

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Кулинич Володимир Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 669
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Розроблення лабораторного стенду для автоматизованого аналізу діаграм спрямованості антен

(назва роботи)

Метрологія та вимірювальна техніка
(назва освітньої програми)

152 – «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»
(шифр і назва спеціальності)

В. В. Кулинич

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Криницький Олександр Степанович, к.т.н, доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

О. Є. Середюк

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Рецензент

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ, 2024 р.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>нормоконтроль</i>	<i>проф. Лютак З.П.</i>		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Аналіз сучасних методів вимірювання в'язкості і густини рідин</i>	<i>09.01.24-16.01.24</i>	
2.	<i>Теоретичні основи впливу контакту з рідиною на поширення ультразвукових хвиль</i>	<i>17.01.24-24.01.24</i>	
3.	<i>Конструктивні особливості акустичних вимірювачів в'язкості і густини</i>	<i>25.01.24-04.02.24</i>	
4.	<i>Оформлення магістерської роботи</i>	<i>05.02.24-14.02.24</i>	

Студент _____
(підпис)

Кулинич В. В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Креницький О.С.
(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Магістерська робота 58 сторінок, 27 рисунків, 2 таблиць, 10 джерел

Метою роботи є проектування, макетування та випробування лабораторного стенду для автоматизованого дослідження фазованих антенних решіток, який дозволяє досягти поліпшення точності вимірювань характеристик, зменшення трудомісткості і часу отримання достовірних результатів вимірювань діаграм спрямованості.

Методи дослідження – інженерні методи розрахунку радіотрасс, антен і елементів лабораторного стенду.

Об'єкт дослідження – є процес дослідження фазованих антенних решіток.

Предметом дослідження є фазовані антенні решітки.

В ході дипломного проекту розрахована фазована антенна решітка, коефіцієнт підсилення якої становить 17,4 дБ. Ширина ДС за половинною потужністю в горизонтальній площині складає 36°. Рівень бічних пелюсток не перевищує -16 дБ. Для управління роботою опорно-поворотного пристрою і струмів фазообертачів використовується програма Far Control. Для зчитування ДС використовується програма Polar Plot. Розроблений блок апаратного з'єднання виконано на мікроконтролерах, що дозволяє автоматизувати вимірювання без великих витрат.

ДІАГРАМА СПРЯМОВАНOSTІ, ПРОГРАМА УПРАВЛІННЯ, ОПОРНО-ПОВОРОТНИЙ ПРИСТРІЙ, ФАЗОВАНІ АНТЕННІ РЕШІТКИ, ФАЗООБЕРТАЧ, КОЕФІЦІЄНТ СПРЯМОВАНОГО ДІЇ

ABSTRACT

Master's thesis 58 pages, 27 figures, 2 tables, 17 sources

The purpose of the work is the design, layout and testing of a laboratory stand for the automated research of phased antenna arrays, which allows to improve the accuracy of characteristic measurements, reduce the time required to obtain reliable results of measurements of directional patterns.

Research methods – engineering methods for calculating radio routes, antennas and elements of a laboratory stand.

The research object is the research process of phased antenna arrays.

The subject of research is phased antenna arrays.

In the course of the diploma project, a phased antenna array was calculated, the gain of which is 17.4 dB. The width of the DS at half power in the horizontal plane is 36° . The level of the side lobes does not exceed -16 dB. The Far Control program is used to control the operation of the support-rotary device and the currents of the phase shifters. The Polar Plot program is used to read the DS. The developed hardware connection block is made on microcontrollers, which allows you to automate measurements without high costs.

DIRECTIVITY DIAGRAM, CONTROL PROGRAM, SUPPORT-ROTARY DEVICE, PHASED ANTENNA ARRAYS, PHASE SWITCH, COEFFICIENT OF DIRECT ACTION

ЗМІСТ

Вступ	6
1 Аналіз об'єкту контролю	8
1.1 Класифікація антен	8
1.1.1 Найпростіші випромінювачі	9
1.1.2 Лінійні антени	10
1.1.3 Фігурні антени	11
1.1.4 Рамкові антени	11
1.1.5 Щілинні антени	11
1.1.6 Групові випромінювачі	12
1.1.6.1 Лінійні групи	12
1.1.6.2 Площинні групи	13
1.1.6.3. Просторові групи	13
1.1.6.4 Групи з мережевим живленням	14
1.2 Будова випромінювачів	14
1.2.1 Плоскі структури	15
1.2.2 Просторові структури	15
1.2.3 Апертурні випромінювачі	16
1.2.3.1 Рефлекторні антени	16
1.2.3.2. Рупорні антени	17
1.2.3.3. Лінзові антени	17
1.2.3.4. Діелектричні антени	17
1.2.3.5 Антени на розсіяних хвилях	18
1.3 Основні параметри антенн	18
1.3.1. Діаграми спрямованості	18
1.3.2 Коефіцієнт підсилення антени	21
2. Вибір та обґрунтування структурної схеми лабораторного стенду	25
2.1 Огляд методів автоматизованих вимірювань діаграм спрямованості антенних пристроїв	25
2.1.1 Метод кінчної секції	28
2.1.2 Метод великої окружності	29
2.1.3 Порівняння методів	31
2.2 Огляд схем автоматизованих вимірювань антенних пристроїв	32
2.3 Переваги і недоліки існуючих схем	34
2.4 Вибір і обґрунтування структурної схеми і її елементів	34
2.5 Розробка електричної принципової схеми	36
2.5.1 Модуль апаратного сполучення з персональним комп'ютером	37
2.5.2 Модуль автоматизованого управління	39
3 Конструктивний розрахунок елементів лабораторного стенду	42
3.1 Розрахунок фазованої антеної решітки	42
3.2 Блоки автоматизованого управління антеною	47
3.3 Розрахунок підсилювача постійного струму на біполярному транзисторі	48
4 Експериментальні дослідження	51
4.1 Структурні схеми вимірювань параметрів і характеристик антени	51
4.2 Вимірювання діаграми спрямованості	52

4.3 Вимірювання коефіцієнта спрямованої дії	55
4.4 Джерела похибок під час вимірювань	56
Висновки	
Список посилань	

ВСТУП

Надвисокі частоти давно стали широко застосовуватися в самих різних областях техніки, в медицині, в побутовій радіоелектроніці. У будь-якому пристрої або системі, де використовується радіоканал для передачі будь-якої інформації, не обійтися без такого елемента, як антена. Фазовані антенні решітки (ФАР) – це багатоелементні антенні системи, які дозволяють змінювати положення діаграми спрямованості (ДС) в просторі шляхом зміни амплітудно-фазового розподілу електромагнітного поля в нерухомому полотні решітки, тобто, здійснювати електричне сканування ДС. Цей спосіб огляду простору є найбільш швидкодіючим, тому ФАР знайшли широке застосування в радіолокації, навігації, радіоастрономії, телебаченні, радіометрії, радіозв'язку. Найважливішою характеристикою, що визначає властивості всієї системи в цілому, є просторова діаграма спрямованості антени.

У зв'язку з цим розуміння того, як правильно досліджувати ДС антен і досягати необхідних результатів її вимірів надзвичайно важливо в діяльності будь-якого розробника або експлуатаційника радіозасобів, будь-то новачка чи професіонала.

Мета даної роботи – розробка лабораторного стенду фазованої антеної решітки з автоматизованим управлінням і обробкою даних в антенних пристроях діапазону надвисоких частот під керуванням комп'ютера.

Об'єкт дослідження – є процес дослідження фазованих антенних решіток.

Предметом дослідження є фазовані антенні решітки.

Актуальність роботи очевидна, так як аналоги є досить недешевими і використовуються, в основному, в промислових умовах.

Практична користь і технічна новизна розробки полягає в тому, що автоматизований лабораторний стенд ФАР дозволяє підвищити продуктивність вимірювальних процесів на НВЧ за рахунок легкості організації серійних вимірювань. При цьому стенд в порівнянні з аналогами має невисоку вартість, дозволяє легко отримати кінцевий результат з достатньою достовірністю і можливістю кількісної оцінки точності вимірювань.

Автоматизація вимірювань діаграм спрямованості дає можливість більш детально розглядати і вивчати основні характеристики фазованих антенних решіток, а також економить час і практично виключає вплив людського фактору при налаштуванні обладнання та підготовці його між вимірами.

1 АНАЛІЗ ОБ'ЄКТУ КОНТРОЛЮ

1.1 Класифікація антен

Антенни увійшли до сьогоднішнього побуту. Вони застосовуються в радіомовленні та телебаченні, для зв'язку, навігації та визначення місцезнаходження, в радіолокаторах та радіомаяках, у супутниковій техніці, радіоастрономії та медицині.

Історія антен налічує близько ста років. У 1877 р. німецький фізик Г. Герц у Карлсруе поставив класичні досліди для перевірки теорії поширення радіохвиль, запропонованої англійським фізиком Дж. Максвеллом. Передавальною антеною в його дослідах служив прямий провід з ємнісним навантаженням на кінці (кондуктор), а приймальні - квадратна дротяна петля.

Попередниками цих антен були дротяна антена Б. Франкліна, використана ним в 1752 для доказу електричної природи блискавок, і спроектована Т. А. Едісоном заземлена вертикальна антена, запатентована в 1885 р. для систем передачі повідомлень.

Антенни можна поділяти на групи за різними ознаками. За формою - на електричні або магнітні, за видом поляризації - на антенни горизонтальної, вертикальної або кругової поляризації, за шириною частотного діапазону - на вузькосмугові та широкосмугові, за частотними властивостями - на резонансні та аперіодичні, у напрямку випромінювання - на спрямовані та неспрямовані.

За способом збудження та підсилення антенни діляться на чотири категорії:

- прості випромінювачі;
- групові випромінювачі;
- випромінюючі структури;
- апертурні випромінювачі.

Така класифікація не завжди є однозначною тому між окремими категоріями нерідко спостерігаються перетини.

У свою чергу випромінювачі складаються з окремих елементів. До них відносять:

- найпростіші випромінювачі;
- антени:
 - лінійні;
 - фігурні;
 - рамкові;
 - щілинні;
 - активні.

