МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

_____ Інформаційної безпеки та електронних комунікацій_____
(повне найменування інституту, факультету)

_____Інформаційних технологій та телекомунікацій_____
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проекту (роботи)
_____Магістр_____
(ступінь вищої освіти)

на тему_РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ТА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЗНІМАННЯ ДІАГРАМ НАПРАВЛЕНОСТІ АНТЕН

Виконав: студент(ка) _6__курсу, групи БК-512м_

Спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація)
Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки

Керівник _____Вадим ОНИЩЕНКО_____
(прізвище та ініціали)
Рецензент_____
(прізвище та ініціали)

2023

Форма № 25

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

Факультет інформаційної безпеки та електронних комунікацій
Кафедра__ Інформаційних технологій електронних засобів_____
Ступінь вищої освіти _Магістр_____
Спеціальність _172 Телекомунікації та радіотехніка _____
(код і найменування)
Освітня програма (спеціалізація): Інтелектуальні технології мікросистемної радіоелектронної техніки_____
(назва освітньої програми (спеціалізації)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІТЕЗ_____
_____
«_____» _____20___року

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

_____Пахомов Владислав Дмитрович_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи)_Розробка методики та системи автоматизованого знімання діаграм направленості антен_____
_____

керівник проєкту (роботи)_Онищенко Вадим Федорович, к.ф.-м.н, доцент каф.ІТЕЗ_____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «11»_листопада_2023_року №_448_

2. Строк подання студентом проєкту (роботи)_22 грудня_____

3. Вихідні дані до проєкту (роботи)_основні параметри антен, методи вимірювання діаграм спрямованості
_____
_____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Огляд методів вимірювання діаграм спрямованості антен, постановка технічного завдання, розробка структури системи, вибір елементів системи, опис алгоритмів роботи апаратної частини системи, реалізація програмного забезпечення, тестування розробленої системи

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
__23 слайди_____

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	**Вадим ОНИЩЕНКО**	**03.10.23**	
2	**Вадим ОНИЩЕНКО**	**17.10.23**	
3	**Вадим ОНИЩЕНКО**	**07.11.23**	
4	**Вадим ОНИЩЕНКО**	**21.11.23**	
нормоконтроль	**Ірина ПОСПЕЄВА**	**01.12.23**	

7. Дата видачі завдання «04» __вересня_____2023_року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	**Огляд методів вимірювання діаграм спрямованості антен**	**9.10.23**	
2	**Постановка технічного завдання**	**11.10.23**	
3	**Розробка структури системи**	**12.10.23**	
4	**Вибір елементів системи**	**20.10.23**	
5	**Опис алгоритмів роботи апаратної частини системи**	**15.11.23**	
6	**Реалізація програмного забезпечення**	**25.11.23**	
7	**Тестування розробленої системи**	**02.12.23**	
8	**Оформлення ПЗ та захист дипломного проекту**	**16.12.23**	

Студент(ка) _____ **Владислав ПАХОМОВ**
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи) _____ **Вадим ОНИЩЕНКО**
(підпис) (прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи: 58 сторінок, 30 рисунків, 20 джерел.

ДІАГРАМА СПРЯМОВАНОСТІ АНТЕНИ, АВТОМАТИЧНЕ ВИМІРЮВАННЯ, МІКРОКОНТРОЛЕР, РАДІОПРИЙМАЧ. Е-ПЛОЩИНА, Н-ПЛОЩИНА.

Метою роботи є підвищення рівня автоматизації та оперативності проведення вимірювань діаграм спрямованості антен шляхом розробки методу та системи автоматизованого вимірювання на основі персонального компютера та мікроконтролера.

Об'єктом дослідження є метрологічне забезпечення процесу вимірювання діаграм спрямованості антен.

Предмет дослідження – система автоматизованого вимірювання діаграми спрямованості з невеликою вартістю.

У першому розділі розглядаються огляд області розробки та постановка завдань магістерської роботи.

У другому розділі проводиться розробка методології та структури системи автоматизованого вимірювання діаграми спрямованості

У третьому розділі проводиться тестування розробленої системи та наводяться отримані результати на прикладі вимірювання трьох типів антен.

ЗМІСТ

Реферат 4

Вступ 6

1 Огляд області розробки та постановка задач 9

1.1 Параметри антен 9

1.2 Вимірювання параметрів антен 17

1.3 Огляд методів вимірювання діаграм спрямованості антен 19

1.3.1 Вимірювання у закритих приміщеннях 20

1.3.2 Вимірювання у вільному просторі 21

1.4 Постановка завдань дослідження 23

2 Розробка методології та структури системи автоматизованого вимірювання ДС 25

2.1 Структура та принцип роботи системи 25

2.2. Опис алгоритмів роботи апаратної частини системи 32

2.3. Реалізація програмного забезпечення 35

3 Тестування розробленої системи та отримані результати 37

3.1 Порядок проведення вимірювань 37

3.2 Вимірювання діаграми спрямованості патч антени 38

3.3 Відображення вимірювань у розробленому програмному забезпеченні 43

Висновки 53

Перелік джерел посилання 55

Додаток А – Презентація 58

ВСТУП

Техніка антенних пристроїв з моменту відкриття радіо пройшла великий та складний шлях. Освоєння нових діапазонів хвиль, нові застосування радіоелектроніки завжди викликали удосконалення старих та поява принципово нових антенних пристроїв. Слід зазначити незаперечну провідну роль вітчизняних учених та інженерів з багатьох напрямків антеної теорії та техніки [1]

З постійно зростаючою складністю антенних систем, підвищувалися вимоги до точності експериментального відпрацювання антен, контролю характеристик антен на стадіях їх створення та подальшої експлуатації у складі радіотехнічних систем. У зв'язку з цим виникла необхідність створення адекватних технічних засобів для виконання антенних вимірювань. Серед сукупності параметрів, що вимірюються антен найбільшу трудомісткість мають вимірювання їх просторових характеристик, таких як діаграма спрямованості, коефіцієнт посилення, поляризація. Важливість вимірювань просторових характеристик антен зумовлена тим, що ці характеристики безпосередньо впливають основні експлуатаційно-технічні параметри відповідних радіотехнічних систем.

З підвищенням вимог до антенних пристроїв зростає трудомісткість операцій визначення їх характеристик. Внаслідок великих обсягів одержуваної вимірювальної інформації та складних алгоритмів її подальшої обробки комплекси, призначені для вимірювань просторових характеристик сучасних антен, повинні мати високий рівень автоматизації.

Одним із найбільш важливих параметрів антеної системи, поряд з коефіцієнтом посилення та пеленгаційними характеристиками, є її діаграма спрямованості (ДС). Невідповідність фактичної та розрахункової ДС вказує на конструктивні помилки при розробці антеної системи або похибки, що виникають при монтажі цієї системи.

У зв’язку зі стрімким розвитком бездротових систем і бачення Інтернету речей, недорогі та швидкі вимірювання антен у ехо-лабораторії привернули значний дослідницький, комерційний та освітній інтерес за останнє десятиліття.

Вимірювання діаграми спрямованості антени вручну має певні недоліки та обмеження: неефективність, неточність, повільний процес і дороговартісність. Це призводить до обмеження тем і матеріалу практичної роботи в лабораторії, оскільки один цикл вимірювань займає багато часу. Щоб подолати цю проблему, мікроконтролер використовується як основна частина автоматичного вимірювання діаграми спрямованості антени. Разом з іншими допоміжними компонентами та пристроями мікроконтролер можна запрограмувати на встановлення та керування напрямком і кроком ротатора, перетворення сигналу електромагнітної хвилі, отриманого антеною, у сигнал постійного струму та надсилання його на ПК для обробки іншою програмою. будується та відображається у вигляді графіка на моніторі. Результат дослідження показує ефективність, точність і швидкість процесу вимірювання.

Оскільки до 2035 року в галузевих звітах очікується трильйон бездротових пристроїв, очікується сплеск інтересу до розробки та тестування антен. Повсюдне поширення та швидкий життєвий цикл розвитку таких пристроїв Інтернету речей (IoT) передбачає необхідність швидких і недорогих вимірювальних установок параметрів антен. Крім того, недорогі та масштабовані практичні підходи до навчання антени матимуть першочергове значення для навчання розробників антен для надійного зв’язку IoT.

Метою роботи є підвищення рівня автоматизації та оперативності проведення вимірювань діаграм спрямованості антен шляхом розробки методу та системи автоматизованого вимірювання на основі персонального компютера та мікроконтролера.

Основне завдання дослідження полягає в розробці сукупності технічних рішень, що дозволяють реалізувати на практиці вимірювання діаграм спрямованості антен методом, що максимально автоматизує та прискорить цей процес.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних приватних завдань:

- розробка методики та алгоритму вимірів давграм спрямованості;

- розробка алгоритмів постобробки даних вимірів та відповідного програмного забезпечення;

- розробка апаратного забезпечення;

- апробація алгоритмів постобробки вимірів;

- аналіз похибок вимірювань та оцінка точності методу.

Об'єктом дослідження є метрологічне забезпечення процесу вимірювання діаграм спрямованості антен.

Предмет дослідження – система автоматизованого вимірювання діаграми спрямованості з невеликою вартістю.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених завдань використано методи математичного моделювання, обчислювальні методи прикладної електродинаміки, у тому числі реалізовані у сучасних програмних пакетах, програмні обчислювальні засоби загального застосування.

Отримані результати дозволяють підвищити якість і оперативність атестації нових антенних систем, що вводяться в експлуатацію, а також контролю параметрів вже експлуатованих антен з метою їх виконання.

1 ОГЛЯД ОБЛАСТІ РОЗРОБКИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

1.1 Параметри антен

Поляризаційні параметри антени - поляризація антени.

Антени характеризуються ближньою та далекою зонами випромінювання. Усі параметри антен відносяться до дальньої зони випромінювання, де випромінювана антеною хвиля вважається плоскою хвилею з поперечними ортогональними складовими електричного поля та магнітного поля.

Під поляризацією хвилі розуміється орієнтація у просторі вектора електричного поля. У випадку якщо вектор (і, відповідно, вектор) при поширенні хвилі залишається паралельним себе, то поляризація поля лінійна. У разі якщо вектор розташований горизонтально (паралельно землі див. рис.1.1б), а вектор вертикально (перпендикулярно землі), то хвиля є горизонтально поляризованою. Якщо вектор розташований вертикально (перпендикулярно землі див. рис.1.1а), а вектор горизонтально, то хвиля є вертикально поляризованою.

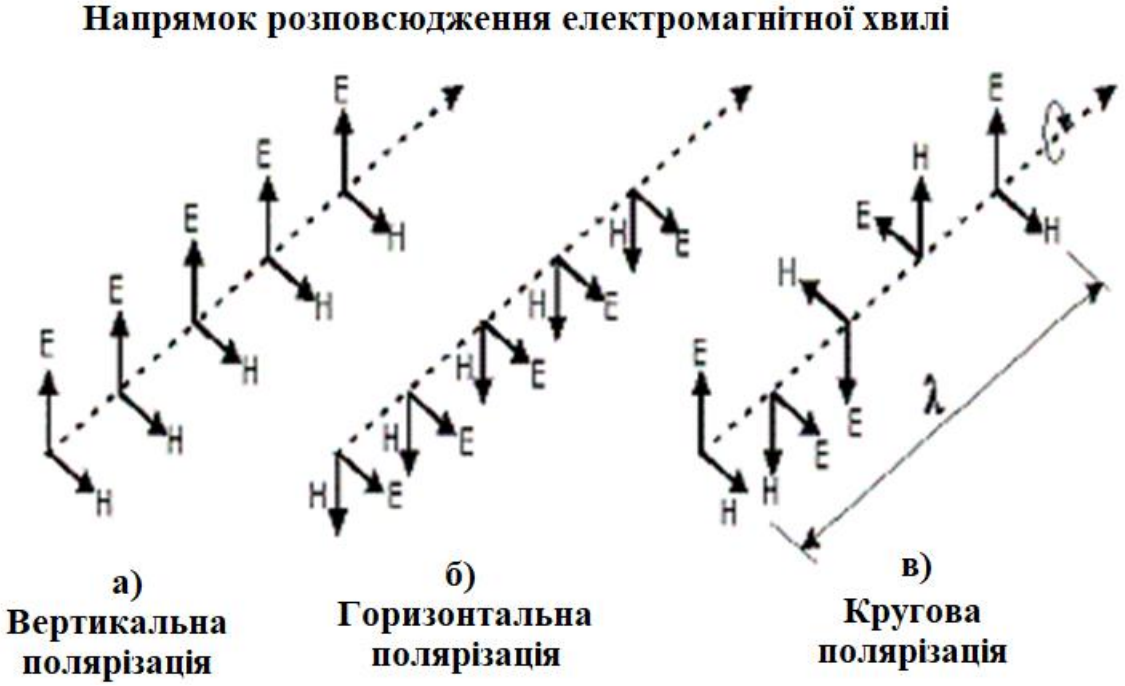
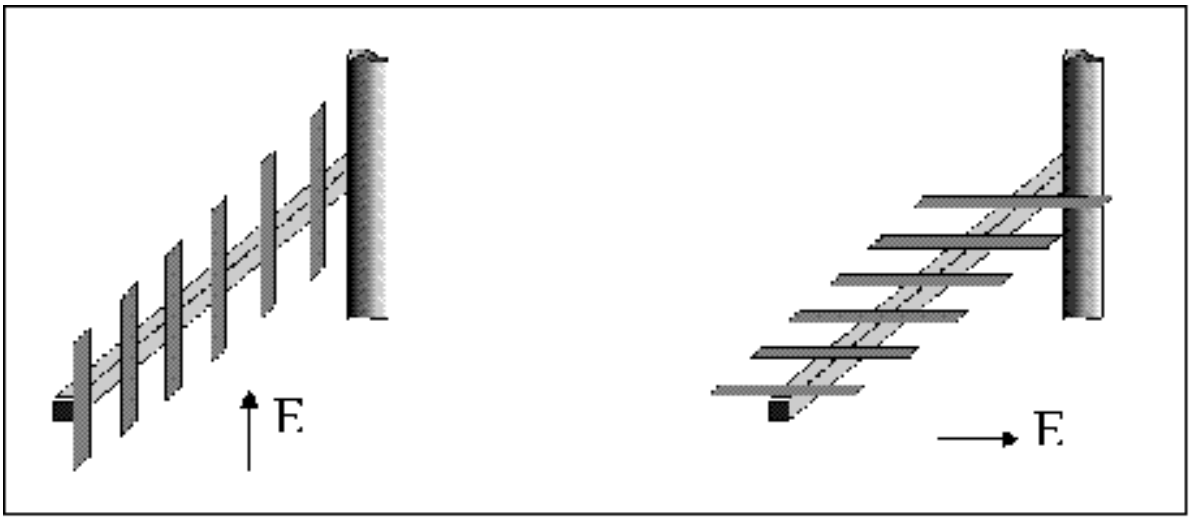


Рисунок 1.1 – Полярізації антен

Якщо вектора і за поширення хвилі рухаються коло (див. рис.1.1в), то поляризація хвилі кругова. Розрізняють правий та лівий напрямок обертання. При правому напрямку, обертання, наприклад, вектора для спостерігача, що дивиться вслід хвилі, відбувається за годинниковою стрілкою, при лівому напрямку проти годинникової стрілки. Вид поляризації електромагнітної хвилі, що приймається або випромінюється антеною, визначається розташуванням і формою провідників антени. Так, наприклад, антена у вигляді вертикально розташованих лінійних провідників (рис. 1.2 а) випромінює (приймає) вертикально поляризовані хвилі. Відповідно антена з горизонтально розташованими провідниками (рис.1.2 б) – горизонтально поляризовані хвилі.



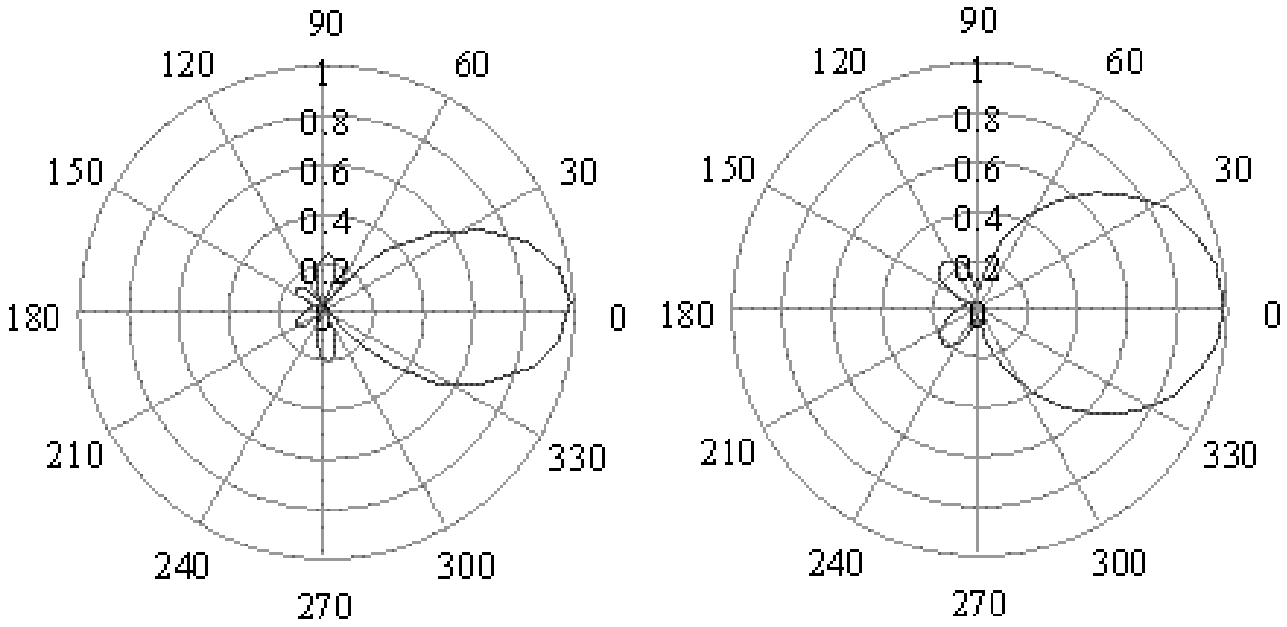
а) б)

Рисунок 1.2 – Параметри антен - поляризація

Використання антен з різною поляризацією дозволяє зменшити взаємний вплив радіотехнічних систем з близькими робочими частотами на 10..20 дБ, що в ряді випадків може стати єдиним рішенням проблеми електромагнітної сумісності.

