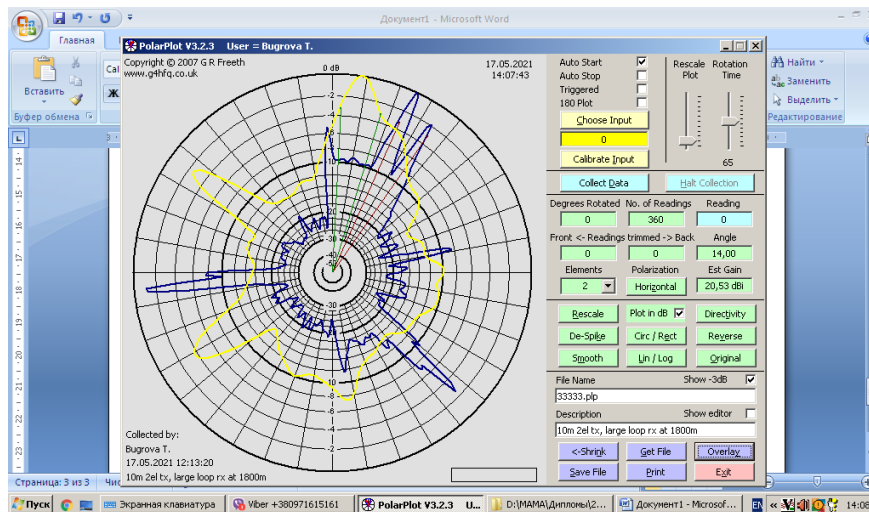


Рисунок 4.12 – Діаграми спрямованості у вертикальній та горизонтальній площині на частоті 2600 GHz

Вимірюючи передачу сигналу в горизонтальній поляризації та прийомі в вертикальній отримано два головних пелюстка (Рисунок 4.13).

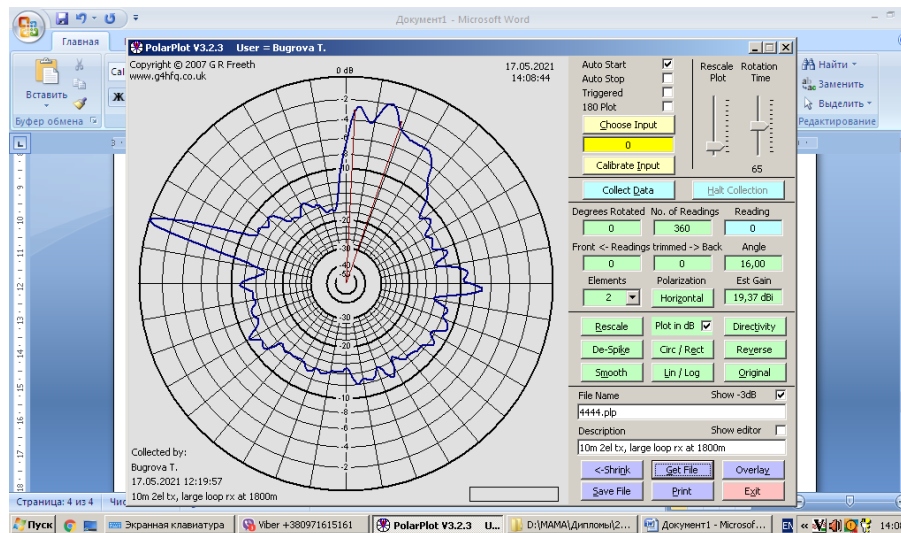


Рисунок 4.13 – Діаграма спрямованості при горизонтальній передачі та вертикальному прийомі

На частоті 2750 GHz було отримано най оптимальніші результати. В вертикальній поляризації з'явився головний ярко виразний пелюсток та один другоплановий, у горизонтальній теж один головний але вже два підрядних (Рисунок 4.14).