1.1.1 Найпростіші випромінювачі

До цього типу належать:

- сферичний випромінювач, його ще називають ізотропною антеною. Являє собою антену без втрат, що рівномірно випромінює на всі боки або приймає з усіх напрямків. Діаграмою спрямованості антени є сфера. Така антена неможлива, але використовується як теоретичний еталон;

- диполь Герца. Випромінювач носить ім'я німецького фізика Г. Р. Герца його називають елементарним електричним випромінювачем або елементарним електричним вібратором. Для реалізації диполя використовується вібратор із кінцевими ємностями, укорочений щодо довжини хвилі випромінювання. Порівняно з ізотропним випромінювачем він має спрямованість, перпендикулярну до осі вібратора. Діаграма спрямованості має вигляд двох кіл з нульовими значеннями в напрямках осі диполя;

- диполь Фітцджеральда. Названий на честь ірландського фізика Ф. Дж. Фітцджеральда та також відомий як елементарний магнітний випромінювач або елементарний магнітний вібратор. Реалізується у вигляді струмової рамки, розмір якої менший за довжину хвилі. На відміну від ізотропного випромінювача характеризується спрямованістю, що відповідає площині рамки. Діаграма спрямованості складається з двох кіл з двома нульовими значеннями в напрямках, перпендикулярних площині рамки;

- випромінювач Гюйгенса. Носить ім'я нідерландського фізика Х. Гюйгенса є поєднанням невеликої рамки (магнітна частина) і короткого

вібратора в її площині (електрична частина). Такий пристрій застосовується для визначення напрямку радіопеленгації. Діаграми спрямованості у горизонтальній та вертикальній площинах виглядають як кардіоїди та мають одну нульову точку.

1.1.2 Лінійні антени

До лінійних антен відносяться відкриті (електричні) антени з прямолінійними елементами:

- диполь або вібратор. Найпростішою антеною із симетричним живленням є двополюсник (диполь) із синусоїдальним розподілом струму. Напівхвильовий вібратор характеризується довжиною $\lambda/2$ (також поширена назва – дуплет). Довжина хвильового вібратора дорівнює λ (подвійний "Цепелін"). Антену довжиною $1,28 \lambda$ називають подовженим подвійним "Цепеліном". Ширококутовий вібратор є диполем у вигляді конуса (конічний вібратор, подвійний конічний вібратор) або площинний диполь (віяловий вібратор, плоский вібратор). До несиметричних (переважно вертикальних) вібраторів відносяться коаксіальний вібратор, конусно-циліндрична та дисконусна антени;

- монополь. Інші назви – уніполь, напівдиполь, антена Марконі. До найпростіших типів антен з несиметричним живленням належить однополюсник (монополь) або напівдиполь з синусоїдальним розподілом струму над провідною поверхнею (землею). Довжина антен становить $\lambda/4$. Подібні антени належать до типу Groundplane, якщо провідна поверхня замінена противагою. Використовуються також вертикальні антени довжиною $\lambda/2$ та $5\lambda/8$. До ширококутових монополів відносяться конічні та плоскі віялові антени;

- довгий провід. Довжина цих дротяних антен більша за робочу довжину хвилі. Вони бувають симетричними або асиметричними, живляться стоячими або хвилями, що біжать, можуть бути резонансними або аперіодичними. Прикладами служать змійкова та аеростатна антени, антена Бевереджа, TFD, T2FD.

1.1.3 Фігурні антени

Це відкриті (електричні) антени із фігурними елементами:

- вироджений вібратор. Такі антени служать для забезпечення широкосмугового (зокрема, циліндричний вібратор) або для отримання кругової діаграми спрямованості, наприклад кутовий вібратор $5\text{d}10$;
- вироджений монополь. Служить для забезпечення широкосмугового, скажімо в подвійній конічної або циліндричної антени;
- вигнутий вібратор. Забезпечує широкополосність, зокрема в чашковому вібраторі. Використовується для оптимізації посилення як полуторного диполя за Ландсторфером -антена «змах крила»;
- вигнутий монополь. Надає широкосмугового, наприклад, чашкового випромінювача.

1.1.4 Рамкові антени

Рамковими називаються замкнуті антени з елементами у вигляді рамок, а саме:

- малу рамку. Застаріла назва – магнітна антена. Її периметр малий порівняно з довжиною хвилі і становить приблизно $1/10 \lambda$. Приклад антени цього типу - обмотка котушки або феритова стрижнева антена;
- велика рамка. Периметр великої рамки становить приблизно λ ; до таких антен відносяться петльовий вібратор, дискова та квадратна антени та антена типу Delta-Loop.

1.1.5 Щілинні антени

Замкнуті антени із щілинними елементами на провідній поверхні. Довжина щілин становить від $X/2$ до X , а самі вони бувають лінійними (щілини на

площині або циліндрі) або хрестоподібними (наприклад, на щілинній дисковій антені).

Активна антена є пасивним елементом (вібратор або монополь) з вбудованою «активною частиною» (підсилювачем). В результаті виходить малогабаритна чутлива та широкосмугова антенна система, проте лінійність її обмежена і не дотримується принципу взаємності. Приклад: активні приймальні антени.

1.1.6 Групові випромінювачі

Випромінювач утворюється групою окремих випромінюючих пристроїв. Властивості випромінювання визначаються розташуванням випромінювачів та особливостями їх живлення по фазі та амплітуді. Завдяки управлінню фазою досягається електронне сканування простору головним променем (група із фазовим управлінням). Кількість окремих випромінювачів може бути довільною, що дозволяє отримувати практично будь-який розподіл випромінювання в просторі.

Ця категорія антен поділяється на такі групи:

- лінійні;
- площинні;
- просторові;
- матричні.

1.1.6.1 Лінійні групи

Окремі випромінювачі групи збудовані в лінію (одномірною побудова). Цей тип включає випромінювачі:

- паралельні - синфазно збуджувана комбінація послідовності окремих елементів (зокрема, вібраторів), що випромінює нормалі до площини, в якій вони лежать. Приклади: антени Франкліна, Брюса, Шире-Мезні;

- поздовжні – послідовність окремих елементів (зокрема, вібраторів), що збуджуються у протифазі та випромінюють у загальному напрямку. Приклади: "хвильовий канал", схрещений "хвильовий канал", рейкова антена, спеціальна ZL, HB9CV.

1.1.6.2 Площинні групи

Окремі випромінювачі розташовуються в одній площині (двовимірне розподілення), як правило, перед відбивачем. Група може складатися з кількох підгруп (2×2, 4×4 тощо). Сюди входять:

- полотна. Для роботи в короткохвильовому діапазоні будуються антенні полотна з хвилевих або напівхвильових вібраторів;
- ґрати. Застосовуються в УКХ та телевізійному мовленні і складаються з хвильових або напівхвильових вібраторів, наприклад у вигляді чотирьох-або восьмизначних матриць;
- площинні антени. Використовуються в мікрохвильовому діапазоні як супутникові. Одиночними випромінювачами є вібратори, площинні (прямокутні або схрещені випромінювачі) або щілинні антени;
- підсумовуючі випромінювачі. Поодинокі випромінювачі у вигляді вібраторів або довгодротяних антен розміщуються в одній і тій же площині різних конфігураціях. Загальне випромінювання є сумою складових випромінювань. Приклади: турнікетна, У-подібна та ромбічна антени.

1.1.6.3 Просторові групи

Характеризуються тривимірним розміщенням одиночних випромінювачів. Включають у себе:

- кільцеві випромінювачі. Поодинокі випромінювачі цієї групи розміщуються по колу або утворюють правильний багатокутник;

- **всеспрямований випромінювач.** Завдяки синфазному живленню одиночних випромінювачів вдається досягти рівномірного або майже рівномірного поширення випромінювання в усіх напрямках. Приклади: квадрантна антена, дипольна рамка, чотирикутна рамка, антена типу «конюшинний лист»;

- **спрямований випромінювач.** При правильному виборі фаз одиночних випромінювачів кільцевий вібратор здатний діяти як спрямована антена. Приклад: кільцева антена решітка;

- **конформні групи.** Поодинокі випромінювачі розміщуються на поверхні сфери, циліндра чи конуса.

1.1.6.4 Групи з мережевим живленням

Використовуються дві системи живлення:

- **матрична.** При збудженні на одній і тій же частоті система дозволяє одночасно формувати безліч незалежних одна від одної діаграм спрямованості. Зв'язок входів та виходів забезпечує матрична решітка завдяки фазообертачам та спрямованим відгалужувачам. Приклад: матриця Батлер;

- **адаптивна.** Положення головного променя та нульових точок діаграми спрямованості групової антени досягаються завданням необхідних фаз та амплітуд. приклад: адаптивна антенна система.

1.2 Будова випромінювачів

Випромінювачі складаються з випромінюючих структур різних форм. У рамках цієї категорії виділяють два підвиди структур:

- **пласкі;**
- **просторові.**

1.2.1 Плоскі структури

До них належать такі структури:

- Прямолінійні. Окремі елементи таких випромінювачів розміщуються вздовж прямої лінії. Приклад: логоперіодична (LP) вібраторна або монопольна антена;
- зігнуті. Приклад: логоперіодична У-подібна антена;
- складчасті. Приклад: антени у формі меандра чи зигзагу;
- із вигинами. Приклад: логоперіодична вібраторна антена з контуром оптимізації посилення (Ландсторфером);
- закручені (область спіральних антен). Приклад: архімедові спіралі, логарифмічні спіралі, спірально-щілинні антени;
- площинні. Приклад: логоперіодична планарна антена.