Однією з основних характеристик є діаграма спрямованості антени, що характеризує залежність амплітуди випромінюваного поля від кутових координат при незмінній відстані від антени до точки спостереження. Зазвичай обмежуються побудовою діаграми спрямованості двох взаємно перпендикулярних Е і Н площинах. Приклад діаграми спрямованості показано на рис 1.3. По радіусу

відкладено значення амплітуди поля, що випромінюється, нормоване до значення амплітуди в головному максимумі.



а) Е-площина б) Н-площина

Рисунок 1.3 – Діаграма спрямованості антен

Діаграма спрямованості антени характеризується такими параметрами:

- ширина головної пелюстки в Е та Н площинах за рівнем 3 дБ (у градусах);
- максимальний рівень бічних пелюсток $А_{бок}$ (дБ);
- максимальний рівень заднього випромінювання $А_{зд}$(дБ).

Наявність задніх і бічних пелюсток свідчить про те, що антена випромінює радіохвилі не тільки в області головної пелюстки, але і в інших напрямках, що може створювати перешкоди іншим радіотехнічним системам і знижує стійкість перешкод, якщо антена працює на прийом. Тому при проектуванні антен прагнуть зменшення рівнів бічного і заднього випромінювання.

Антена, будучи пасивним пристроєм, випромінює у простір дещо меншу потужність Рвип, ніж та, що надходить на вхід антени Рвх. Це з омическими втратами в елементах конструкції антени. Існують поняття, коефіцієнт корисної дії антени рівний

$$\eta = \frac{P_{вип}}{P_{вх}} \qquad (1.1)$$

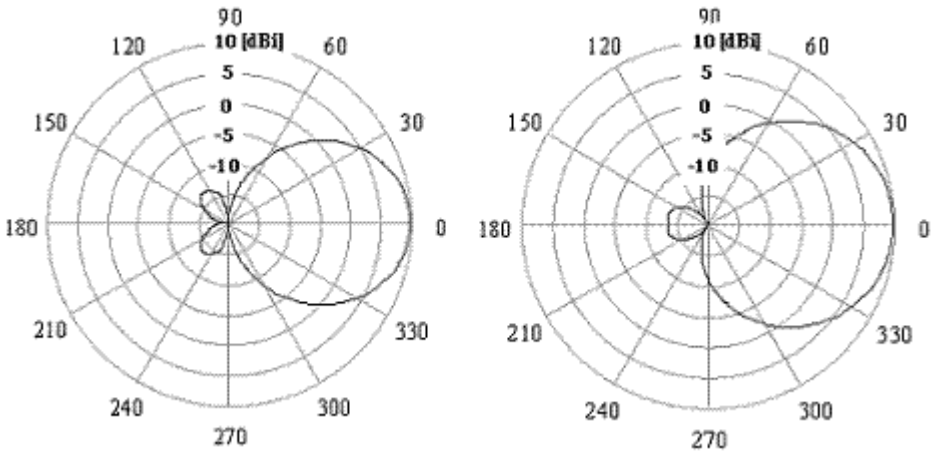
та коефіцієнт спрямованої дії, що характеризує здатність антени концентрувати випромінювану потужність у певному напрямку.

Коефіцієнт спрямованої дії є відношення середнього (у часі) значення щільності потоку потужності, що випромінюється антеною в даному напрямку (характеризується кутами jo, qo сферичної системи координат), до щільності потоку потужності ізотропної антени. При цьому вважається, що потужності, що випромінюються, рівні і точка спостереження знаходиться на однаковій відстані від антен. Ізотропна антена - уявна антена, яка повністю відсутні спрямовані властивості, тобто. Просторова діаграма має вигляд сфери. З визначення слідує, що коефіцієнт спрямованої дії є функцією кутів j, q і позначається D(j,q), і не враховує втрат потужності в антені, тому вводиться параметр G, що враховує ці втрати і називається коефіцієнт посилення антени:

$$G = D(j,q)h \qquad (1.2)$$

Коефіцієнт посилення є відношення середнього (у часі) значення густини потоку потужності, що випромінюється антеною в даному напрямку (характеризується кутами сферичної системи координат) до густини потоку потужності ізотропної антени. При цьому вважається, що потужності, що підводяться до входів антен, рівні і точка спостереження знаходиться на однаковій відстані від антен. При цьому передбачається, що ізотропної антени дорівнює 1.

Для практичного використання коефіцієнт посилення зазвичай представляють графічно у полярних координатах від кутів для Е і Н площин. По радіусу діаграми відкладають абсолютну величину коефіцієнта посилення в дБ, як показано на рис.1.4. І тут діаграма несе значно більшу інформацію, ніж діаграма рис.1.4. Коло зі значенням 0 дБ є діаграмою спрямованості ізотропного випромінювача.



а) Е-площина б) Н-площина

Рисунок 1.4 – Діаграма спрямованості у полярних координатах

За допомогою діаграми рис.1.4 легко визначити посилення антени залежно від напрямку випромінювання.

Кількісною характеристикою узгодження антени з фідерним трактом є величина модуля коефіцієнта відбиття по напрузі |Г|, чисельно рівна відношенню амплітуди напруги відбитої хвилі Uотр до амплітуди напруги хвилі, що падає Uпад

$$|\Gamma| = \frac{U_{\text{від}}}{U_{\text{пад}}} \qquad (1.3)$$

Значення |Г|- змінюється від 0 до 1. При |Г|=0 тракт ідеально узгоджений (немає відбитої хвилі). Внаслідок накладання падаючих та відбитих хвиль у фідерному тракті встановлюється деякий розподіл напруги. Характер цього розподілу повторюється довжиною кабелю L з періодом λк/2 (рис.1.5), λк – довжина хвилі в кабелі

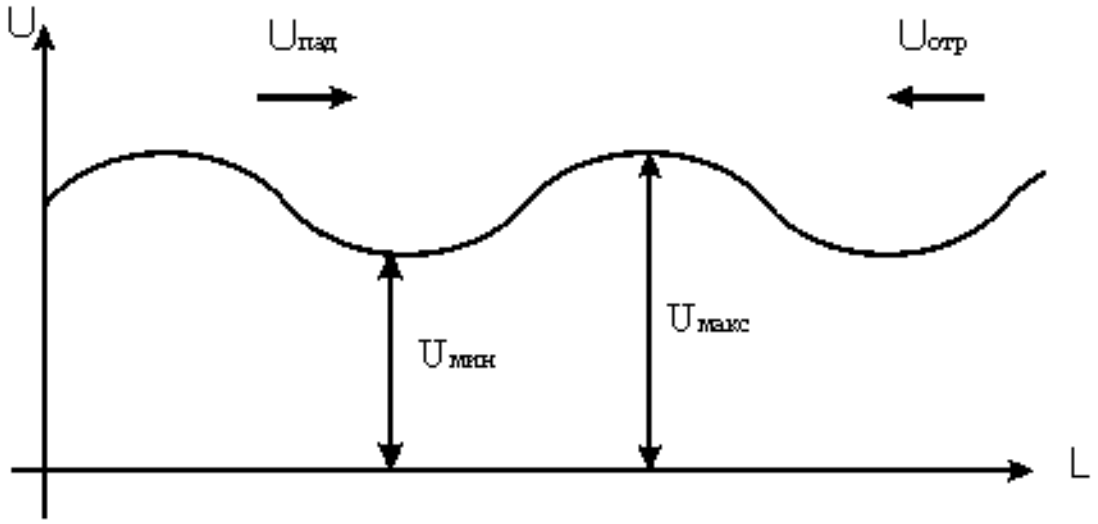


Рисунок 1.5 – Співвідношення Uвід та Uпад

Відношення Uмакс/Uмін (рис. 1.5) називається коефіцієнтом стоячої хвилі (КСХ) за напругою. Саме величина КСХ зазвичай вказується в технічних характеристиках антен. КСХ та |Г| пов'язані між собою простим співвідношенням:

$$КСХ = \frac{1+|Г|}{1-|Г|} \qquad (1.4)$$

Нижче наведено наслідки неузгодженості антени з фідерним трактом.

Зменшення потужності, що випромінюється антеною Рвип в навколишній простір. Зменшення випромінюваної потужності по відношенню до потужності на вході антени Рвх, виражене в дБ, розраховується за формулою:

$$\frac{Р_{вип}}{Р_{вх}}[дБ] = 10log\frac{4КСХ}{(КСХ+1)^2} \qquad (1.5)$$

На рис.1.6 показано залежність Рвип/Рвх від КСХ. З графіка видно, що зі збільшенням КСХ потужність, що випромінюється, зменшується і, отже, максимальна дальність зв'язку також зменшиться.

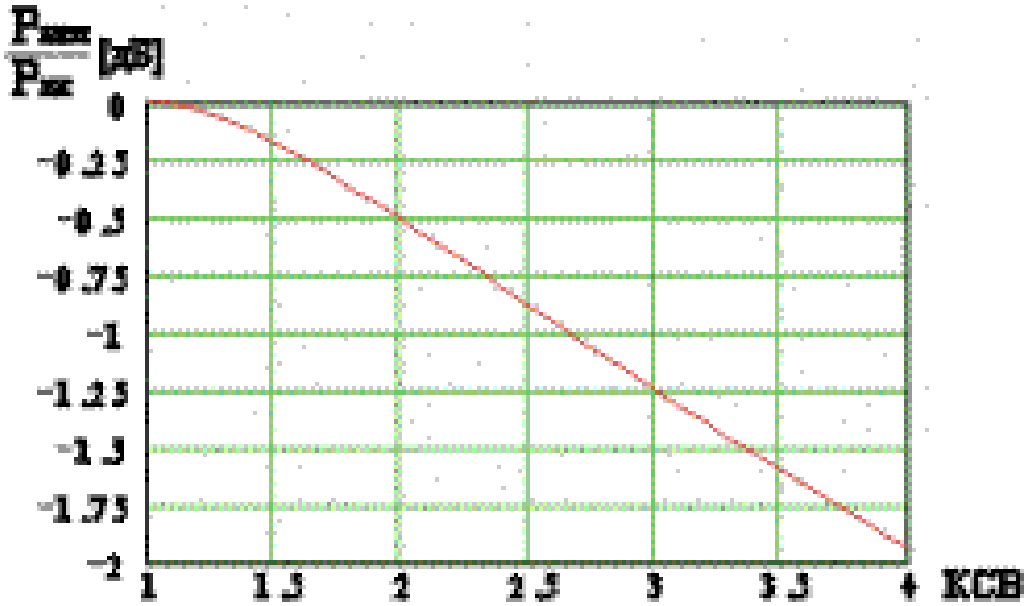


Рисунок 1.6 – Залежність Рвип/Рвх від КСХ

У наслідку неузгодженості антени з фідерним трактом також зменшується потужність, що надходить з виходу передавального пристрою на вхід антени. Це зменшення пов'язане із залежністю вхідного опору антенно-фідерного тракту Zвх від КСВ відповідно до виразу:

$$Z_{вх} = Z_0 \frac{КСХ+1+(КСХ-1)\exp(j2\alpha)}{КСХ+1-(КСХ-1)\exp(j2\alpha)} \qquad (1.6)$$

де Z_0 – хвильовий опір кабелю,

$\alpha = 2pL/lк$ – електрична довжина кабелю,

L – фізична довжина кабелю.

На рис.1.7 представлена залежність активної Re(Zвх) і реактивної Im(Zвх) складових від електричної довжини хвильового опору Z_0 =50 Ом і КСХ = 1,25; 1,5; 2.0.

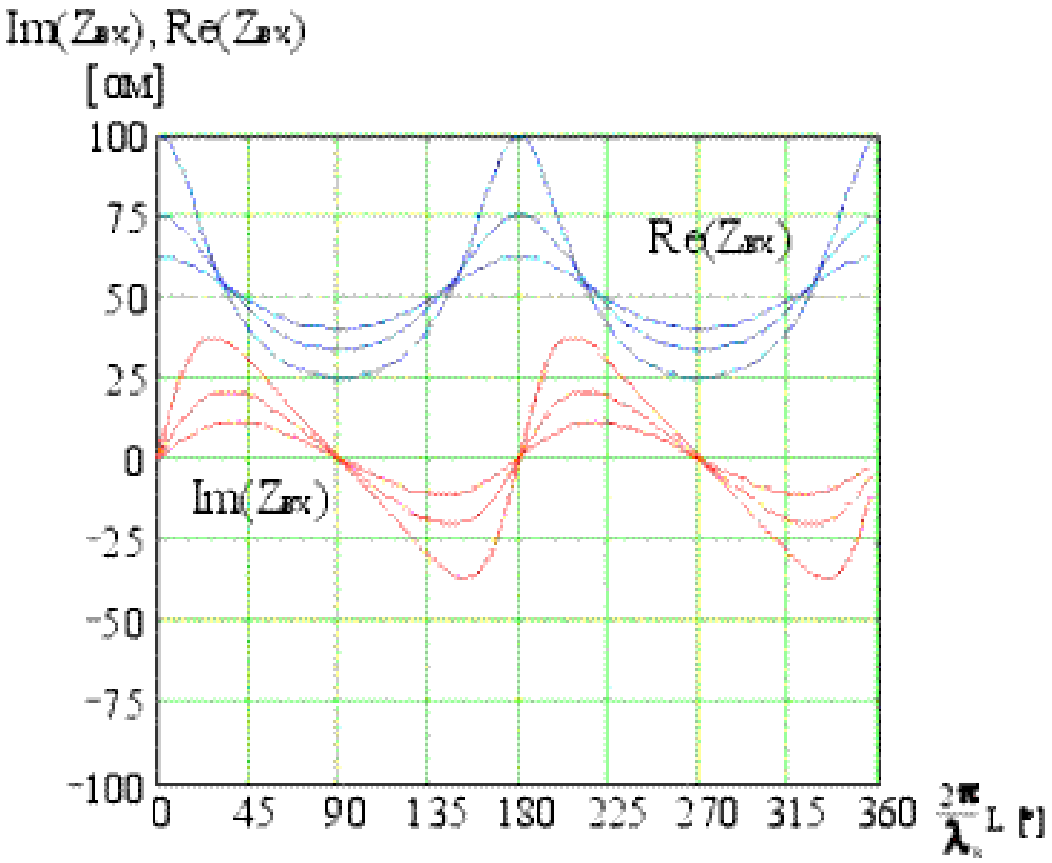


Рисунок 1.7 – Залежність Re(Zвх) і Im(Zвх) від електричної довжини хвильового опору

Довжина фідерного тракту, що з'єднує приймальний пристрій з антеною, вибирається з реальних умов експлуатації і тому може мати місце випадок, коли Re(Zвх) прийме максимальне або мінімальне значення (рис.1.7). І тут потужність, яка підводиться до антени, може змінюватися в КСХ в 2 рази, тобто. при КСХ = 1,5 на 3,5 дБ, а при КСХ = 2 на 6 дБ. Це може призвести до зменшення дальності сталого зв'язку. Тому при проектуванні антен прагнуть зменшення КСХ у всьому робочому діапазоні частот до рівня 1,5 і менше.

Максимальна потужність, що підводиться відноситься тільки до прийомопередаючих або передаючих антен і визначає величину максимальної потужності Рмакс, яку можна підвести до антени, не порушуючи її електричної міцності. Для систем зв'язку Рмакс зазвичай не перевищує 100 Вт.

Фізичні характеристики антен:

- вітрові навантаження та вібрації (Антени встановлюються на щоглах, дахах будинків, де вітрові навантаження досягають максимальних значень. Тому конструкція антени та її елементи кріплення мають бути розраховані на швидкість вітру до 160 км/год. Крім того, конструкція антени має витримувати вібраційні навантаження до 5g);

- навколишня температура, при якій антена повинна зберігати свою працездатність, повинна лежати в межах від -40°С до +50°С;

- антена має бути працездатною (при частковому погіршенні параметрів) при вологості до 95% та зледеніння (Після припинення дії зазначених факторів, паспортні характеристики антени повинні відновлюватися);

- габаритні розміри з урахуванням елементів кріплення та маса можуть накладати певні вимоги до місць та способів монтажу антен.