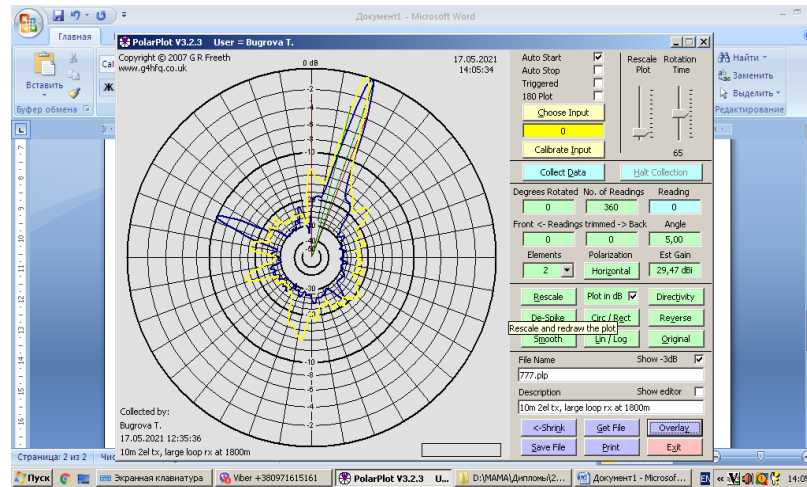


Рисунок 4.14 – Діаграми спрямованості у вертикальній та горизонтальній площині на частоті 2750 GHz

При передачі сигналу на горизонтальній поляризації та прийомі на вертикальній отримано одна головна пелюстка та дві другорядні (Рисунок 4.15).

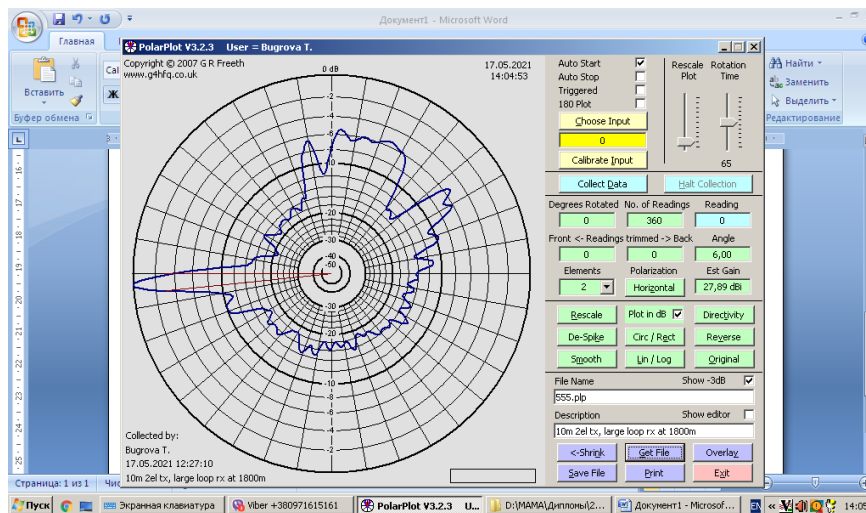


Рисунок 4.15 – Діаграма спрямованості при горизонтальній передачі та вертикальному прийомі

Отримані дані відповідають тим, що були отримані при моделюванні та розрахунку антени в програмі ANSYS ELECTRONICS, там отримано такі ж діаграми спрямованості, які мають один головний пелюсток та декілька другорядних (рис. 4.16).

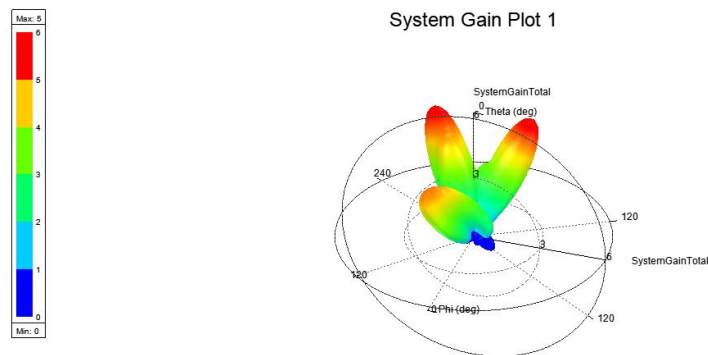


Рисунок 4.16 – Діаграма спрямованості, яку отримано в ANSYS ELECTRONICS

ВИСНОВКИ

В процесі дипломного проектування було досліджено антену «NanoStation 2». Розглянуто особливості технології MIMO, яка показує шалені результати зростання швидкості передачі даних, так як використовує при передачі/прийомі дві та більше антени. Це підтвердив експеримент з вимірювання дальності дії безпосередньо для NanoStation 2.