1.2.2 Просторові структури

Ця група включає:

- структури із зламом. Дві логоперіодичні антени, що стикаються з передніми кінцями;
- циліндричні спіральні антени. Залежно від габаритів спіралі розрізняють два режими випромінювання: нормальний. Називається також режимом всеспрямованого або радіального випромінювання. Якщо розмір спіралі малий проти довжиною хвилі, то випромінювання структури поширюється перпендикулярно осі спіралі. Приклад: кручена антена радіомікрофона;
 - аксіальний. Якщо розмір спіралі наближається до довжини хвилі, то структура випромінює вздовж осі спіралі, причому строго на осі з круговою поляризацією, а поза осі - з еліптичною. Приклад: спіральні антени метрового та дециметрового діапазонів;
- кінчні спіральні антени. Залежно від габаритів спіралі розрізняють два режими випромінювання:

-Нормальний. Називається також режимом всеспрямованого або радіального випромінювання. Якщо діаметр спіралі малий у порівнянні з довжиною хвилі, то випромінювання структури поширюється перпендикулярно до осі спіралі. Приклад: спіральна антена зі змінним діаметром, спіральний вібратор;

-аксіальний. Структура випромінює вздовж осі, якщо діаметр спіралі близький до довжини хвилі. Приклад: конічна спіральна антена.

1.2.3 Апертурні випромінювачі

Випромінювач утворений поверхнею розкриття (апертурою). Діаграма спрямованості таких антен залежить від форми та розмірів апертури та розподілу на ній поля випромінювання. До цієї категорії належать також антени, що випромінюють вищі гармоніки. Ця категорія поділяється на такі антени:

- дзеркальні;
- рупорні;
- лінзові;
- діелектричні;
- на розсіяних хвилях.

1.2.3.1 Рефлекторні антени

Називаються також дзеркальними. Випромінювання, що падає на них, відбивається без втрат. Дзеркала можуть бути:

- плоскі. У цю групу входять, наприклад, плоский відбивач, полотно відбивачів, дзеркало, що обертає;
- складними. Включають у себе кутовий і прямокутний відбивачі, відбивач Ван Атта (Van Atta).

1.2.3.2. Рупорні антени

Енергія, що надійшла у хвилевід, випромінюється через його відкритий кінець.

До цього типу належать:

- антена з порожнистого провідника. Відкритий порожнистий провідник круглого або квадратного поперечного перерізу діє як антена;
- рупорний випромінювач. Воронкоподібне розширення порожнистого провідника підвищує його випромінювальну здатність. Приклади: Е- і Н-площинні секторіальні рупори, пірамідальний і конічний рупори.

1.2.3.3. Лінзові антени

Для перетворення викривленого фазового фронту використовуються лінзи наступних типів:

- що прискорюють, тобто збільшують фазову швидкість. Приклад: лінзи з металевих пластин, пластин з отворами, увігнуті діелектричні; ступінчасті;
- уповільнюють, тобто зменшують фазову швидкість. Приклади таких лінз: опуклі діелектричні з металевих смуг, обхідні;
- ширококутні. Фазова швидкість залежить від координат променя в лінзі.

Приклад: лінзи Лунеберга;

ближнього поля. Є короткими діелектричними випромінювачами з майже однаковими поздовжніми і поперечними розмірами.

1.2.3.4. Діелектричні антени

Йдеться про поздовжньому випромінювачі, дія якого заснована на провідності поверхневих хвиль. Буває двох типів:

- короткий - те саме, що й лінза ближнього поля;
- довгий:

-стрижневий, що складається з конічних або циліндричних стрижнів (наприклад, стержнева полістиролова антена);

-трубчастий - утворений циліндричною трубкою;

- ступінчастий - виконаний із стрижнів, товщина яких змінюється ступінчасто;

- пластичастий - складений з пластин, товщина яких змінюється східчасто.

1.2.3.5 Антени на розсіяних хвилях

Випромінювання хвиль, що поширюються, виходить крізь отвори хвилеводу, розташовані через рівні або періодично змінюються проміжки. До таких антен відносяться:

- випромінююча коаксіальна лінія. Випромінювання здійснюється за допомогою періодичних щілин або отворів в оболонці коаксіальної лінії;
- поздовжні щілини у хвилеводі. Випромінювання проходить крізь довгий проріз у прямокутному або круглому хвилеводі;
- поперечні прорізи у прямокутному хвилеводі. Випромінювання проникає через ряд поперечних прорізів;
- антена поверхневих хвиль. Випромінювання йде з відкритого хвилеводу у періодично розташованих металевих заглиблень або виступів або з мікросмужкової лінії з прорізами. Приклад: антени із гофрами.

1.3 Основні параметри антенн

1.3.1. Діаграми спрямованості

Антенні пристрої незалежно від діапазону хвиль і конкретних особливостей приймально-передавальної апаратури служать або для випромінювання електромагнітної енергії в простір (передаючі антени), або для прийому цієї енергії з простору (приймальні антени).

Більшість антен, застосовуваних на надвисоких частотах, — спрямовані, тобто забезпечують прийом чи випромінювання лише межах певних секторів.

Здатність антен концентрувати випромінювану електромагнітну енергію характеризують спеціальні графіки, які називаються діаграмами спрямованості. Зазвичай діаграми спрямованості будують для двох площин: горизонтальної та вертикальної.

Діаграма спрямованості антени це графік залежності напруги сигналу на вході приймача від кута повороту даної антени у відповідній площині при роботі цієї антени або на передачу, або на прийом.

Слід пам'ятати, що діаграма спрямованості антени не залежить від того, як застосовується антена передавання чи приймання, тобто будь-яка антена є оборотною.

На рис. 1.1 наведена діаграма спрямованості, побудована в полярних координатах. У цієї діаграми напрям максимального сигналу поєднано з напрямком початку відліку кутів повороту антени, а сам максимальний сигнал прийнятий за одиницю, тобто у напрямку радіусів векторів тут відкладено не сама величина інтенсивності сигналу E , а пропорційна їй величина E/E_{max} .

З рис. 1.1 видно, що діаграма спрямованості має характерну пелюсткоподібну форму.

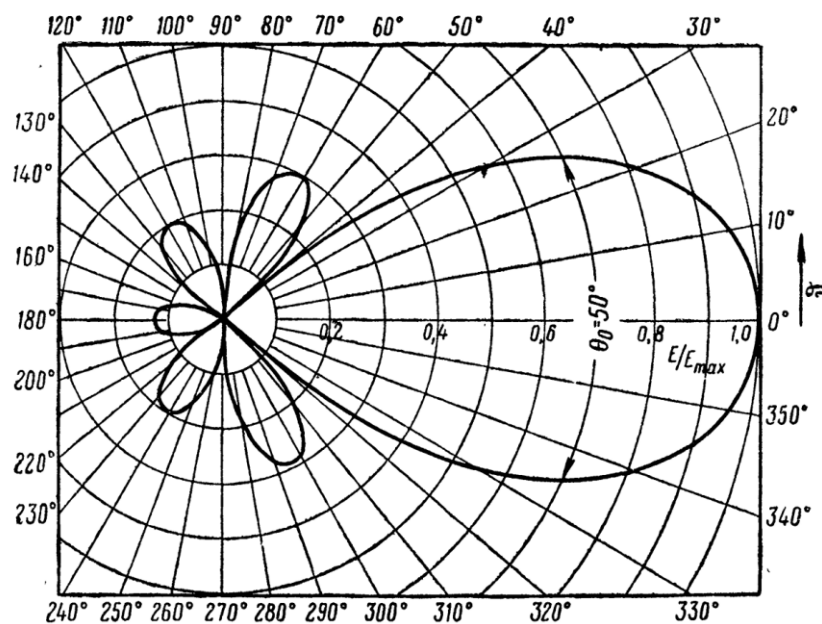


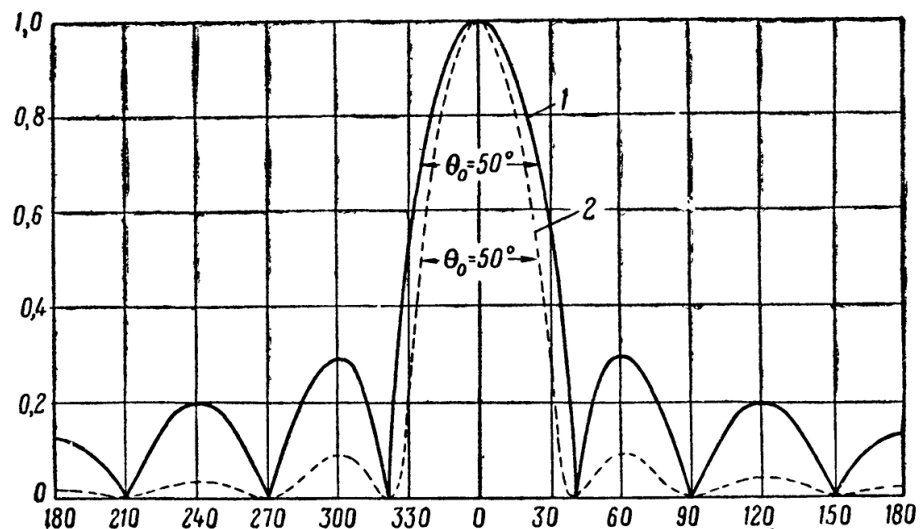
Рисунок 1.1 – Діаграма спрямованості антени у полярній системі координат

Пелюсток, відповідний максимальному сигналу (в даному випадку $\vartheta = 0$), називають головною пелюсткою діаграми спрямованості, а всі наступні - бічними пелюстками. Часто бічні пелюстки нумерують по порядку в напрямку від головної пелюстки. Так, наприклад, пелюстки діаграми на рис. 1.1, що лежать під кутами $\vartheta_1 = 60$ і 300° , називають першими боковими пелюстками; наступні за ними - іншими бічними пелюстками ($\vartheta_2 = 120$ і 240°) і т.д.

Як правило, величина бічних пелюсток зменшується зі зростанням їх номера.

Напрями, в яких антена не приймає та не випромінює, називаються нулями діаграми спрямованості. Побічні максимуми та нулі діаграми спрямованості завжди чергуються.

Антени, що застосовуються на високих частотах, часто мають настільки вузькі діаграми спрямованості, що їх графічне зображення в полярній системі координат стає ускладненим. У таких випадках діаграми будують у прямокутній системі координат, відкладаючи по вертикалі величину E/E_{\max} , а, по горизонталі — кут повороту антени. Прикладом такої діаграми може бути крива 1 на рис. 1.2 побудована для тієї ж антени, що і на рис. 1.