1.2 Вимірювання параметрів антен

У процесі розробки та виготовлення антен контролюються в основному три параметри: діаграма спрямованості (ДС), коефіцієнт посилення (G) та КСХ. Причому ДС та G найбільш ретельно вимірюється на етапах розробки та виготовлення першої партії серійних виробів. Після запуску антени в серійне виробництво здійснюється 100% контроль значення КСХ, використовуючи антенний аналізатор, а ДС та G контролюється вибірково.

Антенні вимірювання дуже специфічні в силу того, що пред'являються досить жорсткі вимоги до вимірювального стенду в частині рівня відбиття сигналів від навколишніх предметів, стін, стелі, підлоги. Наявність відбиття спотворює справжню ДС і вносить значну похибку у вимір G. Для якісних вимірювань необхідно, щоб величина відбитого сигналу була ослаблена більш ніж на 30 дБ. Це може бути досягнуто тільки в спеціальних безеховых камерах для проведення антенних вимірювань, де стіни підлогу і стелю покриті матеріалом певної структури

і конфігурації, що поглинає матеріал, або на відкритій місцевості вдалині від будинків, і відбивають конструкцій. Схема виміру ДС і G представлена на рис.1.8. Вибір відстані між випробуваною та допоміжною антенами визначається наступними міркуваннями. Параметри ДС і G можна виміряти з достатньою мірою точності, якщо випробувана антена опромінюється плоскою хвилею, тобто. хвилею, у якої поверхня рівних фаз є площиною, перпендикулярною напрямку поширення хвилі. Допоміжна передаюча антена випромінює сферичну хвилю, тому відстань між допоміжною і антенами, що випробовується, повинна бути такою, щоб у межах зони з поперечними розмірами не меншими, ніж максимальний розмір антени, ділянка фронту сферичної хвилі була близька до плоскої хвилі. Для антен дециметрового діапазону відстань А між антенами повинна бути не менше 10 м. Антена, що випробовується, встановлюється на поворотний пристрій, що дозволяє встановлювати і реєструвати кутові переміщення в 1°. Сигнал від генератора, що задає, подається на вхід допоміжної антени. Так як процес зняття діаграми спрямованості може займати досить тривалий час, необхідно підтримувати стабільним рівень сигналу на вході допоміжної антени. Як індикатор зазвичай використовується вимірювальний приймач або аналізатор спектра. Повертаючи випробувану антену з кроком 5 ° ... 10 °, по індикатору фіксують рівні сигналу на виході антени. За результатами вимірів будують нормовану діаграму спрямованості (рис.1.3).

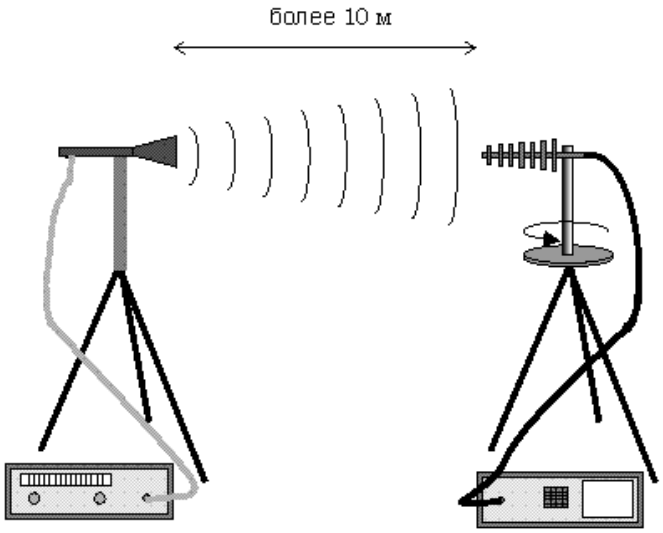


Рисунок 1.8 – Узагальнена схема виміру ДС і G

Коефіцієнт посилення антени визначається порівнянням рівня сигналу на виході випробуваної антени з рівнем сигналу на виході еталонної антени з відомим коефіцієнтом підсилення і розташованої в тому ж місці, що і антена, що випробовується. Максимуми основних пелюстків діаграм спрямованості обох антен повинні бути орієнтовані у бік випромінюючої антени. Для зменшення можливих помилок, пов'язаних із відображенням усередині камери, бажано, щоб діаграма спрямованості випробуваної та еталонної антен були близькі.

Існує ще один метод визначення G - розрахунок за виміряною нормованою діаграмою спрямованості за допомогою спеціального програмного забезпечення на персональному комп'ютері. Цей метод дозволяє оцінити достовірність проведених вимірювань ДС та G. Коректно проведені вимірювання дають розбіжності у виміряному та розрахунковому значеннях G у 5%…10%.

Добре відпрацьована та налаштована антена має КСХ менше 1,5 у всьому робочому діапазоні частот. Вимірювання КСХ зазвичай проводиться за допомогою панорамного вимірювача - антенного аналізатора в цехових умовах. При проведенні вимірювань необхідно, щоб антена була розташована не ближче 5 м від предметів, що відбивають, будинків антен.

1.3 Огляд методів вимірювання діаграм спрямованості антен

Невід'ємною частиною процесу розробки радіотехнічних систем різного призначення є натурні випробування, що включають вимірювання діаграми спрямованості (ДС) антен. Теорія і техніка антенних вимірів до теперішнього часу розроблені високою мірою [3-15]. На цей час розроблено низку методів вимірювання ДС великоапертурних антен, багато з яких стали класичними.

Класифікацію методів вимірів на виміри у приміщеннях та виміри у вільному просторі слід вважати умовною, т.к. всі методи, що належать до даної класифікації до вимірювань у приміщеннях, можуть бути реалізовані і в вільному просторі (до

речі, вимірювання методом обльоту також можуть бути виконані в умовах закритих приміщень). Однак, на практиці, зважаючи на специфіку представлених методів, вони застосовуються, як правило, у відповідність до запропонованої класифікації.

1.3.1 Вимірювання у закритих приміщеннях

У значній кількості ситуацій антени вимірюють у закритих приміщеннях, головним чином безэховых камерах. Розміри безехових камер мають бути значними, що робить цей метод дуже дорогим.

Розроблено методи, що дозволяють послабити обмеження, зумовлені умовою дальньої зони для вимірювання ДС антен значних електричних розмірів:

- вимір ДС в дальній зоні в неідеальних умовах з усуненням впливу полів, відбитих від стін камери або розсіяних елементами конструкції вимірювального стенду;

- вимірювання амплітудно-фазового розподілу (АФР) на коротких відстанях (в зоні Френеля або в ближній зоні антени, що випробовується), з подальшим відновленням ДС.

На сьогодні значною мірою розвинена техніка вимірювань у ближній зоні.

Методологічною основою цих вимірювань є створення на невеликій відстані від досліджуваної антени якогось випромінювача, що формує в розкриві антени плоску хвилю. Це досягається двома шляхами:

- формування ділянки плоского фронту за допомогою спеціальної антени – коліматора (коліматорний метод);

- синтезування ділянки плоского фронту за рахунок послідовного приміщення слабоспрямованої антени в вузлові точки, розташовані на деякій поверхні поблизу досліджуваної антени та вимірювання амплітуди та фази поля випромінювання у цих точках. Отримана інформація обробляється та шляхом математичних розрахунків обчислюються необхідні характеристики (радіоголографічний метод).

Основою радіоголографічного є прямі вимірювання амплітудно-фазового розподілу (АФР) поля досліджуваної антени на деякій поверхні у безпосередній близькості від випромінюючої апертури. Оскільки інтенсивність поля випромінювання антеною системи та її структура різних відстанях від випромінюючої апертури однозначно математично пов'язані, то з виміряному полю певній відстані можливо розрахунковим шляхом відновити структуру поля будь-якій відстані від антени. На значній відстані від антени (у дальній зоні) структура поля визначає діаграму спрямованості. Теоретичні основи такого методологічного підходу закладені в класичних роботах з електродинаміки та теорії антен, а їх практичний додаток безпосередньо до антенних вимірів розпочався наприкінці минулого століття. Теоретично було показано, що вимірювання поля випромінювання антен у ближній зоні можливі на деякій поверхні поблизу апертури досліджуваної антени. Для плоскої, циліндричної та сферичної поверхні було запропоновано рівняння, що зв'язують структуру полів у ближній та дальній зонах. При цьому вибір тієї чи іншої поверхні визначався конструкцією антени та структурою поля випромінювання.

Загальні переваги ближнезонних вимірів полягають у тому, що виміри проводяться у приміщенні невеликих відстанях.

1.3.2 Вимірювання у вільному просторі

Незважаючи на високу ефективність зазначених підходів, їх можливості лімітовані розмірами антеної системи (як фізичними, так і електричними). Для великоапертурних стаціонарних антен радіолокаційних та радіоастрономічних систем основними методами вимірювань ДС залишаються методи дальньої зони. Зазначені методи включають:

- вимірювання по полях випромінювання позаземних джерел (радіоастрономічний метод);

- виміри, що реалізують облітний метод.

Радіоастрономічний метод дозволяє експериментально досліджувати основні характеристики випромінювання антен, такі як діаграма спрямованості (ДН), точніше, її параметри - кутове положення головного максимуму та його ширина, положення та рівні бічних пелюсток, коефіцієнт посилення (КП), а також шумову температуру (Тш) та деякі інші енергетичні характеристики антени. Методи вимірювання ДС та КП засновані на використанні природних космічних джерел радіовипромінювання як «генератори» сигналу. При вимірі Тш джерела не використовуються, а вживаються заходи для мінімізації прийому антени випромінювання з навколишнього простору. Оскільки всі природні позаземні радіоджерела знаходяться практично на нескінченній відстані від Землі (відстань до т.з. великих антен. Випромінювання природних радіоджерел, а також фонове радіовипромінювання піднебіння та землі має шумовий характер і безперервний спектр, що дає можливість експериментально досліджувати характеристики антен безпосередньо на їх робочих частотах. Ще одна перевага радіоастрономічного методу полягає в тому, що виміри можуть виконуватися на досить високих кутах місця джерела, при цьому зменшуються спотворення, що відбиваються від землі. Основні недоліки радіоастрономічних методів антенних вимірів обумовлені відносною слабкістю сигналів природних джерел. Для вимірювань доводиться використовувати спеціально розроблені приймачі слабких шумових сигналів – радіометри. При дослідженні ДС динамічний діапазон обмежений у кращому випадку рівнем перших бічних пелюсток. Оскільки випромінювання природних радіоджерел, як правило, неполяризоване, «звичайними» радіоастрономічними методами вимірюється ДС за потужністю, і не можуть бути досліджені характеристики антен на окремих поляризаціях. З іншого боку, цими методами не вимірюються фазові характеристики антени.

Обльотний метод. Зародження метрологічного забезпечення розробки, виготовлення та випробувань великогабаритних стаціонарних РЛС слід зарахувати до часу освіти на базі СКБ-3 Конструкторського бюро радіотехнічних приладів - КБРП ім. академіка О.О. Расплетіна.

Найбільш природним способом вимірювань характеристик випромінювання великоапертурних стаціонарних антенних систем у дальній зоні на той момент було використання пілотованих літальних апаратів. З цією ж метою в КБРП за участю підприємств-співвиконавців була розроблена приймально-вимірювальна апаратура, що розташовується як на літальному апараті, так і на землі поблизу об'єкта, що обмірюється, а також командно-телеметричні комплекси і програмно-алгоритмічне забезпечення (тема «Висота»). Для точного виміру координат літального апарату під час обльотів у складі вимірювальних комплексів входили спеціально розроблені РЛС «Кама-А».

При вирішенні завдань метрологічного забезпечення великогабаритних стаціонарних фазованих антенних решіток у КБ РП передбачалися такі напрямки робіт:

- створення обльотних та радіометричних вимірювальних комплексів для вимірювань на об'єктах монтажу характеристик та параметрів АФУ у дальній зоні,

- розробка методів та засобів налаштування та вимірювання характеристик АФУ амплітудно-фазовими методами по полю у розкриві як окремих антенних секцій та модулів у лабораторних та заводських умовах, так і АФУ загалом на об'єкті монтажу станцій.

За складністю реалізації та трудомісткістю виконання вимірювань облітний метод вимірювання ДН тих часів не поступався ампліфазому

1.4 Постановка завдань дослідження

Проведений аналіз існуючих методів вимірювання ДС антен зробив очевидними недоліки цих методів у частині їх застосування для вимірювань ДС через складність проведення та тривалий час процесу.

Застосування сучасних технологій у галузі безпілотної техніки, автоматизації та глобальної навігації дозволяє нівелювати недоліки існуючих методів для вимірювання ДС шляхом введеня автоматизації у цей процес.

Таким чином, у роботі ставляться наступні задачі:

- розробити процедури автоматизованого вимірювання ДС антен невеликих розмірів у приміщенні;
- зробити вибір платформи-носія вимірювального зонда;
- провести аналіз вимог та розробку апаратного забезпечення;
- розробити принципи автоматичної реєстрації результатів вимірювань та синхронізації даних;
- провести аналіз помилок вимірювань та оцінку точності методу;
- зробити математичне моделювання процесу вимірювань та відновлення об'ємної ДС на етапі постобробки даних вимірювань,
- розробити практичні прийоми та рекомендації для здійснення зазначених вимірювань.

2 РОЗРОБКА МЕТОДОЛОГІЇ ТА СТРУКТУРИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИМІРЮВАННЯ ДС

2.1 Структура та принцип роботи системи

Ручні вимірювання повільні та дають неточні результати. Під час вимірювання антена крок за кроком обертається по колу, щоб реагувати на всі електромагнітні хвилі, що оточують антену. Необхідні кроки мають бути якомога меншими; але вручну роздільна здатність зазвичай становить лише 10 градусів. Отже, між цим кроком можуть бути відсутні значення даних, особливо якщо шаблон має багато бічних пелюсток. Крім того, показання потужності, отримані на приладі вручну, часто суперечливі, тому необхідно зчитувати кілька разів і обчислювати середнє значення.

Коли вимірювання завершено та всі дані записані, дані наносяться на графік за допомогою електронної таблиці. Ця ручна техніка вимагає багато часу для завершення одного циклу вимірювання. Потрібно виміряти багато типів діаграм спрямованості антени, а також у різних положеннях антени. Крім того, необхідно також виміряти антену під впливом різних умов навколишнього середовища, таких як наявність предметів поблизу.

Іншим обмеженням діаграми спрямованості антени, виміряної вручну, є висока вартість необхідного обладнання. Вимірювальна система складається з генератора сигналу в передавальній частині, аналізатора спектру та ротатора в приймальній частині. Все обладнання досить велике і не є компактним. Щоб подолати ці проблеми, пристрій для вимірювання діаграми спрямованості та поляризації розроблено для автоматичної роботи.

Існує кілька застосувань для вимірювання та візуалізації діаграм спрямованості антени за допомогою автоматизованих методів.

У роботі була розроблена система вимірювання діаграми випромінювання та поляризації з використанням мікроконтролера, комплекту модулів радіопередавача та приймача, драйвера двигуна та інших додаткових компонентів. Ці пристрої

доступні на ринку за відносно низькими цінами. Незважаючи на те, що ця вимірювальна система працює у вузькому діапазоні частот, цей системний пристрій має низьку вартість для масового виробництва для проведення лабораторної практики.

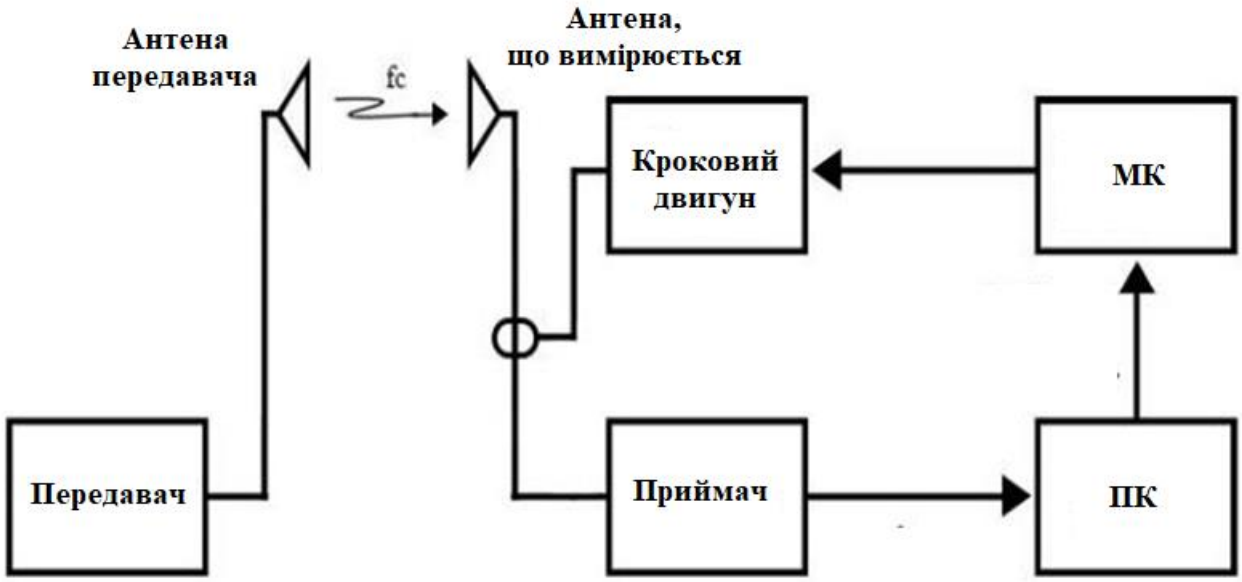


Рисунок 2.1 – Структурна схема системи

Блок-схема загальної системи показана на рис. 2.1. Ця вимірювальна система складається з двох частин: системи обробки даних з комп’ютером і системи обробки даних з мікроконтролером. Дві системи взаємодіють через послідовний зв’язок. Комп'ютер дає команди мікроконтролеру для запуску приводу приводу антени.