В програмі ANSYS ELECTRONICS було створено електродинамічну об'ємну модель антени NanoStation 2 та розраховано її діаграму спрямованості, загальне підсилення та частотні характеристики узгодження. Це дало нам відомості про основні параметри та характеристики антени, які відсутні в технічній документації виробника, про її реальний робочий діапазон та матеріали, які використовуються при розробці NanoStation 2, щоб досягнути максимальної ефективності.

Було проведено експерименти на дальність та безпосереднє вимірювання швидкості передачі даних і вивчення динаміки зниження швидкості зі збільшенням дистанції. Нажаль, експеримент на дальність показав нам посередні результати та надав бажання до вдосконалення антени.

Безпосереднє вимірювання діаграми спрямованості дало змогу дізнатися головні напрямки антени, хоча вони змінюються у залежності від зміни робочої частоти. Загалом, слід зауважити, що сама антена має досить непогані експлуатаційні характеристики та може використовуватися як у виробничих, так і в побутових цілях, добре себе показує як передавач/приймач на середніх дистанціях. Удосконалення і модернізація конструкції антени «NanoStation 2» є справою перспективною. Це навіть може стати комерційно успішним проектом у випадку налагодження відповідного виробництва, яке дасть додаткові робочі місця. Доступ до широкопasmового швидкісного інтернету в місцях слабого мобільного сигналу підвищить стандарти якості життя населення.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Технология МІМО в беспроводной связи [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://ru.xcv.wiki/wiki/МІМО>.
2. Ликбез: основы теории по антеннам [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://nag.ru/articles/article/29383/likbez-osnovyi-teorii-po-antennam.html>.
3. Исследование производительности МІМО систем пятого поколения в неселективном канале Релея [Электронный ресурс]: Режим доступа: [https:// hub.exponenta. = ru/post/ issledovanie-proizvoditelnosti-mimo-sistem-pyatogo-pokole niya =-v-neselektivnom-kanale-releya590](https://hub.exponenta.ru/post/issledovanie-proizvoditelnosti-mimo-sistem-pyatogo-pokoleniya-v-neselektivnom-kanale-releya590).
4. МІМО – многоантенные технологии в LTE [Электронный ресурс]: Режим доступа: [http: //1234g.ru /4g/lte/fizicheskij-uroven-standarta-lte/mnog_oant ennye-tekhnologii-mimo-v-lte](http://1234g.ru/4g/lte/fizicheskij-uroven-standarta-lte/mnog_oant ennye-tekhnologii-mimo-v-lte).
5. Суть технологии МІМО и антенны МІМО 2x2 [Электронный ресурс]: Режим доступа: [https://shopcarry.ru/top/ editorial/suty-tehnologii-i-antenni/](https://shopcarry.ru/top/editorial/suty-tehnologii-i-antenni/).
6. ANSYS Electronics Desktop [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://cae-expert.ru/product/ansys-electronics-desktop>.
7. Нормативные и технические документы, устанавливающие требования к генераторам сигналов высокочастотных Г4-80 [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.ktopoverit.ru/prof/opisanie/3872-13.pdf> .
8. Нестерчук Д.М. Основы метрології та засоби вимірювання: навчальний посібник [Текст] / Д.М. Нестерчук, С.О. Квітка. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. – 256 с.
9. Программа для просмотра диаграммы направленности вращающейся антенны [Электронный ресурс]: Режим доступа: [https://ru3dnn.jimdofree.com/radi %D0%B0% D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B/polar-plot](https://ru3dnn.jimdofree.com/radi%D0%B0% D0%BD%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B/polar-plot).