1 – діаграма у відносних одиницях напруги 2 – діаграма у відносних одиницях потужності

Рисунок 1.2 – Діаграми спрямованості антени у прямокутній системі координат.

В описах різного типу апаратури часто замість діаграм спрямованості наводять їх числову характеристику, вказуючи кути розчину головної пелюстки у вертикальній і горизонтальній площинах, розташування бічних пелюсток та їх інтенсивність.

Під кутом розчину діаграми спрямованості в даній площині прийнято розуміти кут головної пелюстки, що лежить між напрямками, в яких напруга

сигналу падає до значення $E_{sig} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,707$ від максимальної величини E_{max} .

Відповідно до сказаного кут розчину головної пелюстки у діаграм, показаних на рис. 1.1 і 1.2 становить $\theta_0 = 50^\circ$.

У деяких випадках діаграми спрямованості будують не у відносних величинах напруги E/E_{max} , а відносних величинах потужності. Так як потужність пропорційна квадрату напруги, то діаграма спрямованості потужності може бути отримана при зведенні в квадрат відповідних величин E/E_{max} . Таким шляхом, зокрема, було побудовано криву 2 на рис. 1.2, що представляє діаграму потужності тієї ж самої антени, що і крива 1.

Вимірювати кут розчину головної пелюстки у такої діаграми необхідно на рівні $(E/E_{max})^2 = (\sqrt{2}/2)^2 = 0,5$. Тому дуже часто говорять, що кут розчину головної пелюстки діаграми спрямованості визначається за точками половинного значення потужності.

Надалі ми позначатимемо кут розчину діаграми спрямованості у вертикальній площині через θ_0 , а в горизонтальній площині через F_0 .

1.3.2 Коефіцієнт підсилення антени

Розглянемо тепер, як впливають спрямовані властивості антени на величину інтенсивності сигналу в точці прийому. Нехай в деякій точці А розміщена ненаправлена антена, що передає, яка у віддаленій точці В створює сигнал Е1 (рис. 1.3). Діаграма спрямованості такої антени у площині креслення буде колом. Якщо сигнали, випромінювані антеною А, прийматимуться лише у

точці В, то енергія, випромінювана у всіх інших напрямках, крім направлення на точку В, буде витрачена дарма, тому що в точку В вона не потрапить.

Поставивши в точці А спрямовану антену, орієнтовану максимум випромінювання на точку В, ми, не змінюючи потужності передавача, збільшимо сигнал у точці В за рахунок тієї енергії, яка раніше марно випромінювалася в інших напрямках.

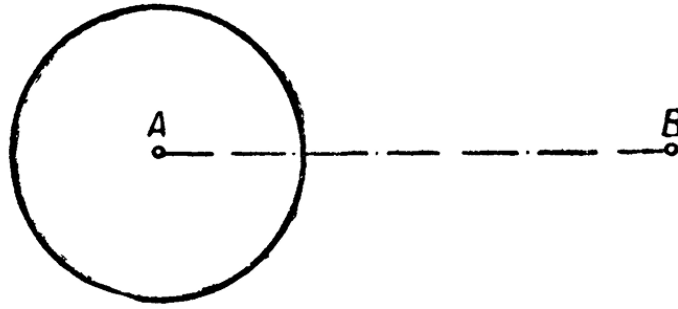


Рисунок 1.2 – Всеспрямована діаграма спрямованості

Таким чином, для кореспондента, що знаходиться в пункті В, спрямована антена володітиме підсиленням у порівнянні з ненаправленою антеною.

Тому спрямовані властивості антен, крім діаграм спрямованості, характеризуються ще однією з двох величин - коефіцієнтом спрямованої дії (k_s) або коефіцієнтом посилення (k_p).

Коефіцієнт посилення антени дорівнює добутку від множення її коефіцієнта спрямованого на коефіцієнт корисної дії (η):

$$k_p = k_s \eta. \quad (1.1)$$

У ідеальної антени, позбавленої втрат ($\eta = 1$), величини k_s та k_p збігаються.

Оскільки k_p повніше характеризує антену з енергетичного боку, їм зазвичай найчастіше користуються практично.

Коефіцієнт посилення антени - величина відносна, яка дорівнює квадрату відношення напруженостей полів, створюваних у точці прийому за інших рівних умов даної антени та іншої антени, прийнятої за стандартну. Інакше висловлюючись, коефіцієнт посилення показує, скільки разів необхідно зменшити підведену потужність, якщо стандартну антену замінити даною антеною, зберігаючи у своїй постійної інтенсивності прийнятого сигналу.

На надвисоких частотах як «стандартна» антена для зручності найчастіше береться так званий ізотропний випромінювач, що рівномірно випромінює у всіх напрямках. Просторова характеристика спрямованості цієї антени повинна мати вигляд кулі. Проте реально такої антени немає. Найпростіша антена, що застосовується на практиці, — напівхвильовий вібратор — вже має спрямовані властивості: її просторова характеристика спрямованості має вигляд тора (рис. 1.3). На цьому рисунку показано випадок, коли вісь вібратора збігається з віссю OZ.

З рис. 1.3, на якому для наочності вилучено одну чверть тора, видно, що діаграма спрямованості напівхвильового вібратора в площині перпендикулярній його осі

(екваторіальна площина), має вигляд кола, тобто вібратор у цій площині ненаправлений.

У всіх інших площинах, що проходять через вісь вібратора (через вісь OZ), діаграми спрямованості мають вигляд вісімки, тобто в напрямку вібратора осі розташований нуль діаграми спрямованості.

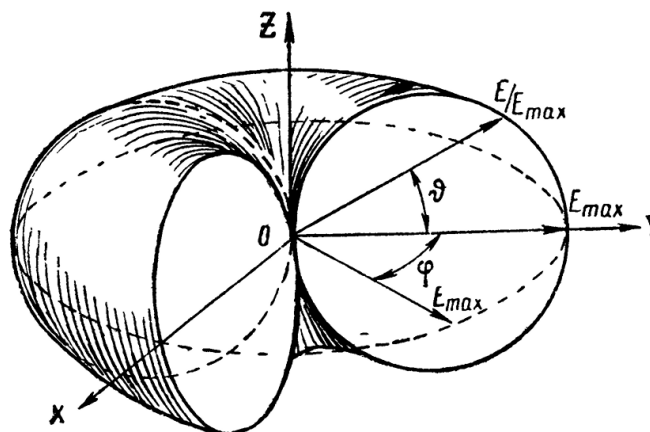


Рисунок 1.3 - Просторова характеристика випромінювання вібратора, орієнтованого вздовж осі OZ

Розрахунки показують, що по відношенню до ненаправленої антени коефіцієнт посилення напівхвильового вібратора дорівнює $G_{\lambda/2} = 1,64$.

Зауважимо, забігаючи трохи вперед, що коефіцієнти посилення багатьох антен, що застосовуються на надвисоких частотах, сягають тисячі і навіть кількох тисяч.

У антен з незначними побічними пелюстками наближене значення величини коефіцієнта посилення антени може бути обчислено по відомих кутах розчину головної пелюстки діаграми спрямованості у вертикальній та горизонтальній площинах:

$$G \cong \frac{35000}{\theta_0 F_0}, \quad (1.2)$$

де θ_0 і F_0 - ширина головної пелюстки в градусах між точками половинного значення потужності, виміряна відповідно у вертикальній та горизонтальній площинах.

З формули (1.2) видно, що k_p антени обернено пропорційний добутку кутів розчину головної пелюстки і, отже, рівноцінні по посиленню антени матимуть однакові добутки кутів розчину. Так, наприклад, дві антени, у однієї з яких $\theta_0 = 1,5^\circ$ і $F_0 = 20^\circ$, а у інших $\theta_0 = 5^\circ$ і $F_0 = 6^\circ$, матимуть однакове посилення, незважаючи на сильну відмінність їх просторових характеристик спрямованості.

Наведений приклад показує, що знання лише однієї величини к. у. ще недостатньо для того, щоб охарактеризувати спрямовані властивості тієї чи іншої антени.

Коефіцієнт посилення б антени та її діаграми спрямованості залежать від геометричних розмірів випромінюючого отвору, а саме:

$$G = 4\pi \frac{S_{ef}}{\lambda^2}, \quad (1.3)$$

де S_{ef} - ефективна площа випромінюючого отвору антени; λ^2 — квадрат довжини хвилі у тих самих одиницях, як і S .

У літературі, часто коефіцієнт посилення виражають у децибелах, тобто замість значення G , що дається формулою (1.3), наводять його:

$$G = 10 \lg \left(4\pi \frac{S_{ef}}{\lambda^2} \right), \quad (1.4)$$

2. ВИБІР ТА ОБГРУНТУВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ

2.1 Огляд методів автоматизованих вимірювань діаграм спрямованості антенних пристроїв

Найбільш поширена методика зняття діаграм спрямованості, має на увазі вимір одноосної ротаційної діаграми. У цьому випадку застосовується вимірювана антена, поміщена на опорно-поворотний пристрій, який обертається за азимутом для отримання двовимірної (плоскої) діаграми спрямованості в полярній, або декартовій системі координат. Такого роду вимірювання зазвичай виконуються для двох головних осей антени.

Вони використовуються для визначення таких параметрів, як ширина діаграми спрямованості як в площині Е, так і площині Н. Діаграми спрямованості лінійно поляризованих антен (наприклад, найпростіших антен рупорного типу або диполів, для яких добре відомі поляризаційні характеристики) використовуються для розрахунків кополяричних компонентів поля.

Що стосується більш складних випромінювачів, поляризація яких може бути невідома або ж залежати від кута спостереження, то тут важливо вимірювати квадратурні компоненти поля. Такого роду вимірювання зазвичай здійснюються за допомогою лінійно поляризованої рупорної антени на двох ортогональних поляризаціях, довгоперіодиченої антеної решітки з симетричних вібраторів або ж дипольної антени, – ці типи антен застосовуються в якості вимірювальних. Незважаючи на те, що при цьому досягаються найкращі результати, така технологія вимагає наявності двох приймачів або ж можливості автоматичного перемикання поляризації кожного приймача, що здорожує саму процедуру тестування антени. Більш повільна і, можливо, менш точна методика вимірювань являє собою послідовні тести ідентичних діаграм на кожному типі поляризації вимірювальної антени. Цей варіант займає багато

часу і вимагає синхронізації вимірювань в часі, що ускладнює, а значить, також здорожує процес вимірювання.