Тестована антена (AUT) розміщена на ротаторі на приймальній стороні, який рухається крок за кроком по колу за допомогою крокового двигуна. Рухом двигуна керує мікроконтролер. На кожному кроці, куди вказує антена відповідному напрямку, антена отримає РЧ-рівень і надсилає його одержувачу.

Приймач перетворює цей РЧ-рівень на рівень постійного струму пропорційно рівню рівню радіовипромінювання. Приймач (SDR) забезпечує виведення RSSI (received signal strength indicator, Показник рівня сигналу, що приймається), який є аналоговим сигналом пропорційно потужності сигналу, який приймає антена.

Цей вихід підключається до ПК (персонального комп'ютера/ноутбука) через послідовний зв'язок.

Розвиток системи підтримується доступністю дешевих компонентів і передовими технологіями як апаратного, так і програмного забезпечення.

Передавач і радіоприймач у нашому випадку — це трансиверний радіопакет SDR (SiK Telemetry Radio), який працює на центральній частоті 433 МГц або 915 МГц. Радіопередавач має функцію передачі радіочастотних хвиль. Антена, яка використовується в радіопередавачі, є всеспрямованою або дипольною антеною.

Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд та елементи SDR прийомо-передавача SiK Telemetry Radio

The SiK Telemetry Radio від Holybro, це невеликий, легкий прийомо-передавач, що може передавати дані отримані по серійному протоколу на більше ніж 300м з стандартною штирьовою антеною. Програмне забезпечення для керування ним має відкритий код та дозволяє організовувати пряме поовження сейрійного протоколу засобами радіоканалу. Це мікропрограмне забезпечення дозволяє просто замінити послідовний кабель для передачі будь-яких послідовних даних, включаючи телеметрію, дані корекції RTK (RTCM) або прості оператори Serial.print() без необхідності будь-якої конфігурації.

Цей комплект телеметрії включає два радіомодулі, кабель microB USB, кабель microB OTG, два кабелі JST-GH, два прямокутних роз'єми RP-SMA, дві антени 915 МГц і адаптер Type-C. Кожен радіомодуль у комплекті має потужність передачі 100 мВт, чутливість прриймача -117 дБ, повнодуплексне прозоре послідовне з'єднання на швидкості 57600 бод і оснащено портом microB USB і UART для легкого підключення.

Обидва радіоприймачі мають роз'єм microB і використовують FT230x USB-послідовну інтегральну схему, що дозволяє надзвичайно легко передавати послідовні дані від віддаленого радіоприймача до основного комп'ютера або мобільного телефону. Радіо налаштовується за допомогою простих AT-команд. Надані кабелі JST-GH роблять підключення до контактів TX/RX радіо в буквальному сенсі.

Це радіо підключається до всіх Pixhawk Standard та інших контролерів польоту, забезпечуючи найпростіший спосіб налаштувати телеметричне з'єднання між автопілотом і наземною станцією. Щоб використовувати радіокомплект послідовної телеметрії з іншим контролером, вам може знадобитися розрізати один із наданих кабелів JST-GH навпіл і лудити кінці (для вставлення в роз'єми Arduino) або припаяти з'єднання до віддаленого пристрою (марсохід, метеостанція, Arduino тощо). Підключіть інший модуль до порту USB на базовій станції, комп'ютері чи мобільному телефоні.

Нижче наведено основні функції SiK Radio:

- маленький розмір;
- невелика вага (менше 4 грамів без антени);
- доступний у варіантах 900 МГц або 433 МГц;
- чутливість приймача до -121 дБм;
- потужність передачі до 20 дБм (100 мВт);
- швидкість передачі по радіоканалу до 250 Кбіт/с;
- формування протоколу MAVLink;
- розширений спектр зі стрибками частоти (FHSS);
- адаптивне мультиплексування з тимчасовим поділом (TDM);

- підтримка LBT і AFA;

- вбудований код виправлення помилок (може виправити до 25% бітових помилок даних);

- можна використовувати з двонаправленим підсилювачем для ще більшого діапазону роботи;

- прошивка з відкритим кодом;

- AT-команди для налаштування радіо;

- команди RT для віддаленої конфігурації радіо.

- на основі радіомодулів HM-TRP з мікроконтролером Si1000 8051 і радіомодулем Si4432

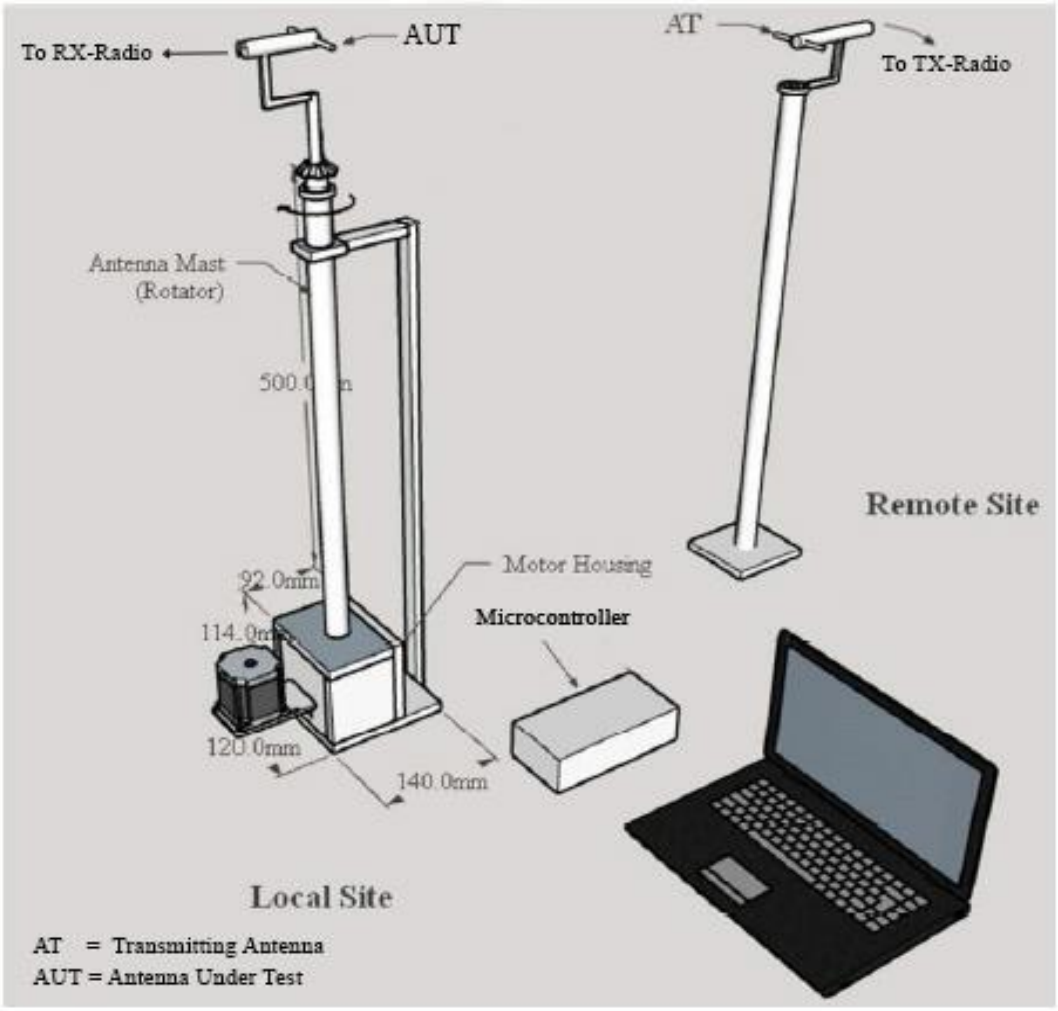


Рисунок 2.3 – Конструкція системи

На рис. 2.3 показана фізична конструкція пристрою для вимірювання діаграми спрямованості. Кроковий двигун кріпиться до обертового валу.

Радіоприймач вловлює радіочастотні хвилі через тестовану антену та перетворює хвилі на сигнал RSSI (індикатор рівня прийнятого сигналу). Радіоприймач підключається до ПК через послідовний зв'язок. Додаток на ПК дасть команду взяти вхідні дані у вигляді RSSI з радіоприймача SDR. Дані потім перетворюються в одиниці дБм і негайно відображаються в додатку. Програма керуватиме обертанням двигуна, щоб рухати крок за кроком після успішного отримання даних. Програма крокового двигуна обертає двигун кожні 1,8 градуса або 3,6 градуса. Використовується кроковий двигун NEMA 17.

Рисунок 2.4 – Кроковий двигун NEMA 17

Завдяки високому крутному моменту і низькій вартості, NEMA 17 використовують в 3D принтерах і настільних CNC верстатах. Двигун повертатиметься на 200 кроків за один повний оборот, один крок якого дорівнює 1,8°. При струмі 1,8 А кроковий мотор розвиває момент, що крутить, 48 Н·см.

На додаток до можливості безперервного обертання на один повний оберт для вимірювання діаграм спрямованості, цей двигун також можна рухати крок за кроком або направляти в потрібному напрямку. Вибірка даних діаграми спрямованості здійснюється, починаючи з 0 градусів до 356,4 (або 352,8) градусів з роздільною здатністю від 1,8 до 7,2 градусів. Програма зберігає кількість потужності, яку отримує тестована антена для кожного положення. Після введення всіх даних ці дані негайно відображаються на екрані ПК. Загалом розробка цього пристрою складається з 3 етапів: фізичне проектування та виготовлення, проектування та реалізація контролера двигуна та проектування та реалізація програмного забезпечення.

Для забезпечення комінікації між мікроконтролером та кроковим двигунов використовується драйвер крокових двигунів. В роботі для цього було обрано BTS7960-MODUL.

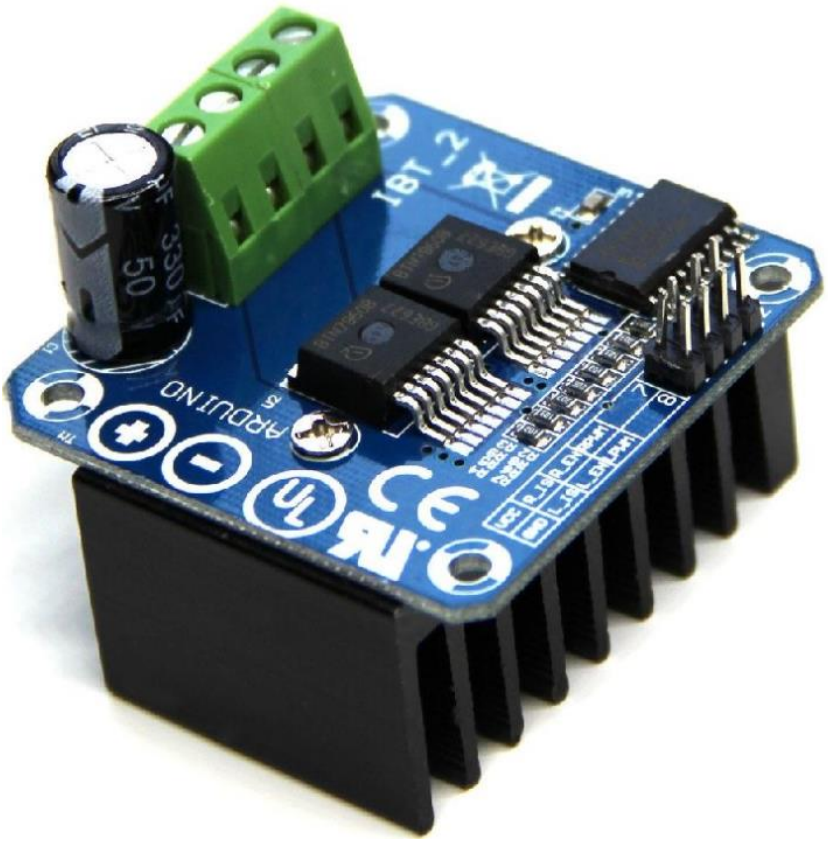


Рисунок 2.5 – Драйвер крокового двигуна BTS7960-MODUL

BTS7960-MODUL – потужний інтегральний напівмостовий драйвер розроблений компанією Infineon для інтелектуального керування електродвигунами.

Виконаний на швидкодіючих чіпах BTS7960 із низьким внутрішнім опором, тому є ідеальним рішенням для проектів із високим енергоспоживанням.

Модуль підтримує керування двигуном за допомогою ШІМ при максимальній частоті 25 кГц, має захист від короткого замикання, перегріву та перевищення вихідної напруги.

Рівень вхідного сигналу: 3.3В-5В, тому модуль драйвера сумісний з будь-якими мікроконтролерами, у тому числі і Arduino.

2.2. Опис алгоритмів роботи апаратної частини системи

Параметри, які вимірюються системою, зосереджені на вимірюванні діаграми спрямованості антени, особливо діаграми спрямованості в горизонтальній площині (горизонтальна діаграма). Діаграма спрямованості антени показує кількість енергії випромінювання, що виділяється антеною на певній відстані відповідно до інтенсивності поля в кутовому напрямку θ і ϕ. Діаграма спрямованості має максимальну інтенсивність випромінювання в напрямку осі z, яку часто називають головним пелюстком, і меншу інтенсивність випромінювання як у передній, так і в задній частині антени, яку часто називають малим пелюстком або бічним пелюстком. На рис.2.6 зображено діаграму спрямованості антени в напрямку осі z з вказаними параметрами.

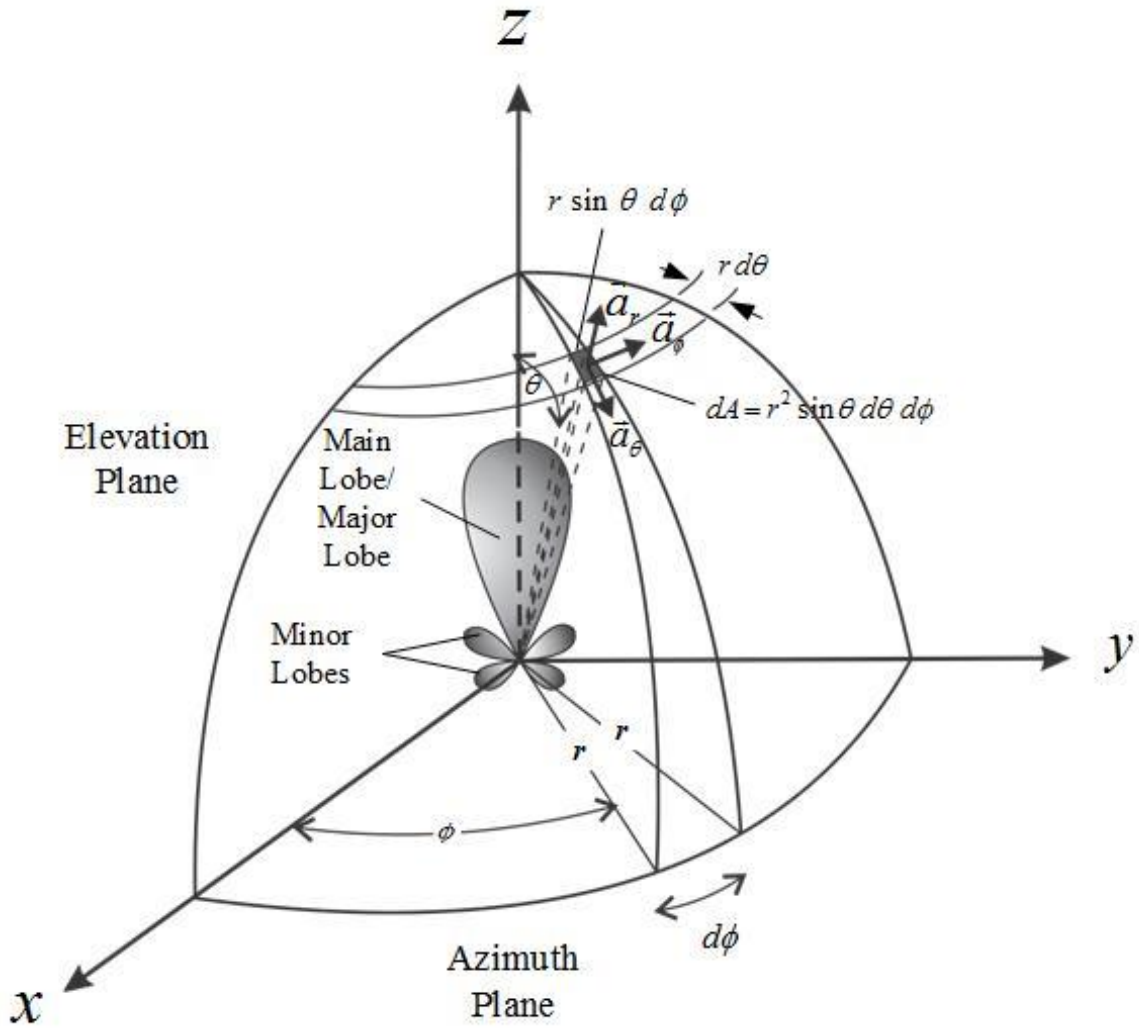


Рисунок 2.6 – Діаграма спрямованості антени в напрямку осі z

Діаграма спрямованості антени — це графік випромінювання антени в дальній зоні. Точніше, діаграма спрямованості — це графік потужності, що випромінюється від антени на одиницю тілесного кута, або інтенсивність випромінювання U [ват на одиницю тілесного кута]. Діаграма спрямованості може бути отримана простим множенням щільності потужності на певній відстані на квадрат відстані r, де щільність або щільність потужності S [ват на квадратний метр] визначається величиною середнього вектора Пойнтінга [5] **:**

$$U=r^2S \qquad (2.1)$$

Рівняння (2.1) має характер впливу відстані на інтенсивність U-випромінювання. Щоб усунути вплив відстані та переконатися, що відстань від

антени не впливає на діаграму спрямованості, вимірювання проводяться з умовою, що r знаходиться в дальньому полі. Найпростішим прикладом є ідеальна антена, яка однаково випромінює потужність у всіх напрямках або її часто називають ізотропною антеною.