Рисунок 2.1 ілюструє спосіб отримання однополярної діаграми спрямованості антени.



Рисунок 2.1 – Процедура тестування діаграми спрямованості на одній поляризації

Тестована антена поміщається на поворотний столик, що обертається навкруги вертикальної осі, при цьому двополяризаційна антена встановлюється на один рівень з нею на фіксованій відстані. Поворотний столик обертається на 360° і взаємодія між антенами вимірюється в функції просторового кута. Зазвичай такого роду вимірювання здійснюються в повністю невідбивному середовищі (симуляція вакууму), але іноді бажано тестувати діаграму спрямованості щодо електропровідного заземлення, або ж в інших географічних координатах для того, щоб отримувати реальні дані про процеси, що впливають на діаграми спрямованості антен в реальності.

На рисунку 2.2 представлені деякі діаграми спрямованості для поширених типів антен та їх поляризації.

Для проведення вимірювань тривимірних діаграм спрямованості необхідно змінити просторову орієнтацію вимірювальної та вимірюваної антен, після чого повторити попередні вимірювання діаграми спрямованості для кожної нової орієнтації. Зміни в орієнтації повинні бути перпендикулярними до площини вимірів, щоб повністю покрити сферичну поверхню. Простіше кажучи, наступна вісь обертання повинна бути перпендикулярною до першої осі обертання.

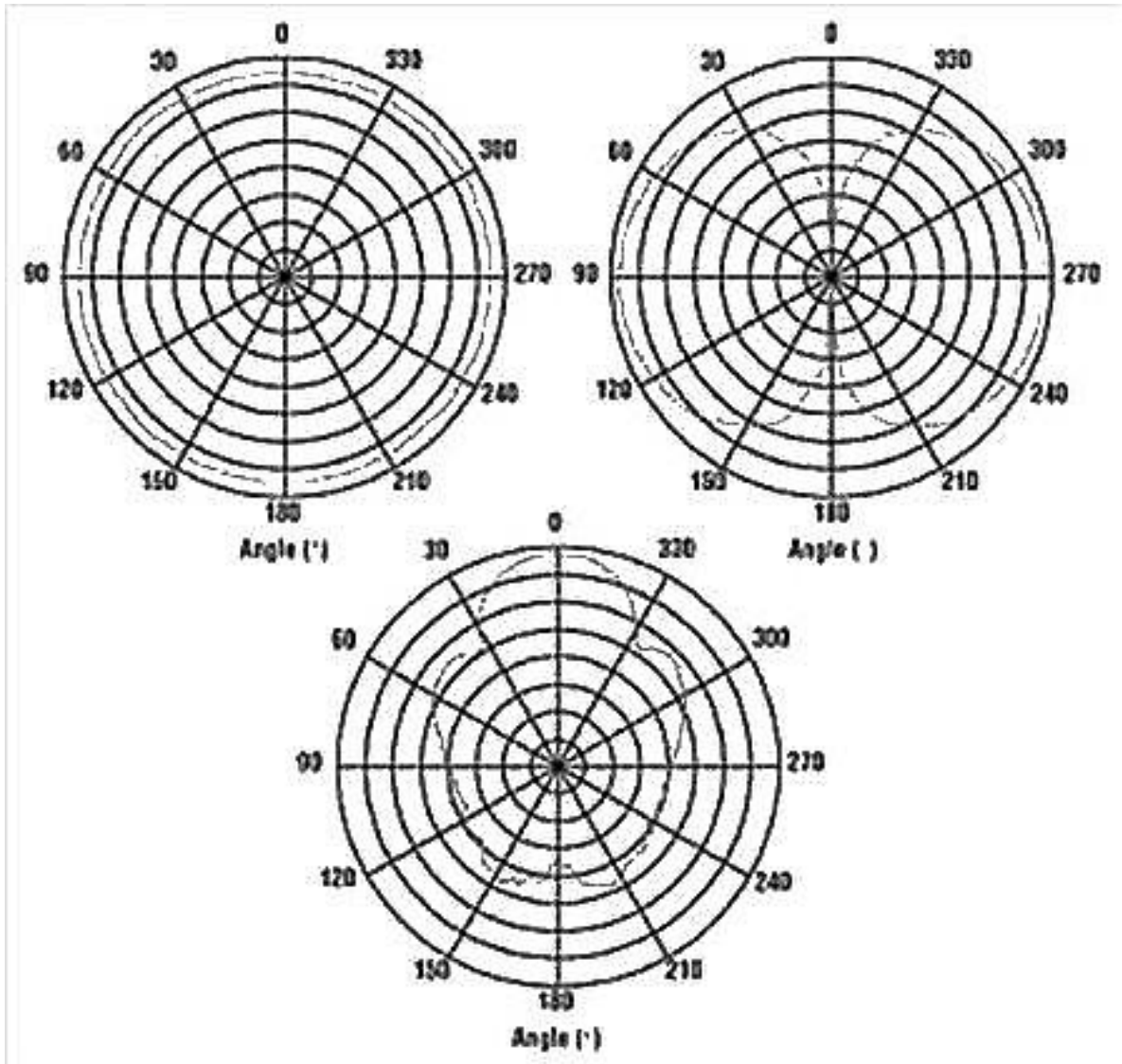


Рисунок 2.2 – Діаграми спрямованості на основній поляризації для вертикально-поляризованої антени у вигляді симетричного вібратора, такого ж типу горизонтально поляризованої антени і антени типу рупора з відомим коефіцієнтом спрямованої дії

Дві осі відповідають кутам θ і ϕ сферичної системи координат і зазвичай називаються кутом місця та азимутом, відповідно. Як це прийнято в сферичній системі координат, тільки одна вісь повинна обертатися на 360° , в той час як інші обертаються тільки на 180° . При правильній обробці результатів не має значення, яка саме з осей обертається на 360° , а яка - на 180° .

Кожна антена може обертатися навколо цієї другої осі для отримання однієї і тієї ж діаграми спрямованості, але при цьому кожна з методик має свої переваги і недоліки.

2.1.1 Метод конічної секції

Метод конічної секції передбачає піднятий поворотний столик для утримання в нерухомості досліджуваної антени і обертання вимірювальної антени навколо досліджуваної по осі, перпендикулярній вертикальній осі обертання поворотного столика (рис. 2.3). Такий метод відповідає геометричній інтерпретації, яку більшість людей використовують для сферичної системи координат. Описана технологія застосовується для вимірювань діаграм спрямованості. Поворотний столик забезпечує обертання по азимуту ϕ , в той час як вимірювальна антена піднімається або опускається по дузі навколо досліджуваної. Тому в даному процесі доречний термін «вісь піднесення».



Рисунок 2.3 – Ілюстрація методу конічної секції для вимірювання 3-D діаграми спрямованості антени

Типовою помилкою реалізації такого методу є прагнення повернути вимірювальну антену на 180° по дузі поперек верхнього кінця досліджуваної.

Однак, навіть поверхневий погляд на рисунку 2.3 показує, що це лише продублює вимірювання верхньої половини діаграми, при цьому вимірювання нижньої половини діаграми спрямованості не відбуваються.

Незважаючи на те, що метод конічної секції концептуально простий, він має цілий ряд недоліків. Для управління вимірювальною антеною потрібно мати поворотну консоль або підтримуючий пристрій у вигляді дуги великих розмірів. Якщо при цьому і сам тестований об'єкт є об'єктом великих розмірів - це може стати непереборною перешкодою. Так само, якщо тести планується здійснювати в невідбивній камері, то ця камера повинна бути значно більшою за розмірами, ніж зазвичай, оскільки у відповідності до габаритів об'єкта

тестування підлога і стеля камери повинні бути на однаковій відстані від стінки, що знаходиться за вимірювальною антеною. Все це істотно збільшує вартість вимірювань.

Для вимірювань по всій поверхні антени поворотний столик також повинен мати виносні консолі від стіни або ж від іншої підтримуючої конструкції, щоб дати можливість вимірювальній антені переміщатися як над, так і під поворотним столиком. В іншому випадку виникне ефект «мертвої зони», коли антена буде блокована конструктивом пристрою підтримки.

У будь-якому випадку, сам поворотний столик може значно вплинути на результати вимірювань діаграми спрямованості (наприклад, якщо він занадто масивний або ж зроблений з «неправильних» – провідних матеріалів).

2.1.2 Метод великої окружності

Для виконання умов вимірювання ДС методом великого кола вимірювальна антена фіксується, а досліджувана переміщується на поворотному столику. Через те, що вимірювальна антена є нерухомою, а вимірювана обертається навколо неї, створюється реальна діаграма спрямованості. Це є дані вимірювань при проході по кожному перетину сфери. Таким чином, кожен поворот столика реалізує найбільший з можливих діаметрів кола.

Для порівняння двох описаних вище методик досліджувана антена повинна бути покладена на бік таким чином, щоб була можливість реалізувати метод конічної секції для отримання відповідного просторового зсуву в системі координат (рис. 2.4).

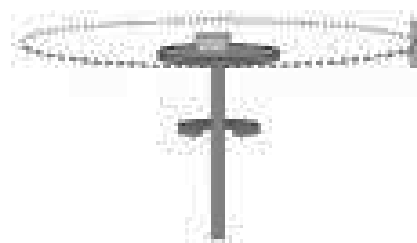


Рисунок 2.4 – Геометрія методу великого кола

При обертанні досліджуваної антени навколо горизонтальній осі в кожному секторі великого кола можна охопити всю сферичну поверхню (рис. 2.5). Кожен полярний перетин проходить крізь нові осі обертання, а точки перетину на горизонтальній осі еквівалентні верхньому і нижньому положенню вимірювальної антени відповідно до методу конічної секції. Тому досліджувана антена була покладена на бік, щоб можна було враховувати зміни координат.

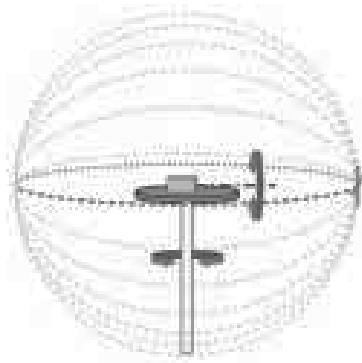


Рисунок 2.5 – Ілюстрація методу великого кола для вимірювання сферичної діаграми спрямованості

Що стосується методу великого кола, то слід вважати кола як лінії довготи, що тягнуться з північного полюса на південний і назад на іншому боці сфери. Як і раніше, необхідно лише обертати досліджувану антену (замість вимірювальної) вздовж дуги у 180° для покриття всієї сфери, оскільки великі кола покривають фронтальну і задню частини сфери одночасно.

При зміщенні системи координат поворотний столик приймає на себе функції позиціонера по вертикалі, а не позиціонера по азимуту, оскільки тут вже змінюється положення вимірювальної антени від полюса до полюса замість змін уздовж ліній по широті, які є паралельними щодо екватору.

Горизонтальна вісь обертання досліджуваної антени тепер уже забезпечує позиціонування по азимуту.

Метод великого кола має ту перевагу, що він сам по собі відносно простий в реалізації. Крім того, сама система ручного обертання досліджуваної антени по горизонтальній осі дуже недорога, але, як і всі процедури такого роду, описаний вище метод може виявитися дуже виснажливим при виконанні, якщо не будуть задіяні якісь додаткові засоби автоматизації.

Проте, метод має і очевидну перевагу. Тракт між досліджуваною і вимірювальною антенами ніколи не перекривається підтримувальним механічним конструктивом, хоча при цьому потрібно завжди звертати увагу на те, щоб цей конструктив не мав відбивальних елементів, які є здатними спотворити діаграму спрямованості антени, особливо тоді, коли потрібні додаткові консолі для підтримки досліджуваної антени в різноорієнтованих напрямках.

В кінцевому підсумку, через те, що вимірювальна антена є зафіксованою, в камері лише необхідно підтримувати необхідний діапазон розмірів руху в конкретному напрямку. Це відкриває можливості застосування конусоподібних камер, тим самим даючи можливість досягати високої продуктивності випробувань при найширшому діапазоні лінійних розмірів випробовуваних об'єктів.

2.1.3 Порівняння методів

Хоча кожен з вимірювальних методів має свої переваги й недоліки, дуже важливо переконатися, що обидва ці методи дають однакові результати.

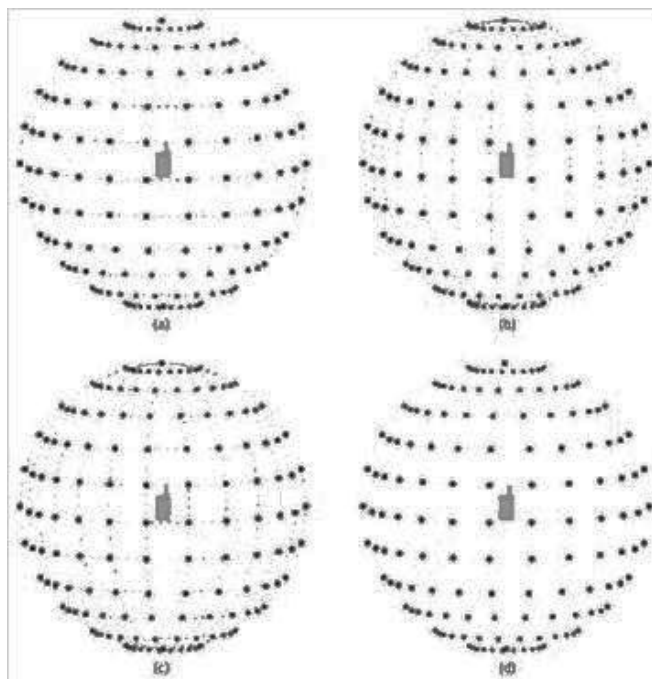


Рисунок 2.6 – Порівняння вимірювальних точок від різних методик випробувань між собою

Результати вимірювань ДС методом конічної секції зображені на рисунку 1.6 а, а методом великому колу – на рисунку 1.6 б. Рисунок 1.6 с ілюструє накладання одне на одного матриць двох результатів, а рисунок 1.6 d демонструє, що не є можливим визначити, який саме з методів тестування застосовувався, за одними лише результуючим даними вимірювань. Виміри проводилися при однаковому розмірному кроці між вимірювальними точками і при поєднанні обох координатних систем. Накладення одна на одну двох діаграм спрямованості (рис. 1.6 з) демонструє, що реальні точки даних вимірювань є ідентичними, незалежно від того, який метод випробування застосовувався. Тому, ґрунтуючись на одних лише результуючих точкових даних (рис. 1.6 d), неможливо визначити, яка саме методика вимірювань застосовувалася для отримання такого роду точки [1].

2.2 Огляд схем автоматизованих вимірювань антенних пристроїв

В даний час існує велика кількість автоматизованих систем, які призначено для вимірювання параметрів антенних пристроїв. Одні з них мають вузьку спеціалізацію і застосовуються в промислових масштабах для виробництва, проектування і випробування вищезазначених пристроїв, в той час як інші мають широкий спектр виконуваних завдань і застосовуються не тільки для вимірювання характеристик і параметрів антенних пристроїв НВЧ, а й інших величин і параметрів різноманітних компонентів і електричних кіл.

Як аналог подібного пристрою можна розглянути багатофункціональний аналізатор ланцюгів серії PNA виробництва компанії Agilent Technologies.

Безперервні і стрімкі зміни в технологіях НВЧ і міліметрового діапазону довжин хвиль призводять до зростання проблем, які виникають перед розробниками і випробувачами. Серія PNA компанії Agilent Technologies, є вимірювальною платформою, яка вирішує ці проблеми за рахунок поєднання високої швидкості визначення частотних властивостей антен (свіпування), широкого динамічного діапазону, низькою зашумленості графіків і гнучких можливостей підключення. Швидкодіючий і точний аналізатор ланцюгів, який

здатен задовольнити вимірювальні вимоги користувачів в нинішній час і в найближчому майбутньому, необхідно використовувати для випробування компонентів з високими технічними характеристиками.

Аналізатор ланцюгів серії PNA має наступні технічні характеристики:

- а) швидкість вимірювання <26 мкс на точку;
- б) 16001 точка на канал;
- в) робочий діапазон частот від 10 МГц до 20/40/5067/110 ГГц, а так само існує можливість розширення діапазону за допомогою зовнішніх вимірювальних головок до 325 ГГц;
- г) динамічний діапазон до 122 дБ;
- д) зашумленість графіків <0,006дБ;
- е) максимальна вихідна потужність від - 22дБм до + 5дБм;
- ж) 32 незалежних вимірювальних канали;
- з) операційна система Microsoft Windows;
- і) інтерфейс користувача підтримує апаратні, програмовані клавіші і миша;
- к) вбудована довідкова система містить повне керівництво по експлуатації, розширені керівництва за вимірюваннями і повне керівництво з програмування;
- л) новітні види калібрування:
 - 1) кероване калібрування;
 - 2) опція електронного калібрування (ECal) забезпечує точне калібрування від одного до чотирьох портів при одному підключенні;
 - 3) ECal визначається користувачем;
 - 4) усунення впливу переходів;
 - 5) калібрувальні заходи з додатковими характеристиками;
 - б) розширені калібрувальні алгоритми.

Аналізатор дозволяє здійснювати антенні і радіоімпульсні вимірювання, а також вимірювання в міліметровому діапазоні хвиль.

2.3 Переваги і недоліки існуючих схем

Аналізатор серії PNA виробництва компанії Agilent Technologies забезпечує виняткові результати при великій кількості точок і великій швидкості вимірювання. Існує можливість свіпуння в прямому і зворотному напрямках для сканування в зоні ближнього поля.

Можливість підключення пристрою до ПК через локальну мережу або інтерфейс GPIB забезпечує високу швидкість передачі даних до 57 мс, для подальшої обробки за допомогою спеціалізованих програмних середовищ [2].

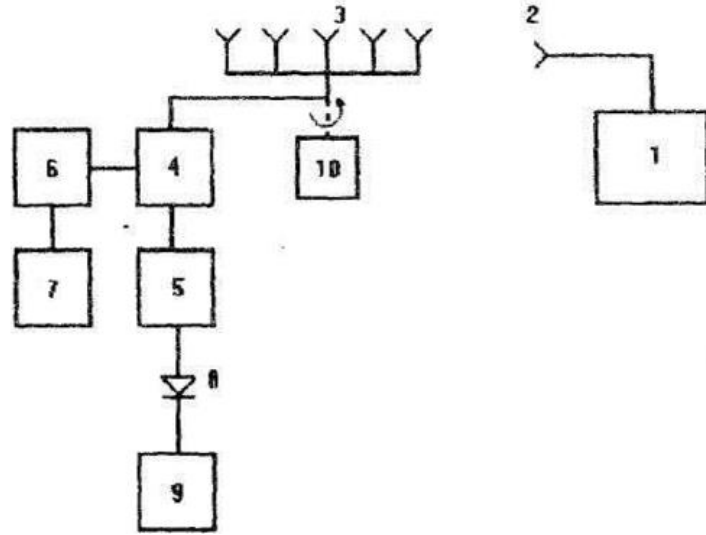
Поряд зі своєю функціональністю і численними перевагами, подібні пристрої мають і недоліки, найбільш істотним з яких, мабуть, є висока вартість і технічна складність.

2.4 Вибір і обґрунтування структурної схеми і її елементів

Дослідження ФАР проводиться в приймальному режимі. Структурна схема установки зображена на рисунку 2.7. ФАР являє собою лінійну систему п'яти хвилеводних випромінювачів 3-х сантиметрового діапазону горизонтально поляризованих хвиль, що живляться Н-секторіальним рупором, який виконує одночасно косинусоподібне (без врахування взаємного зв'язку) збудження елементів решітки згідно до паралельної оптичної схеми.