Якщо загальна потужність, випромінювана антеною, дорівнює P, то потужність розподіляється по площині радіусом r, і щільність потужності на відстані r для будь-якого напрямку може бути визначена:

$$S = \frac{P}{luas} = \frac{P}{4\pi} \tag{2.2}$$

Крім того, інтенсивність випромінювання може бути визначена за рівнянням:

$$U = r^2 S = P/4\pi \tag{2.3}$$

Таким чином, рівняння (2.3) не залежить від значення відстані r.

Для вимірювання параметрів антени використовується джерело високочастотних електромагнітних хвиль (передавач із достатньою вихідною потужністю – у нас SiK Radio 100мВт) разом із передавальною антеною, яка функціонує для випромінювання електромагнітних хвиль у повітря. Антена, що тестується (AUT = Antenna Under Testing), розміщується на механічній системі, яка може обертати AUT на кут .

Щоб реалізувати автоматизований позиціонер для вимірювання сферичної діаграми спрямованості, у систему, керовану комп’ютером, необхідно включити обертання як по висоті, так і по азимуту.

Щоб виміряти ко- та крос-поляризовані компоненти діаграм спрямованості антени, сценарій Matlab пропонує користувачеві змінити поляризацію джерела перед відновленням автоматичного сканування плечем Braccio. Цього можна

досягти за допомогою ручного підключення до антени з подвійною поляризацією, такої як рупор з чотирма ребрами, шляхом фізичного обертання антени з лінійною поляризацією або за допомогою радіочастотних перемикачів з електричним керуванням, синхронізованих за допомогою того самого сценарію автоматизації. Через обмежений діапазон обертання сервоприводів Braccio 0-180_ установка була розроблена для виконання автоматизованих півсферичних вимірювань. Користувачеві пропонується вручну повернути позиціонер на 180_ над площиною азимута XY, щоб виміряти другу півсферу діаграми спрямованості антени. Це обмеження можна усунути, використовуючи інший сервопривід, здатний обертати AUT на 360_ над площиною XY.

2.3. Реалізація програмного забезпечення

Розробка програмного забезпечення складається з наступних етапів: визначення підключення крокового двигуна, конструкції механічного ротатора, розробки керування двигуном за допомогою мікроконтролера, розробки кута обертання крокового двигуна або кроку, встановлення зв’язку між VB і мікроконтролером і реалізації керування двигуном VBA (Visual Basic Application).

Це програмне забезпечення запрограмоване для виконання трьох основних завдань:

- керування кроковим двигуном за допомогою мікроконтролера;
- перетворення сигналу RSSI в одиниці дБм;
- керування електронною таблицею для створення діаграми діаграми спрямованості (E-площина та H-площина).

Процес отримання електромагнітної потужності антеною, надсилання цієї потужності до приймача, обробки потужності для RSSI, надсилання цього сигналу RSSI на ПК і перетворення цього RSSI в одиниці дБм повторюється до повного завершення обертання ротатора. Наприклад, якщо крок становить 1,8 градусів, обробку буде виконано за 200 кроків. У ноутбуці цифровий сигнал обробляється

Visual Basic для побудови та відображення на моніторі у вигляді графіка в полярній формі.

Програма мікроконтролера складається з двох підпрограм. По-перше, програма зв'язку з ПК діє як сполучна ланка між мікроконтролером і ПК. По-друге, програма керування приводом функціонує як набір команд для керування кроковим двигуном, який не підключений безпосередньо до мікроконтролера, а має драйвер для керування.

Реалізація програмного забезпечення полягає у створенні прикладного програмного забезпечення для автоматичного збору даних вимірювань діаграми спрямованості антени. Програмне забезпечення для збору даних для вимірювання діаграми спрямованості антени було запрограмовано за допомогою програми Visual Basic 6.0.

Програма графічного дисплея створена за допомогою мови програмування Visual Basic, з дисплеєм, як показано на рис.2.7.

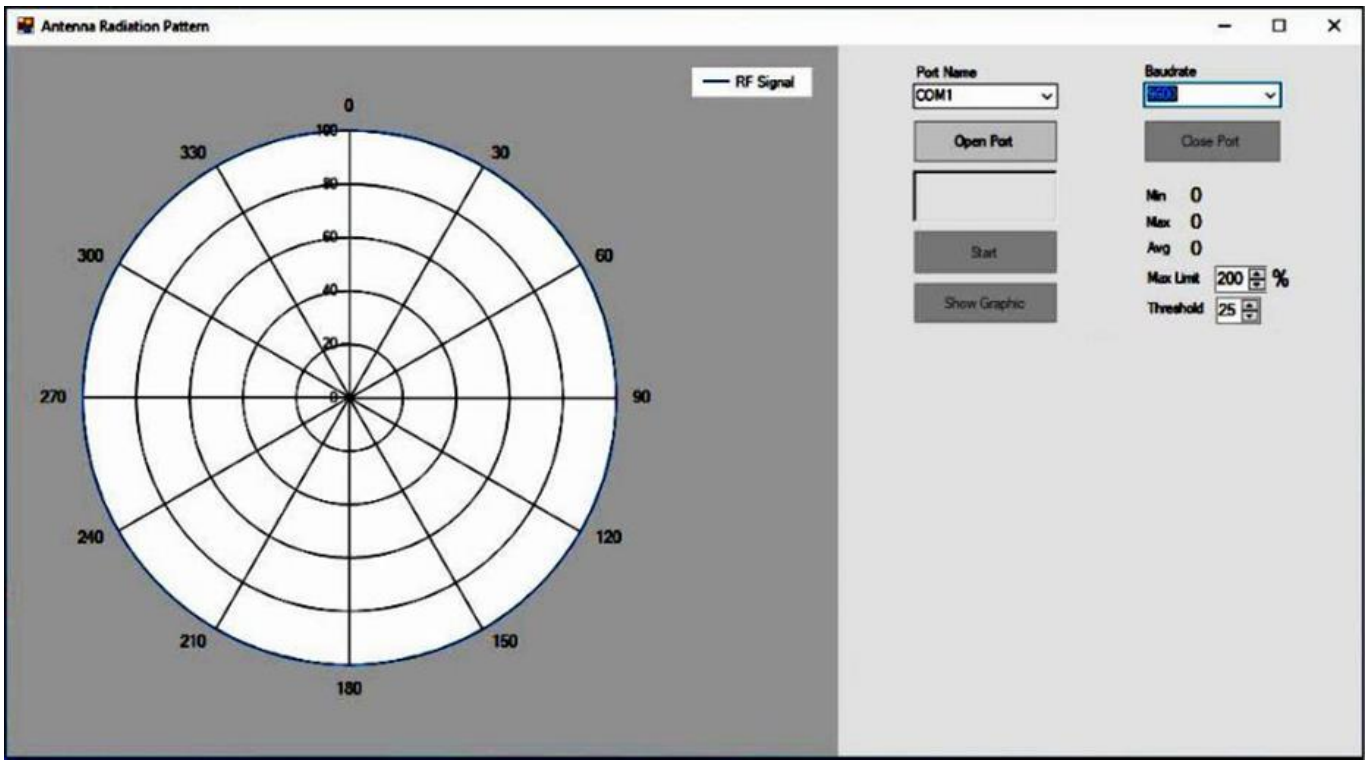


Рисунок 2.7 – Головна сторінка програми вимірювання ДС для ПК

3 ТЕСТУВАННЯ РОЗРОБЛЕНОЇ СИСТЕМИ ТА ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

3.1 Порядок проведення вимірювань

Технічні характеристики пристроїв, які використовуються в експерименті з вимірювання діаграми спрямованості, такі:

- передавач SiK Radio з потужністю 100мВт на частоті 415-490МГц;

- для антени передавача використовується чвертьлямбда-антена DP-LS2E D з кільцем посередині;

- відстань вимірювання між передавальною та приймальною антеною (AUT) становить 4 метри.

Вимірювання діаграми спрямованості напівхвильових відкритих дипольних антен виконується за різних умов:

- без сигналу передавача;

- із сигналом передавача, де положення антени передавача розташоване під кутом 90° перед ділянкою напівхвильової відкритої дипольної антени (антена передавача перпендикулярна до осі ділянки напівхвильової відкритої дипольної антени);

- із сигналом передавача, де позиція передавальної антени становить 0° перед ділянкою напівхвильової відкритої дипольної антени (антена передавача знаходиться на одній лінії з віссю напівхвильової відкритої дипольної антени);

- моделювання перешкод електромагнітної хвилі від включення моторизованого транспортного засобу поблизу зони вимірювання (вплив свічок запалювання на моторизованих транспортних засобах на результати вимірювання).

Систему оцінювали в приміщенні. Діаграмми випромінювання AUT, виміряні за допомогою запропонованої установки, порівнюються з імітованими діаграмами випромінювання від CST Microwave Studio. Поляризовані сферичні візерунки вимірювали з кутовим кроком 1,8 як в азимутальній площині, так і в площині висоти. Вимірювання спільної/перехресної поляризації проводили

шляхом обертання вимірювальної дипольної антени на 90 градусів. Напівавтоматичні вимірювання проводилися як чотириетапний процес таким чином:

- виміряйли кополяризоване випромінювання над півкулею 1;
- повернули покроково ротатор на 180 градусів, щоб виміряти півсферу 2;
- скиньте позицію ротатора та повернули поляризацію джерела для вимірювання крос-поляризованої півкулі 1;
- повернули ротатор на 180 градусів, щоб виміряти кросполяризацію випромінювання над півкулею 2.

3.2 Вимірювання діаграми спрямованості патч антени

Вимірювання діаграми спрямованості патч антени проводилось в головній площині: Е-площині та Н-площині. Під час вимірювання діаграми спрямованості дипольної антени в Е-площині вимірювана антена (напівхвильовий диполь) і передавальна антена розташовані паралельно землі.

Перш за все, як дослідна антена була використана мікросмугова антена з безконтактним живленням, реалізована на недорогій повстяній підкладці, призначена для роботи на частоті 433 МГц. На рис. 3.1 показано тривимірні діаграми спрямованості антени, змодельовані CST Microwave Studio і виміряні установкою. Спостерігаючи за обома графіками, можна помітити, що широкосмугове випромінювання плями чітко спостерігається з мінімальними відмінностями над головним пелюстком антени. Над другою півкулею, тобто зворотним випромінюванням у землю плями, можна помітити, що виміряні візерунки демонструють більш високе випромінювання та, відповідно, нижче співвідношення спереду до тилу порівняно з моделюванням. Це в значній мірі пояснюється ефектами багатопроменевості у приміщенні, що ускладнює виявлення радіаційних «нульових значень».

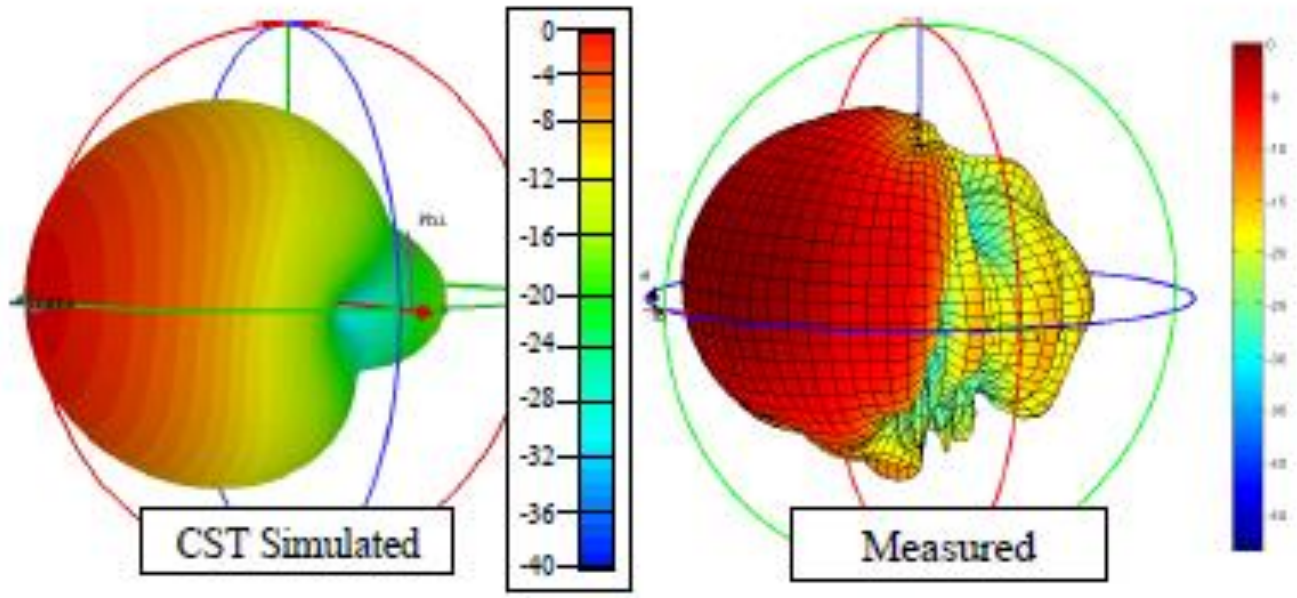


Рисунок 3.1 – Змодельовані та виміряні 3D моделі відносного посилення

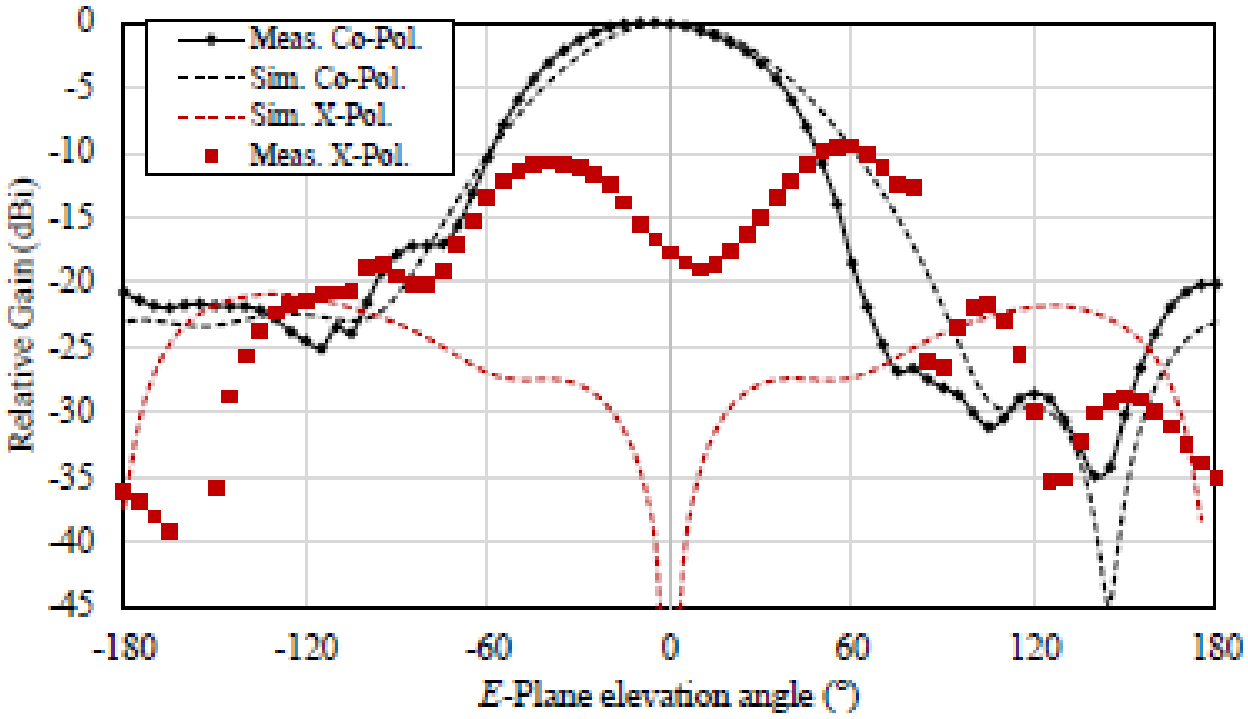


Рисунок 3.2 – Порівняння змодельованих CST і виміряних 2D шаблонів посилення мікросмужкового патча з безконтактним живленням, що працює на частоті 433 МГц, показуючи рівні ко- та крос-поляризації.

Для подальшого дослідження розбіжностей, викликаних багатопроменевостю у приміщенні, двовимірні візерунки Е-площини показані на декартовому графіку на рис. 3.2. Спостерігаючи за спільно поляризованими візерунками, можна побачити, що хоча і змодельований, і виміряний основний - промені демонструють схожість, виміряні шаблони антени виявляються більш директивними, ніж змодельовані шаблони. Це можна пояснити відображенням від позиціонера. Повідомлялося про подібні ефекти звуження променя, коли аналогічну мікросмужкову ділянку вимірювали за допомогою комерційного позиціонера в безеховій камері, але в присутності фантома людського тіла (згідно опису на покупну антену).

Що стосується зворотного випромінювання, можна побачити, що і змодельована, і виміряна діаграми демонструють хорошу узгодженість з відношенням переднього до зворотного щонайменше 20 дБ. Таким чином, за допомогою запропонованого недорогого позиціонера в ехогенному середовищі можна розв’язати співвідношення переднього і заднього сигналів між 0 і 20 дБ. Проте крос-поляризовані діаграми показують значну розбіжність понад 10 дБ у напрямку головної пелюстки. Більший виміряний крос-поляризований компонент є не тільки через відбиття від позиціонера, але також через поляризаційні домішки, що виникають від всенаправленого джерела. Щоб пояснити, ефект багатопроменевості, створений всенаправленими діаграмами диполя, призведе до більш високого перехресно-поляризованого посилення каналу між антенами. Таким чином, використання антени з подвійною поляризацією високої дискримінації ще більше покращить точність вимірювань спільної/перехресної поляризації.

Щоб продемонструвати масштабованість частоти розробленої установки, також було виміряно мікросмужковий патч 915 МГц. На рис. 3.3 показано змодельовані та виміряні поляризовані шаблони Н-площини патча 915 МГц. У той час як змодельовані та виміряні моделі головних пелюсток, здається, дуже добре узгоджуються з розбіжністю менше 1,5 дБ, виміряне зворотне випромінювання та відношення переднього до заднього демонструють більші

розбіжності порівняно з фрагментом 433 МГц на рис. 3.2. Це може бути здебільшого пояснюється додатковим відображенням навколишнього середовища. Зокрема, можна спостерігати, що розбіжність збільшується до 7-10 дБ через розміщення VNA та контрольного ПК приблизно на 90-180градусів від центру H-площини патча. Таким чином, найвищої точності вимірювань можна досягти лише у великому просторі з відстанями від землі та стіни, які перевищують відстань між вимірювальною антеною та вимірювальним диполем. Також виявилося, що перехресно-поляризовані шаблони для патча 915 МГц значно вищі, ніж їхній змодельований рівень, не показаний на рис. 3.3 через те, що він нижче 40 дБі.

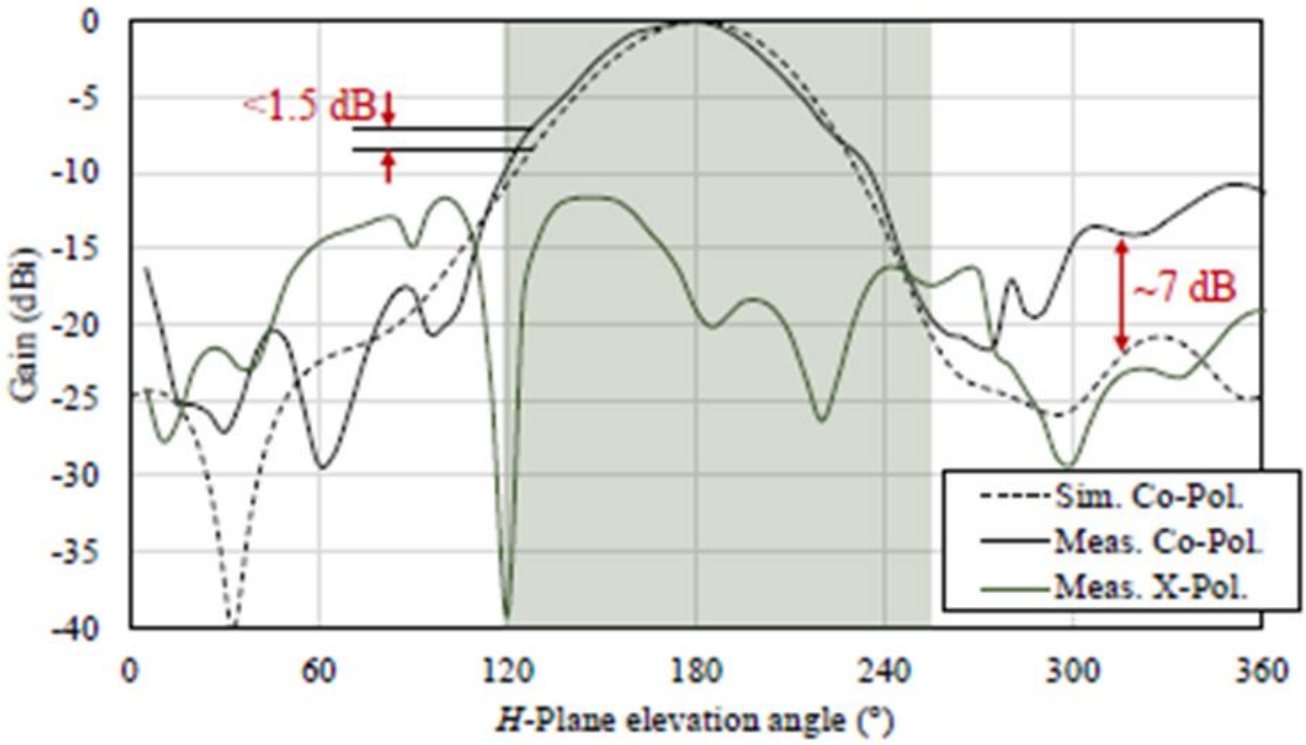


Рисунок 3.3 – Змодельований Microwave Studio і виміряний ко- та крос-поляризовані шаблони мікросмужкового патча 915 МГц; виділена область вказує на кути, при яких розбіжність становить менше 1,5 дБ

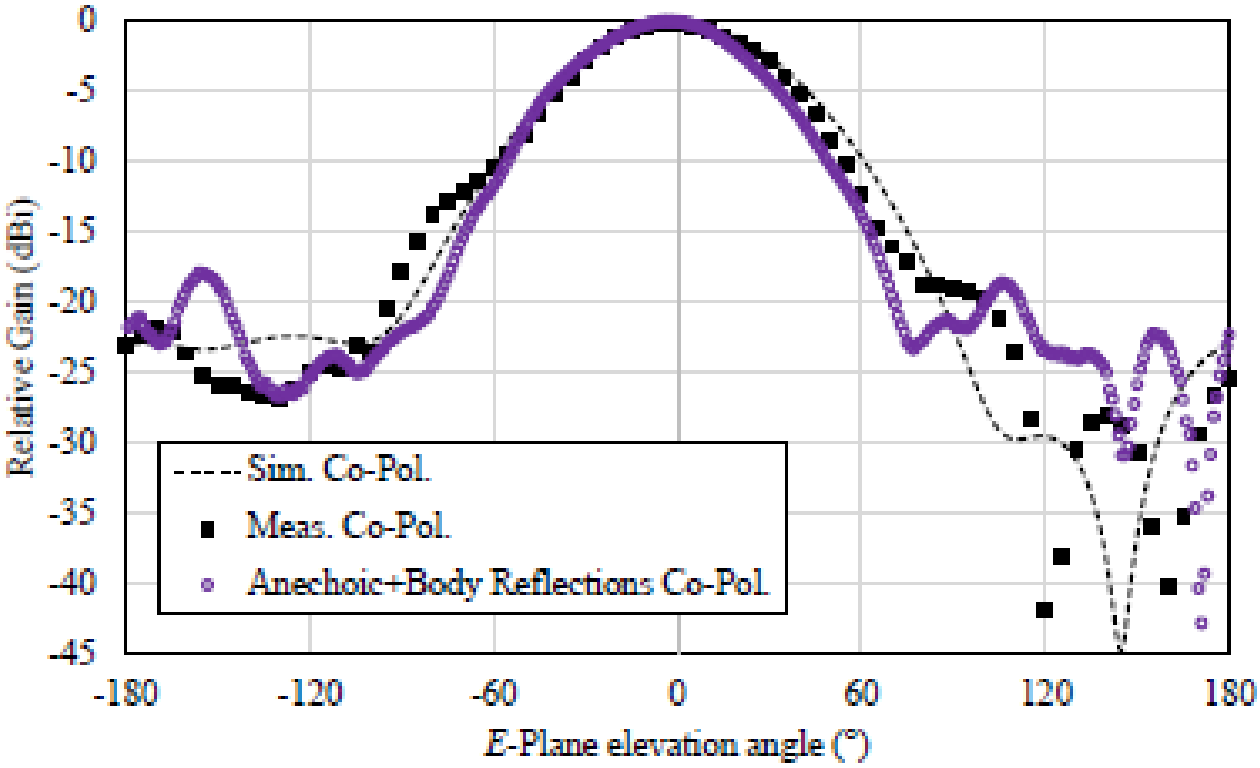


Рисунок 3.4 – Порівняння виміряних луна-патернів патча з безконтактним зв'язком 915 МГц із вимірюваннями безехової камери в [16].

На додаток до валідації розроблених установок на основі Microwave Studio, діаграми спрямованості широкоформатної патч-антени порівнюються з тими, що вимірюються на фантомі людського тіла в безеховій камері за допомогою комерційної системи позиціонування [16]. У той час як безехові вимірювання усувають відбиття від навколишнього середовища, антена була встановлена на фантомі тіла, що поглинає випромінювання, щоб імітувати ефекти затінення в реальному світі. Змодельовані моделі, виміряні безеховою камерою та недорогі моделі, виміряні за допомогою установки, показані на рис. 3.4.

Спостерігаючи за ехогенними та безеховими вимірюваннями від -60 до 60 градусів, можна побачити, що виміряні шаблони з використанням розробленої недорогої установки та комерційного позиціонера в безеховій камері дуже добре узгоджуються з коливаннями менше 1 дБ. Виявлено, що нуль випромінювання, який спостерігався при моделюванні близько 140 градусів, призводить до різних відгуків як у безехових, так і в ехогенних вимірюваннях, що підкреслює

складність визначення характеристик точно при 30 дБі. Тим не менш, діаграми випромінювання >25 дБі добре узгоджуються.

3.3 Відображення вимірювань у розробленому програмному забезпеченні

На основі результатів вимірювання діаграми спрямованості за допомогою розробленої програми без радіочастотного сигналу від передавача, показаного на рис.3.5.

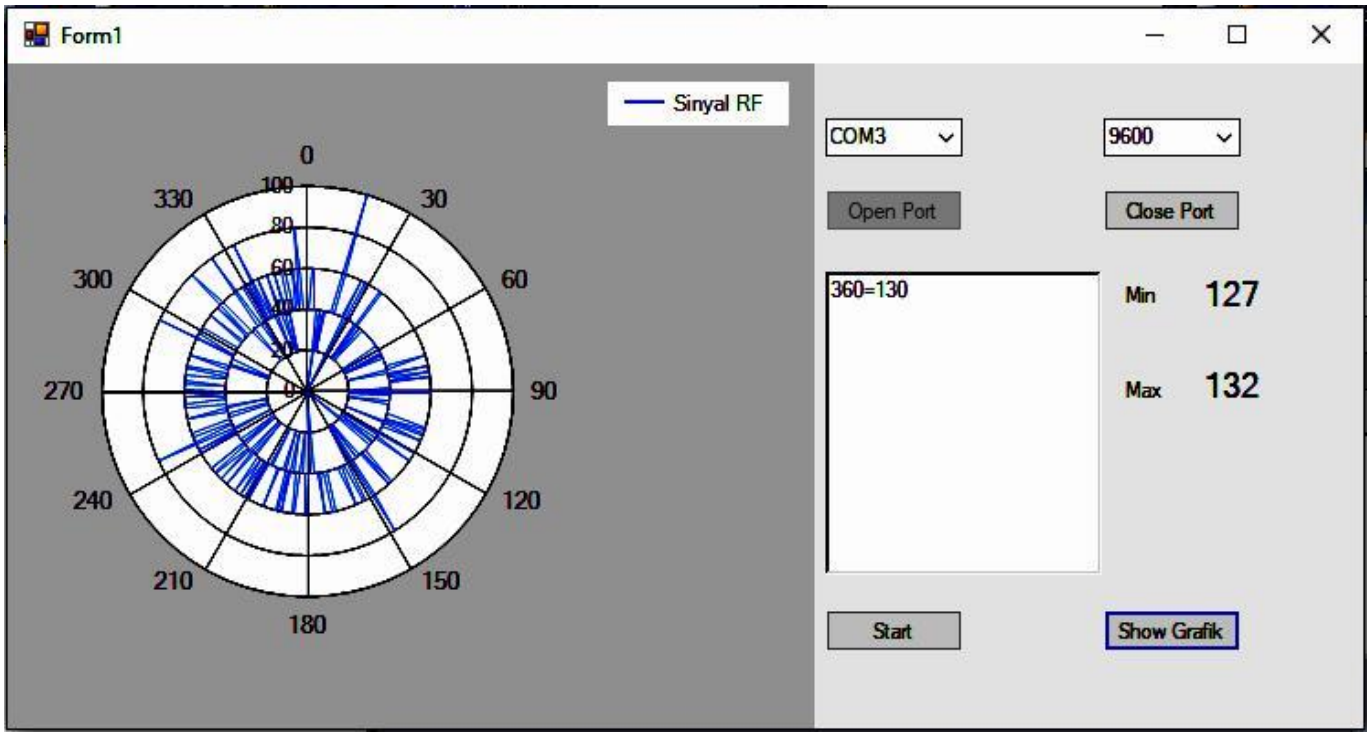


Рисунок 3.5 – Відображення діаграм спрямованості, коли радіочастотний сигнал не приймається AUT

Вимірювання діаграм спрямованості без радіочастотних сигналів від передавача використовується для опису шуму, отриманого AUT, і використовується для опису шуму на графіку діаграми спрямованості. Результати вимірювань на рис. 3.5 показують, що шумовий сигнал поширюється рівномірно на всі кути (від 0 до 360), з мінімальним значенням 127 і максимальним значенням 132. Ці значення

використовуються як еталонні в процесі усунення шуму, коли обробка сигналу надалі виконується програмою.

Наступне вимірювання полягає в розміщенні передавальної антени, розташованої під кутом 90° від осі напівхвильової відкритої дипольної антени. Результати вимірювання діаграми спрямованості показані на рис. 3.6. Мінімальне та максимальне значення для квантування радіочастотного сигналу становлять 104 та 188 відповідно. Максимальне значення набагато вище, ніж максимальне значення, коли радіочастотний сигнал відсутній, як показано на рис.3.5.

На рис.3.6 видно, що максимальна діаграма спрямованості припадає на кути 0 та 180 градусів. Це пов’язано з положенням 0 та 180 перпендикулярно до напівхвильової відкритої дипольної антени. Таким чином, напівхвильова відкрита дипольна антена буде приймати найбільший сигнал відповідно до характеристик напівхвильової відкритої дипольної антени, що має максимальну діаграму спрямованості спереду і позаду ділянки антенного елемента. Результати цього вимірювання показують, що функція компонентів радіочастотного та постійного струму, процес квантування АЦП мікроконтролера, дані, надіслані модулем на комп’ютер, і програма для відображення діаграми діаграми спрямованості відповідають характеристикам AUT пристрою. Напівхвильова відкрита дипольна антена.

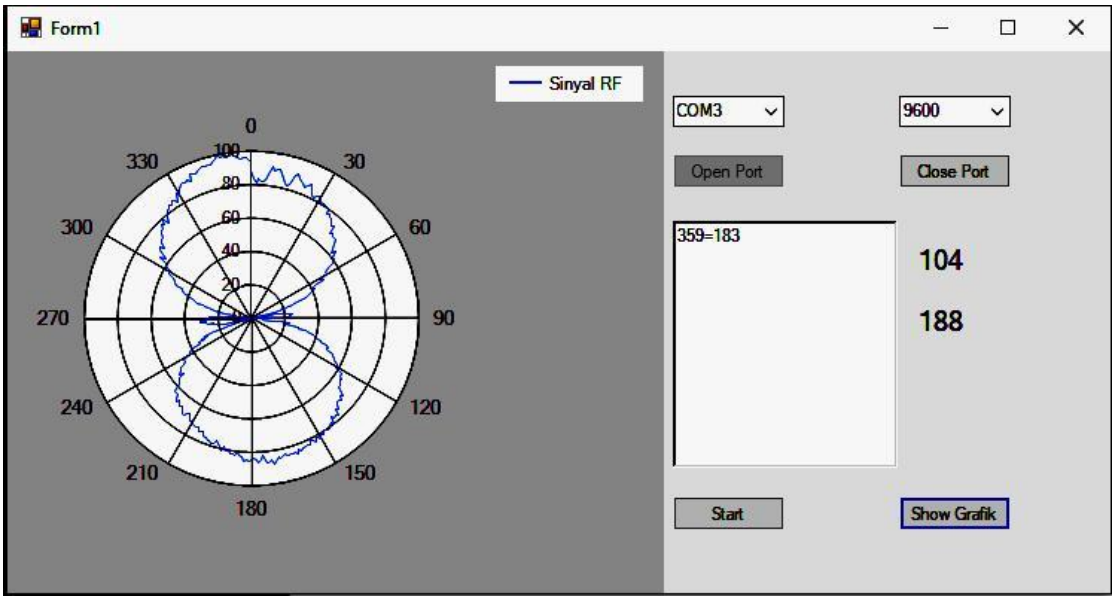


Рисунок 3.6 – Діаграма спрямованості AUT, коли джерело радіочастотного сигналу розташоване під кутом 90°.