Виходячи з поставленого ТЗ і вимог, що пред'являються до проектованого пристрою, можна уявити, яким воно повинно бути (рис. 2.8) і які функції має виконувати. Обґрунтуємо коротко призначення кожного з функціональних вузлів схеми.

За допомогою спеціалізованої програми, яку встановлюють на ПК, встановлюється кут обертання антени. Ця інформація через погоджувальний пристрій (АЦП-ЦАП) надходить на опорно-поворотний пристрій, який, в свою чергу, повертає антену на заданий кут в горизонтальній площині.



1) генератор; 2) випромінювач; 3) досліджувана ФАР; 4) фазообертачі; 5) дільник потужності; 6) пульт управління фазообертача; 7) блок живлення фазообертача; 8) детекторна секція; 9) вимірювальний підсилювач; 10) опорно-поворотний пристрій

Рисунок 2.7 – Структурна схема лабораторного стенду

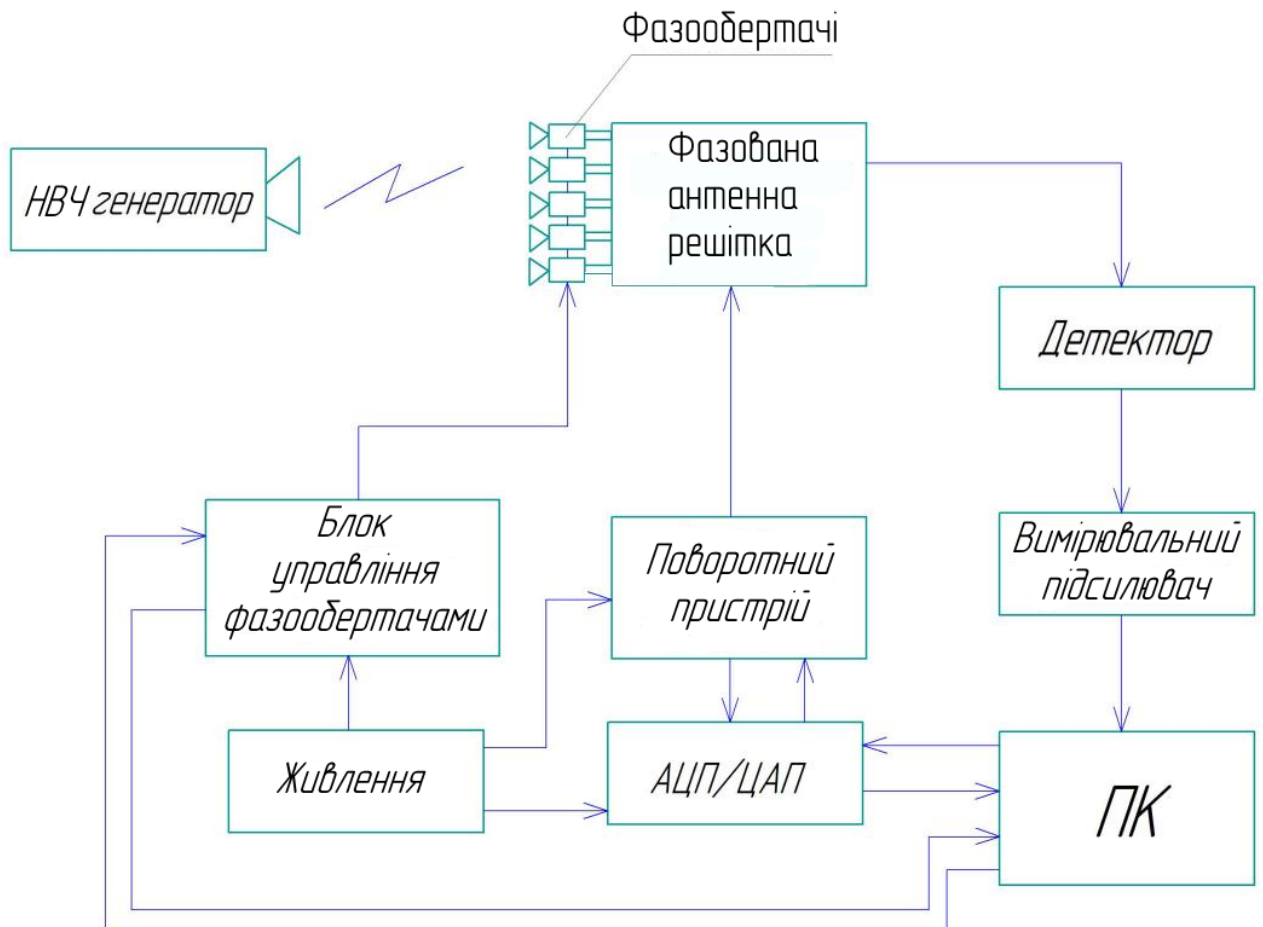


Рисунок 2.8 – Структурна схема лабораторного стенду ФАР з автоматизованим управлінням і обробкою даних

НВЧ генератор генерує і випромінює в простір сигнал, який приймається антеною. Завдяки фазообертачам відбувається зсув фази в кожному хвилеводі, що дозволяє здійснювати електричне керування діаграмою спрямованості антени в просторі без фізичного повороту самої антени. Щоб викликати відхилення головного променя ДС від осі на заданий кут, достатньо лише організувати відповідний нахил розподілу фази уздовж випромінювачів в горизонтальній площині. Для цього до складу стенду включені фазообертачі і блок управління фазообертачами за допомогою ПК.

Прийнятий антеною сигнал надходить на детектор, де з модульованого сигналу виділяється низькочастотна обвідна. Через вимірювальний підсилювач інформація, що виділена детектором, надходить на лінійний (або мікрофонний) вхід звукової карти ПК. У ПК за допомогою спеціалізованої програми «Polar Plot» цей сигнал обробляється, графічно зображується у вигляді двовимірної діаграми спрямованості антени, і, при необхідності, зберігається в пам'яті ПК для подальшої обробки та порівняння з іншими експериментальними даними.

Таким чином, вимірювальний стенд дозволяє автоматично досліджувати діаграми спрямованості антен, при цьому підвищується продуктивність вимірювальних процесів на НВЧ за рахунок легкості організації серійних вимірювань. Крім цього, даний стенд дозволяє легко отримати кінцевий результат з достатньою достовірністю і можливістю кількісної оцінки точності вимірювань за рахунок статистичної обробки.

2.5 Розробка електричної принципової схеми

Виходячи зі структурної схеми, можна уявити, як буде виглядати принципова схема пристрою.

Розроблюваний пристрій складається з двох модулів: – модуль апаратного сполучення з ПК; – модуль автоматизованого управління.

2.5.1 Модуль апаратного сполучення з персональним комп'ютером

Потрібно розробити пристрій, який буде підключатися до USB і зможе управляти електричними ланцюгами, реагувати на замикання кнопок тощо.

З обов'язкових критеріїв є дешевизна і легка доступність компонентів, простота збірки. Для цієї проблеми було знайдено наступне рішення. Пропонується зібрати недорогий модуль компанії Objective Development Software GmbH з підключенням по шині USB.

Технічні характеристики модуля наведено нижче: – підключення до ПК через USB; – визначення ОС Windows як USB HID пристрій; – модуль відразу готовий до роботи. – 7 дискретних виходів; – 2 ШІМ канали; – 7 дискретних входів; – 1 вхід АЦП; – можливість заливати нову прошивку прямо через USB. [3]

Так як даний пристрій задовольняє нас за всіма критеріями, то, виходячи з технічного завдання, можна уявити, як буде виглядати даний пристрій (рис. 2.9).

Модуль апаратного сполучення з ПК складається з 3-х мікроконтролерів АТМega8А-PU фірми © Atmel.

Дискретний вихід призначено для управління тільки двома станами – включений або виключений. При вимкненому стані на виході буде 0 В, при включеному – 5В. Канал плавного регулювання (ШІМ вихід) дозволяє плавно змінювати напругу на ніжці мікроконтролера від 0 В до + 5 В.

Дискретний вхід призначено для моніторингу стану кнопок, ключів і т.д.

Коли лінію замкнено на землю (корпус, GND), її стан = 0, якщо не замкнено, її стан = -1. Вхід АЦП дозволяє вимірювати напругу. Щоб при прошивці не доводилося підключати мікроконтролер до програматора, зробимо можливість заливки прошивки прямо через USB, без використання зовнішнього програматора.