Наступне вимірювання полягає в тому, щоб розташувати антену передавача (джерело радіочастотного сигналу) під кутом 0° (відповідно до розтягування напівхвильового елемента відкритої дипольної антени). Результати вимірювань діаграм спрямованості з цими позиціями показані на рис. 3.7.

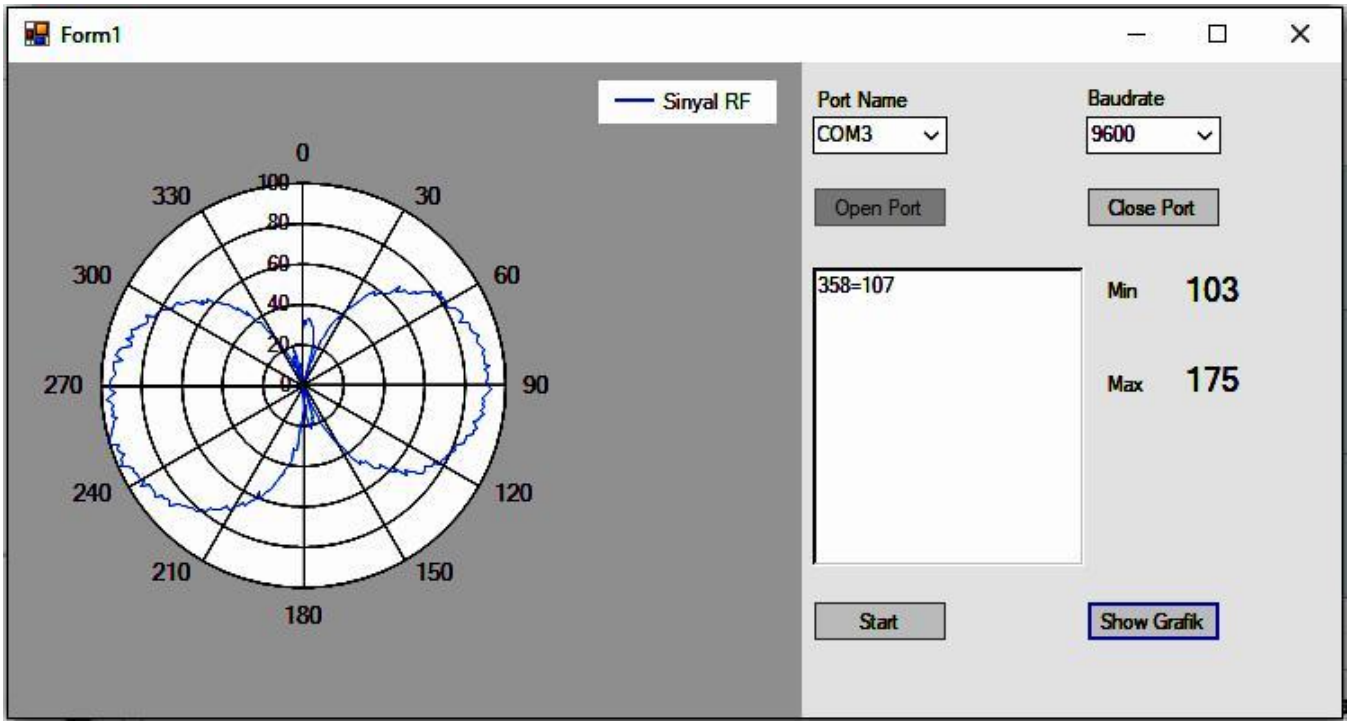


Рисунок 3.7 – Діаграма спрямованості AUT, коли джерело радіочастотного сигналу розташоване під 0 градусів

На основі рис. 3.7 видно, що максимальна діаграма спрямованості виникає, коли AUT обертається на 90 та 270 градусів. Результати цього вимірювання вказують на те, що максимальна діаграма спрямованості виникає, коли передавальна антена розташована перпендикулярно (90 або 270 градусів) до елемента напівхвильової відкритої дипольної антени. Мінімальна діаграма спрямованості виникає, коли передавальна антена розташована поруч із напівхвильовою відкритою дипольною антеною (під кутом 0 або 180 градусів). Результати цього вимірювання діаграми спрямованості узгоджуються з характеристиками напівхвильової відкритої дипольної антени, яка має максимальне випромінювання перед або позаду розтягування елемента антени та має мінімальне випромінювання з лівого чи правого боку розтягування антени. Напівхвильова відкрита дипольна антена.

Останнім удосконаленням програми є засіб для усунення стрибків дуже високої амплітуди через надходження шуму, значення якого перевищує максимальне значення радіочастотного сигналу. Це явище може бути обумовлено подачею сигналу збурення, що походить від свічок запалювання автомобілів, розташованих поблизу AUT, під час процесу вимірювання діаграми спрямованості. Засоби корекції необхідні для усунення значень, які значно перевищують середній прийнятий РЧ-сигнал, а саме шляхом встановлення максимального граничного значення під час відображення зображень вимірювань діаграми спрямованості. Таким чином, якщо під час вимірювання радіації виникають перешкоди, то відображення зображень діаграми спрямованості можна виправити шляхом усунення шумів, які заважають процесу вимірювання.

На додаток до засобу корекції, програма вдосконалена іншими аксесуарами, щоб доповнити зовнішній вигляд програми, щоб користувачі могли легше зрозуміти значення вимірювань діаграми спрямованості. Удосконалення зовнішнього вигляду програми «Діаграма спрямованості антени» показано на рис.3.8.

Грунтуючись на результатах експериментів вимірювання діаграм спрямованості антени як процесу тестування для розробки апаратного забезпечення і програмного забезпечення прикладного програмного забезпечення з AUT з використанням напівхвильової відкритої дипольної антени, можна загалом стверджувати, що апаратне забезпечення та створене програмне забезпечення придатне для використання при вимірюванні діаграм спрямованості. Необхідно продовжити тестування інших типів антен для подальшого вивчення продуктивності апаратного та програмного забезпечення діаграми спрямованості антени, а також для перевірки надійності та дійсності апаратного та програмного забезпечення діаграми спрямованості антени.

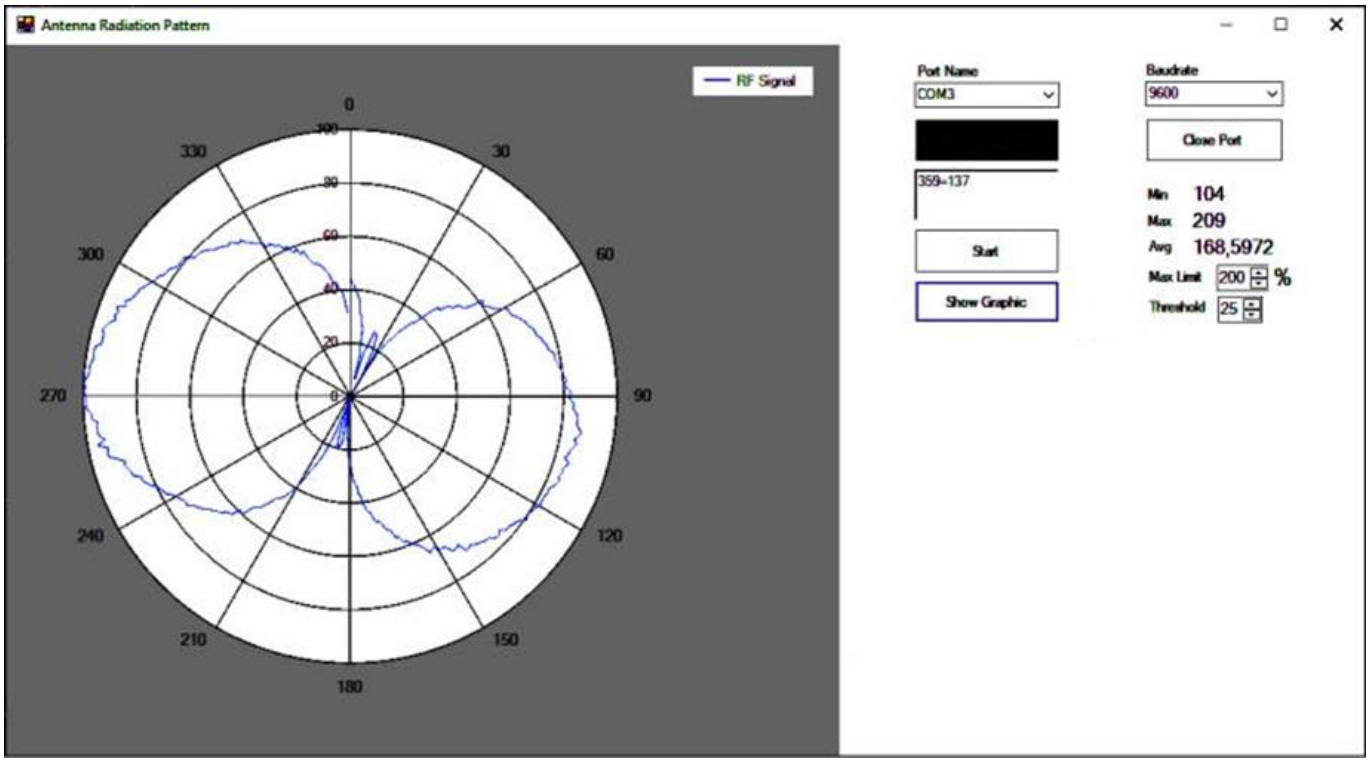


Рисунок 3.8 – Удосконалення програми шляхом додавання засобу налаштування максимального ліміту як коефіцієнта корекції даних у відображенні графіка діаграми спрямованості.

Результати вимірювання, які з’являються на екрані монітора, є виміряним рівнем потужності та графіком рівня потужності. На рис. 3.9 представлені дані про виміряний рівень потужності. На рис. 3.10 зображено полярний графік, який є діаграмою спрямованості антени в Е-площині. Крок, використаний у цьому вимірюванні, становить 7,2 °.

Рисунок 3.9 – Відображення результатів вимірювань дипольної діаграми спрямованості в площині місця

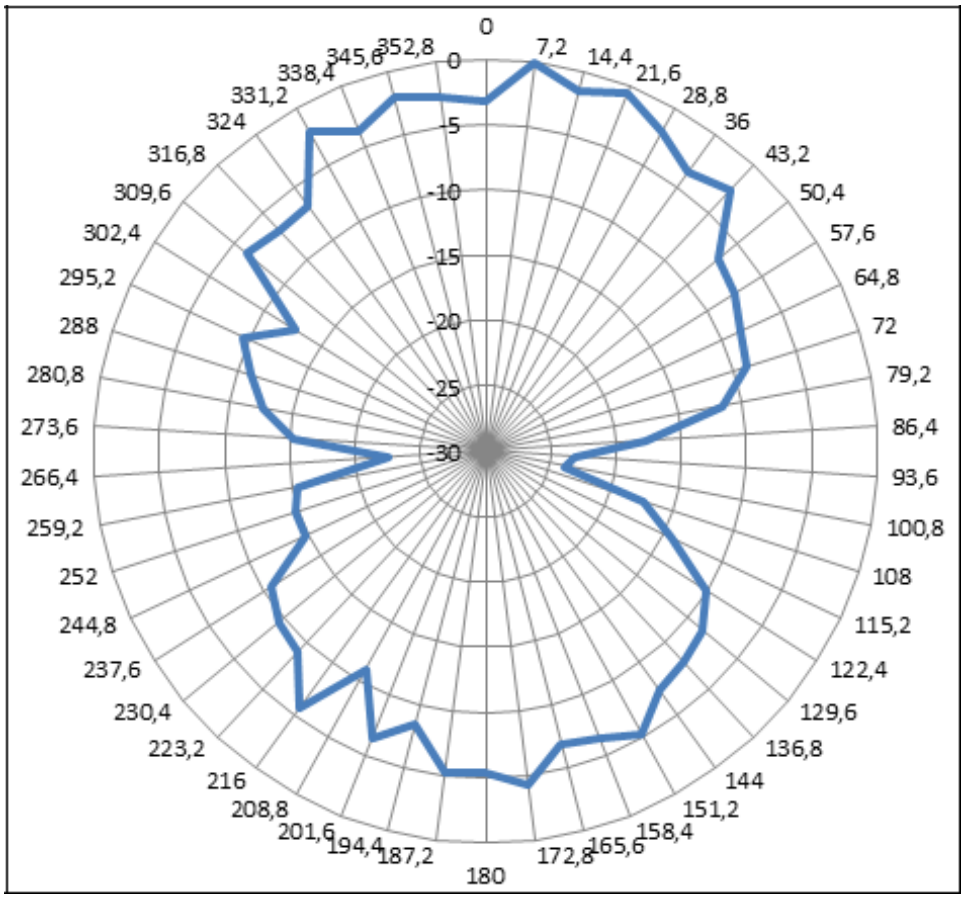


Рисунок 3.10 – Діаграма діаграми спрямованості дипольної антени на площині місця

При вимірюванні діаграми спрямованості дипольної антени в Н-площині вимірювана антена (напівхвильовий диполь) і передавальна антена перпендикулярні до землі.

Результати вимірювання, які з'являються на екрані монітора, є виміряним рівнем потужності та графіком рівня потужності. На рис.3.11 представлені дані про виміряний рівень потужності. На рисунку 6 зображено полярний графік, який є діаграмою спрямованості антени в Е-площині. Крок, використаний у цьому вимірюванні, становить 7,2 °

Рисунок 3.11 – Відображення результатів вимірювань дипольної діаграми спрямованості в азимутальній площині

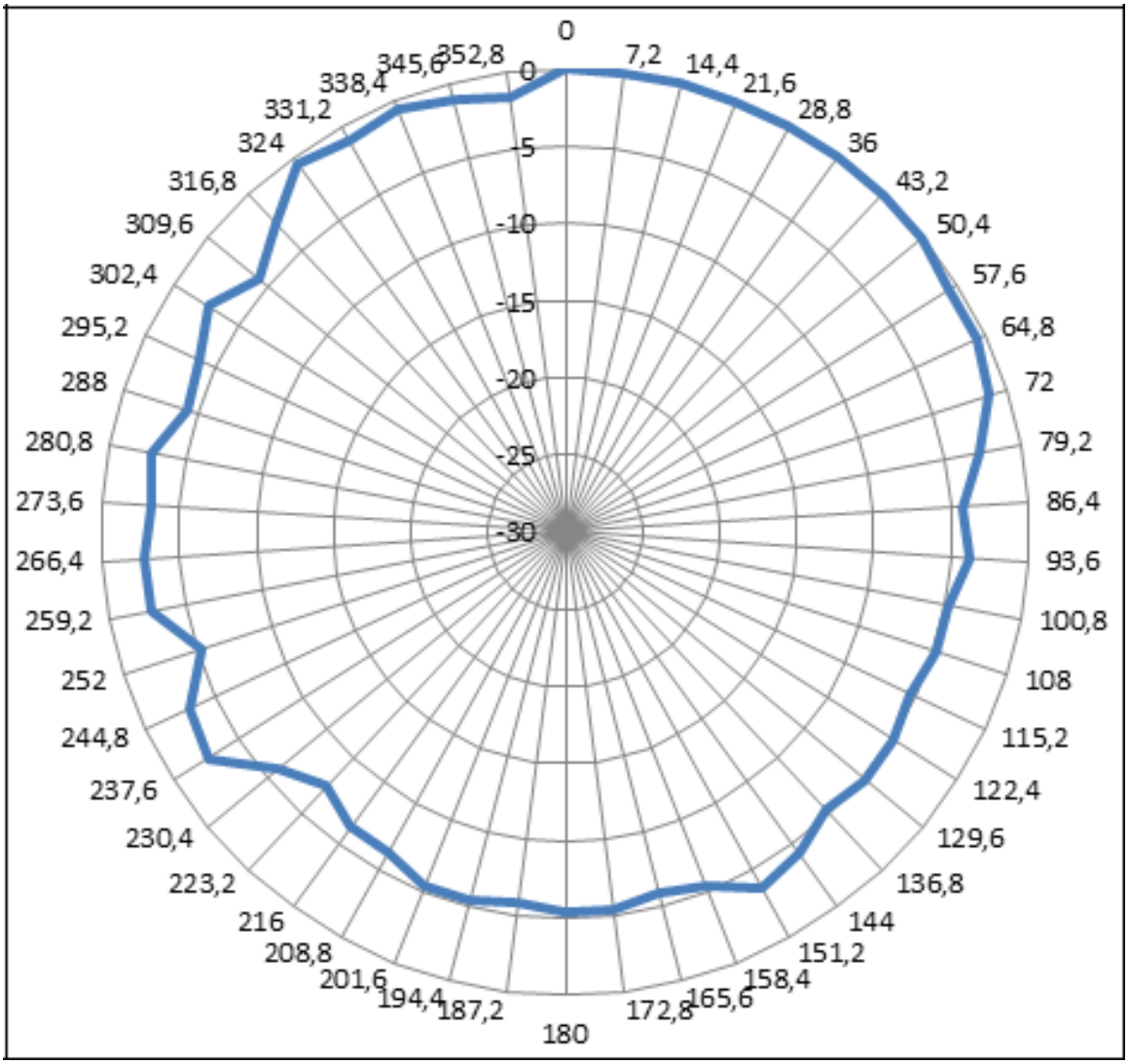


Рисунок 3.12 – Діаграма спрямованості дипольної антени на азимутальній площині

Вісімка та форми кола, показані на малюнках 3.10 і 3.12, відповідають діаграмі спрямованості напівхвильового диполя. Ці цифри відповідають формулі [12]

$$F(\theta,\phi) = \frac{\cos\left(\frac{\pi}{2}\cos\theta\right)}{\sin\theta}$$

$$0 \le \theta \le \pi\,, 0 \le \phi \le 2\pi$$

де $F(\theta,\phi)$ є шаблоном елементів напівхвильового диполя, і в цій формулі дипольний елемент лежить паралельно осі z. Тут Е-площина може бути площиною x-z або площиною y-z, а Н-площина є площиною x-y.

Як і при вимірюванні діаграми спрямованості дипольної антени в Е-площині, вимірювана антена (Yagi) і передавальна антена (диполь) розташовані паралельно землі.

На основі даних вимірювань, показаних на рис.3.13 діаграма спрямованості антени Yagi відображається, як показано на рис. 3.14 для площини місця та на рис.3.15 для площини азимута. З рисунків видно, що форма діаграми спрямованості відповідає теорії, а саме односпрямована. Оскільки антена Yagi має відносно високий коефіцієнт посилення, вони мають бічні пелюстки та задню пелюстки. Для наявності незначних часток використовується більш плавна роздільна здатність 3,6 градусів.

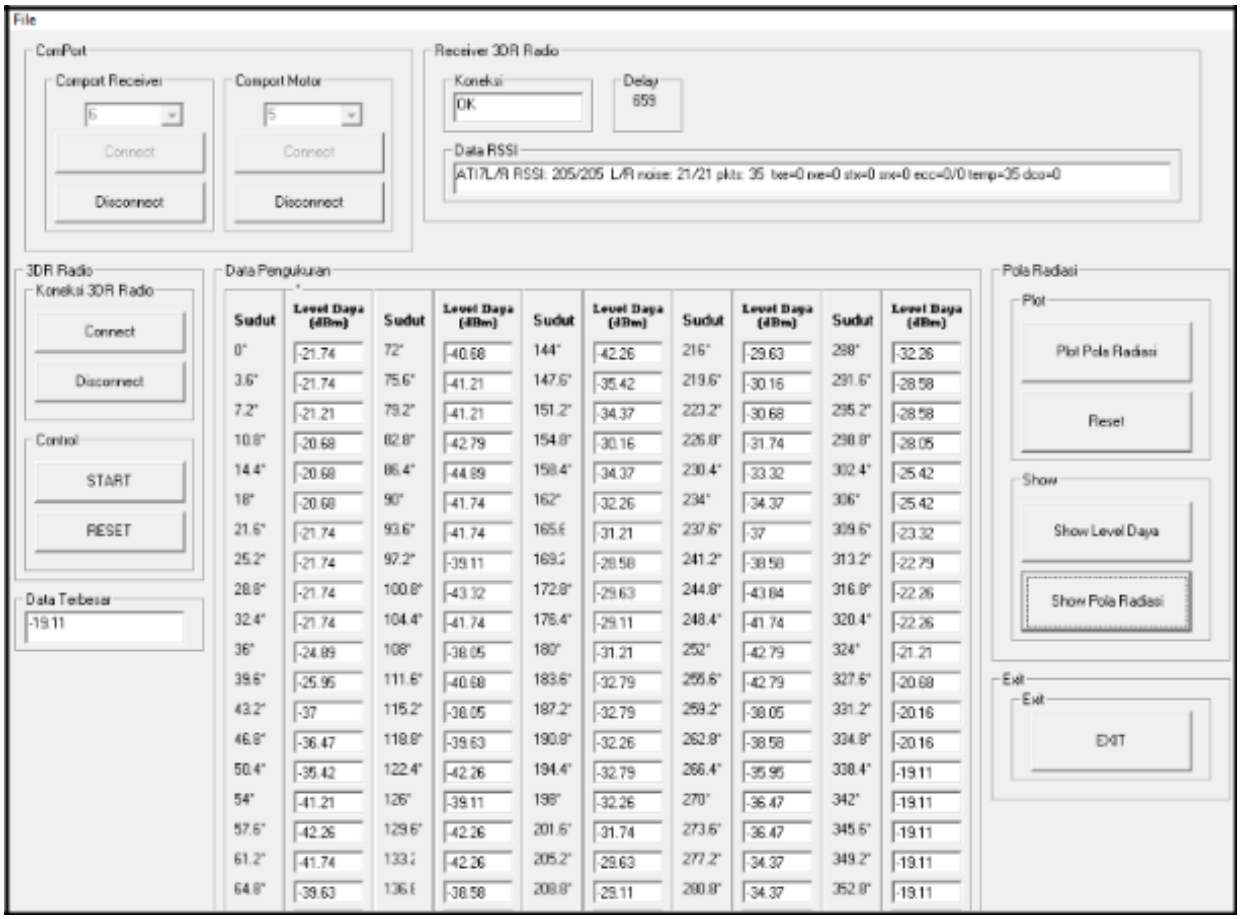


Рисунок 3.13 – Графік діаграми спрямованості антени Yagi на площині місця

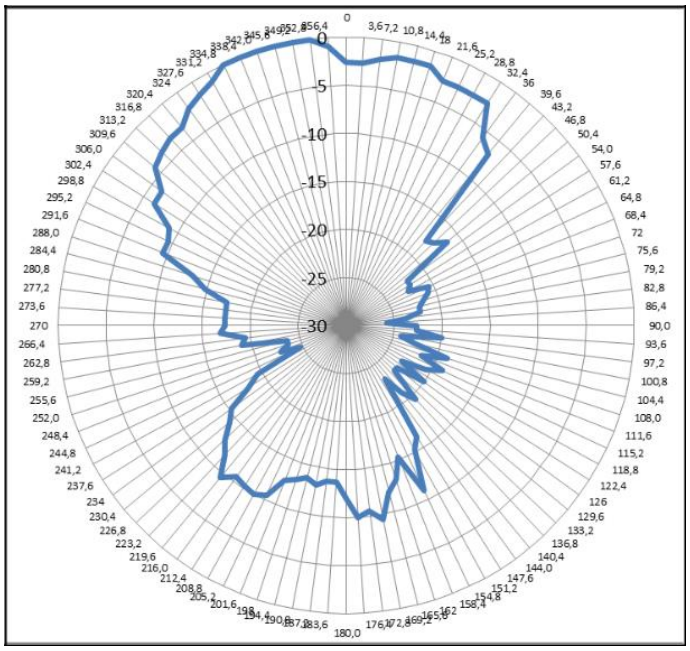


Рисунок 3.14 – Графік діаграми спрямованості антени Yagi на площині місця

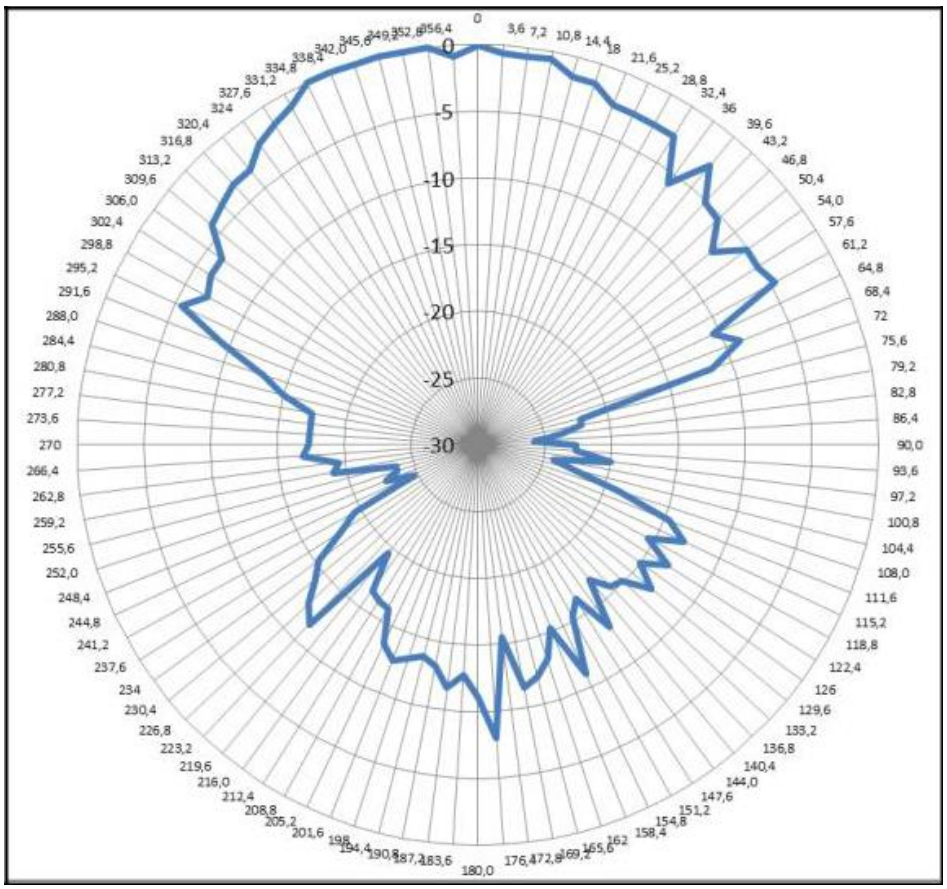


Рисунок 3.15 – Графік діаграми спрямованості антени Yagi на азимутальній площині

ВИСНОВКИ

У магістреській роботі було розроблено недороге вимірювальне обладнання для вимірювання та побудови діаграм спрямованості антен. У цьому обладнанні використовується мікроконтролер Arduino Uno, 3DR Radio Telemetry як радіоприймальний модуль та інші додаткові модульні компоненти, які прості в програмуванні, дешеві за ціною та доступні на ринку.

Уроботі проводилися дослідження вимірювального приладу, який функціонує для вимірювання параметрів антени, особливо для антен, які працюють на дуже високих (VHF) і надвисоких (UHF) частотах. Це дослідження включає спостереження за можливостями або технологічними можливостями, які можна використовувати в інженерних вимірювальних приладах, а також апаратних і програмних компонентах, які можна використовувати за відносно нижчими цінами.

На підставі отриманих експериментальних результатів вимірювання діаграми спрямованості за допомогою розробленої системи та програмного забезпечення можна зробити наступні висновки:

- пристрій діаграми спрямованості антени, що складається з апаратного модуля та прикладного програмного забезпечення для відображення графіків діаграми спрямованості, добре функціонував для вимірювання діаграми спрямованості;

- на вимірювання діаграми спрямованості сильно впливають умови навколишнього середовища, де проводиться вимірювання, особливо інтерференція електромагнітних хвиль, створюваних пристроями, відмінними від використовуваного передавача радіочастотного сигналу (джерело радіочастотного сигналу), наприклад шумові електромагнітні сигнали;

- відображення діаграм спрямованості відповідно до ідеального графіка діаграми спрямованості (відповідно до теорії) можна отримати шляхом обробки цифрових сигналів, отриманих у результаті квантування радіочастотних сигналів у сигнали постійного струму, перед відображенням у формі діаграм спрямованості.

Подальша робота за результатами цього дослідження:

- покращення обробки цифрового сигналу в результаті квантування радіочастотного сигналу в постійний, щоб графічне відображення виміряних діаграм спрямованості випромінювання антени було більш точним;

- необхідно випробувати різні типи антен, щоб перевірити надійність і достовірність вимірювань діаграм спрямованості антени;

- подальший розвиток пристрою діаграми спрямованості антени для вимірювання параметрів антени, крім діаграм спрямованості, таких як посилення, ширина променя, спрямованість і діафрагма.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. L. Ying, E. Moran, J. Ruhland, A Portable Measurement and Low-cost RF Measurement System for Instructional Use, in: 121st ASEE Annual Conference & Exposition, 2014. https://peer.asee.org/collections/2014-asee-annual-conference-exposition

2. F. M. Rea, N. Tovar, M.F. Barba, et al.,Approximate Antenna Radiation Pattern Determination Using A Low Cost Measuring System at 2.4 GHz, in: 2018 IEEE 10th Latin-American Conference on Communications (LATINCOM), 2018.

3. N. Hamzah, S.Z. Sapuan, A.M. Sayegh, et al., A Portable Measurement System for antenna's Radiation Pattern, in: 2017 IEEE Asia Pasific Microwave Conference (APMC), 2017, pp. 547-550.

4. A. Rehman, T. Rasul, B. Ijaz, et al., Development of a Cost Effective Antenna Radiation Pattern Measurement Setup, in: 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), 2016.

5. S. Mayekar, M. Bansode, S.S. Rathod, et al., An Automated Antenna Pattern Measurement System, in: 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2), 2017.

6. T. Shejbal, M. Petkov, T. Zalabsky, et al., The Workplace for Automatic Measurement Of Antennas's Radiation Patterns, in: 2014 24th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA), 2014.

7. A.P. Junfithrana, E.T. Rahardjo, F.Y. Zulkifli, et al., Development Of Automated Antenna Radiation Pattern Measurement Using Rotator Application Model To Increase Accuracy (pp. 1-5), in: 3rd International Conference on Computing, Engineering, and Design, ICCED 2017; Vol. 2018-March. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

8. A.B. Simanjuntak, B. Mulyanti, E.A. Juanda, et al., Preliminary Design of Automatic Antenna Radiation Pattern Measurement System for Antenna and Propagation Laboratory Course, in: 5th UPI International Conference on Technical and Vocational Education and Training (ICTVET) 2018, pp. 84-87.

9. 3DR Radio Telemetry 433MHz 500mW for PIXHAWK and APM, https://robu.in/product/3dr-radio-telemetry-433mhz-500mw-for-pixhawk-and-apm/

10. YKS Radio Telemetry 915 MHz Telemetry Module Open Source for APM, https://www.harrisaerial.com/product/3dr-radio-set/

11. NEMA 17 Stepper Motor, in: COMPONENTS 101, https://components101.com/motors/nema17-stepper-motor

12. W.L. Stutzman, G.A. Thiele, Antenna Theory and Design – 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, 2013, p. 75.

11. H. Chung, Q. Ma, M. Sayginer, and G. M. Rebeiz, "A packaged 0.01–26-ghz single-chip sige reflectometer for two-port vector network analyzers," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 68, no. 5, pp. 1794–1808, 2020.

12. B. Dewandaru, F. Y. Zulkifli, and E. T. Rahardjo, "A simple radiation pattern measurement for large array antennas," in 2019 IEEE Conference on Antenna Measurements Applications (CAMA), 2019, pp. 325–328.

13. "370MHz to 4GHz Radiation Measurement System," Megiq, Online: https://www.megiq.com/products/rms-0440. Accessed 09/2021.

14. "ME1300 Antenna and Propagation Courseware," Dreamcatcher, 2009, Online: https://www.avantec2.cl/imagenes/pdf/Catalogo ME1300.pdf. Accessed 09/2021.

15. C. W. Hearn, D. S. Birch, D. Newton, and S. L. Chatlin, "Open-source antenna pattern measurement system," in 2020 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA), 2020, pp. 1–6.

16. A. Rehman, T. Rasul, M. F. Shafique, B. Ijaz, K. S. Alimgeer, M. S. Khan, R. M. Shubair, and N. K. Mallat, "Development of a cost effective antenna radiation pattern measurement setup," in 2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS), 2016, pp. 1–4.

17. L. Leitao, M. Neves, F. Pinto, G. Maniezo, T. Ferreira, J. N. Matos, and A. Rocha, "2019 ieee ap-s student design contest - team knowantenna [education corner]," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 62, no. 5, pp. 120–125, 2020.

18. Y. Abdalla, M. Wasfy, S. Elmeadawy, N. Abdelhadi, and H. F. Hammad, “An antenna characterization demo system using an rfid hemispherical dome [education corner],” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 62, no. 3, pp. 107–123, 2020.

19. A. Gupta, J. Argyres, R. L. Gesner, D. R. Heileman, D. M. Feaster, C. G. Christodoulou, and F. Ayoub, “Diy antenna studio: A costeffective tool for antenna analysis [education corner],” IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 63, no. 2, pp. 83–88, 2021.

20. M. Wagih, N. Hillier, S. Yong, A. S. Weddell, and S. Beeby, “Rfpowered wearable energy harvesting and storage module based on etextile coplanar waveguide rectenna and supercapacitor,” IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, vol. 2, pp. 302 – 314, 2021.

ДОДАТОК А – ПРЕЗЕНТАЦІЯ