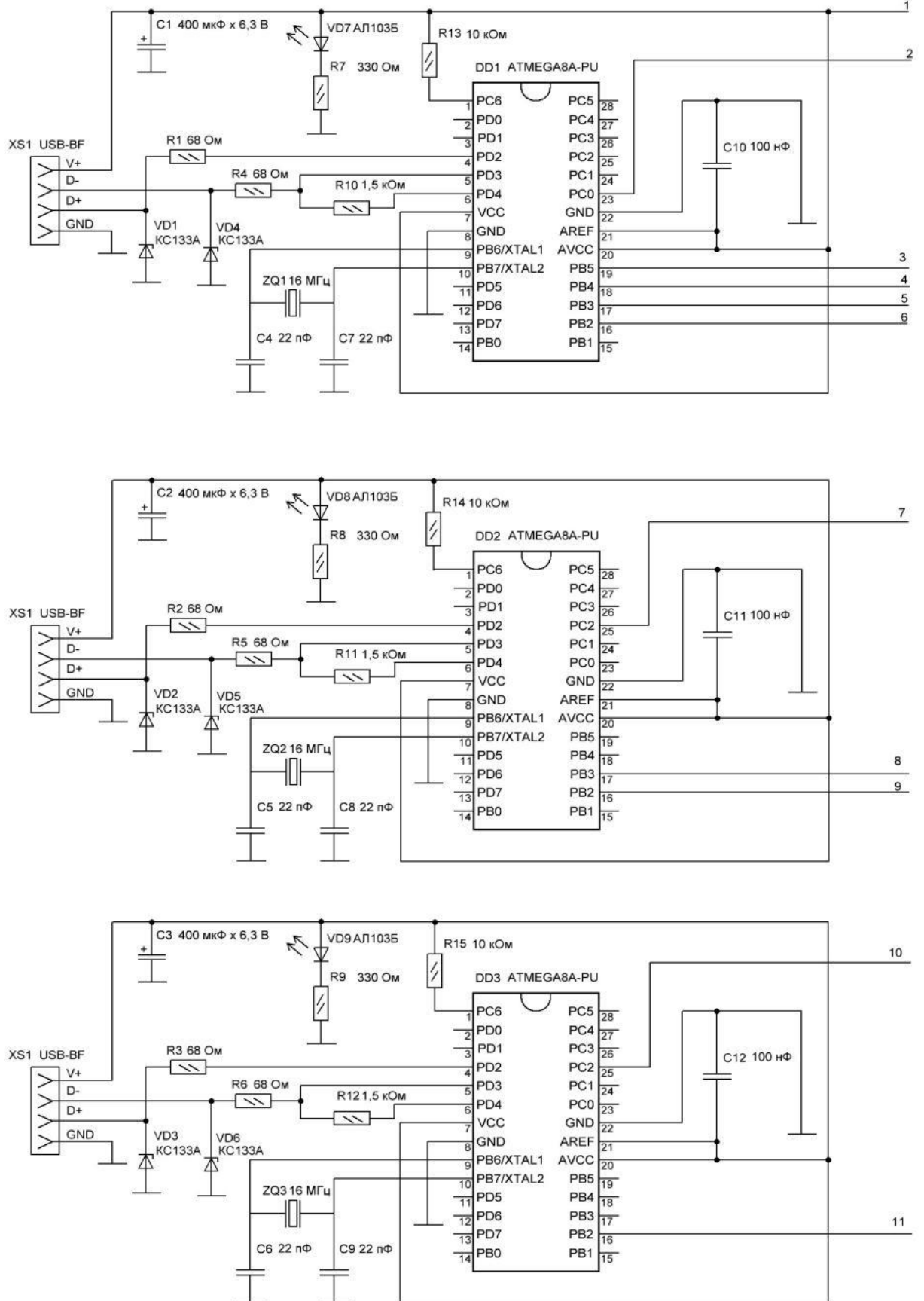


Рисунок 2.9 – Принципова схема модуля апаратного сполучення з ПК

Підключення до комп'ютера здійснюється через роз'єм USB-BF, кабелем «USB A-M – USB B-M». Конденсатори C1, C2, C3 блокують імпульсні перешкоди в ланцюгу живлення, що покращує стабільність роботи пристрою. Резистори R10, R11, R12 підключені між позитивним полюсом джерела живлення і лінією D- шини USB, переводять її в режим повільного LS зі швидкістю обміну 1,5 Мбіт / с, що саме і дозволяє розшифрувати посилки комп'ютера програмним способом.

Резистори R13, R14, R15 служать для зниження ризику ненавмисного скидання. Резистори R7, R8, R9 призначено для обмеження струму через світловипромінювальний діод. Конденсатори C10, C11, C12 призначені для зменшення впливу перешкод на живлення АЦП. Кварцовий резонатор ZQ1-ZQ3 призначений для тактування мікроконтролера на частоті 16 МГц.

Стабілітрони VD1-VD6 служать для обмеження стрибків напруги в ланцюзі управління D + і D-. Світловипромінювальні діоди VD7-VD9 сигналізують про наявність живлення на мікроконтролері. Конденсатори C4-C9 – це ланцюги узгодження кварцового резонатора.

Також на схемі вказані виходи мікроконтролера. Їх призначення наступне:
 а) 1 – живлення резистивного подільника АЦП модуля автоматизованого управління; б) 2 – вхід АЦП мікроконтролера; в) 3, 4 – дискретний вихід для управління механізмом ОПП; г) 5-11 – канал плавного регулювання (ШІМ вихід) для управління фазообертачами.

2.5.2 Модуль автоматизованого управління

Так як мікроконтролер самостійно не може керувати великим навантаженням (це пов'язано з тим, що струм кожного виходу дорівнює 10мА), потрібно розробити модуль сполучення, який здійснює управління більшим навантаженням. Він повинен бути виконаний за допомогою сучасної елементної бази і гальванічно розв'язаний з лабораторним стендом.

Виходячи з ТЗ приймаємо наступне технічне рішення (рис. 2.12).

Модуль сполучення складається з чотирьох основних вузлів: це вузол контролю положення антени, вузол управління двигуном опорно- поворотного пристрою, вузол контролю наявності напруги і вузол управління фазообертачами. Розглянемо окремо вузли даної схеми.

Для контролю положення антени розроблений резистивний дільник на елементах R1, R7, R8, R10. Напруга на пристрої контролю положення (назвемо його позиціонер) змінюється в межах від -800 до +800 мВ. Так як АЦП не може вимірювати негативну напругу, резистивний дільник компенсує цей недолік. Після перетворення на дільнику ми отримуємо напругу від 0 до 1,5 В. Так як АЦП мікроконтролера може вимірювати напругу від 0 до 2 В, то дана схема відповідає вимогам.

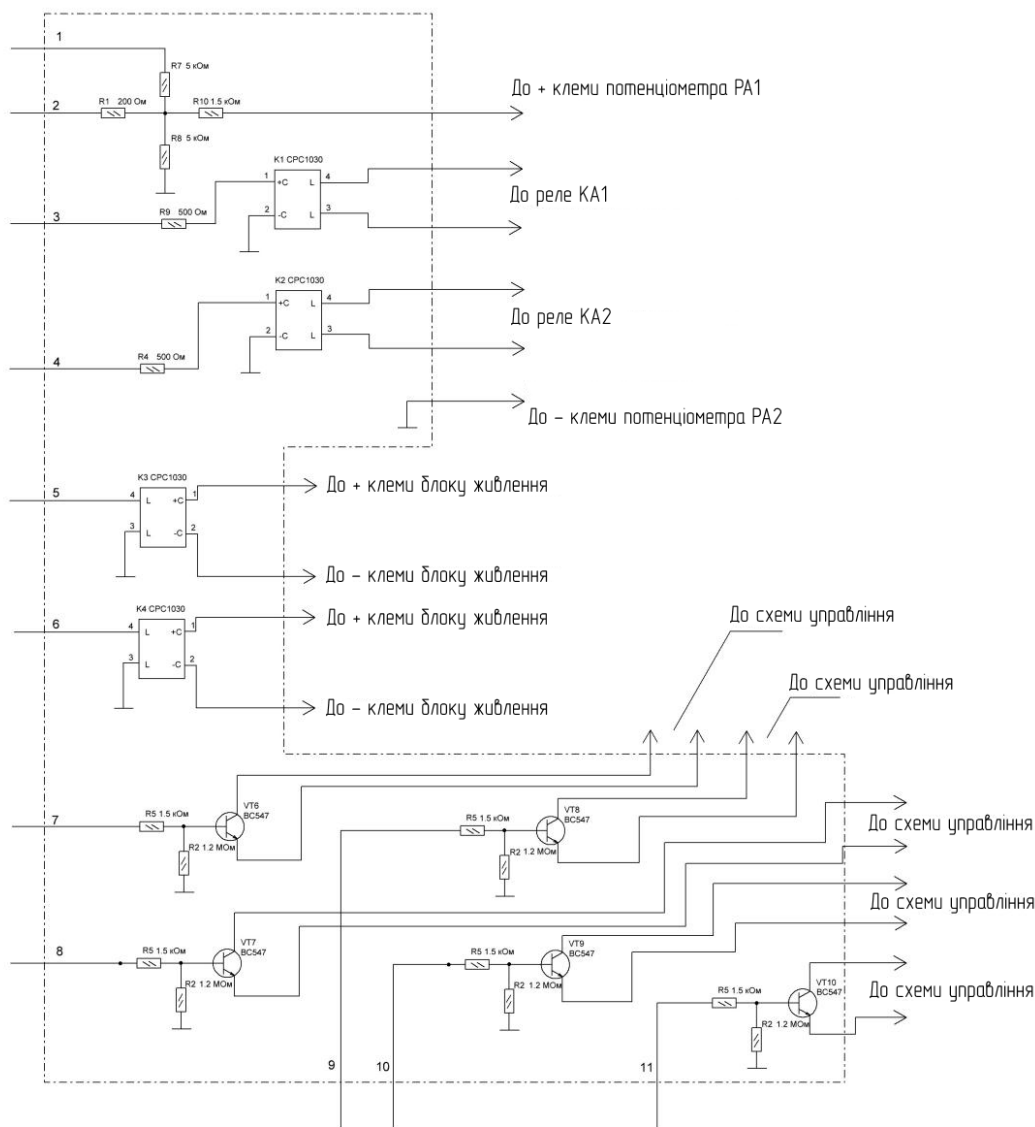


Рисунок 2.10 – Принципова схема модуля автоматизованого управління і контролю

Вузол управління двигуном опорно-поворотного пристрою призначений для управління положенням антени в просторі за допомогою твердотільних реле СРС1030. Це оптичні прилади (або оптичні реле), з одного боку у яких є світлодіод, а з іншого – польовий транзистор, який містить світлочутливий затвор. Управляється цей пристрій малим струмом, але при цьому може маніпулювати значним навантаженням. Переваги даного реле: малі розміри, відсутність механічного руйнування, можливість маніпулювати великим струмом і напругою і, найголовніше, – воно забезпечує оптичну розв'язку небезпечної напруги.

Вузол контролю наявності напруги призначений для інформування користувача про те, що на стенд подано напругу живлення. Для контролю наявності напруги використовуються ті ж самі реле, що і в схемі управління двигуном. Тільки в цьому вузлі керуючий елемент виведений в схему блоку, а комутуючі контакти підключені до мікроконтролера.

Вузол управління фазообертачами призначений для зміни струму в обмотці фазообертача, внаслідок чого відбувається фазовий зсув випромінювача, що призводить до електричного повороту антени. Для цього в схемі присутні п'ять підсилювачів постійного струму, побудовані на біполярному транзисторі BC547. Завдяки цим підсилювачам ми маємо можливість плавно змінювати струм в обмотках фазообертачів.

Після всіх отриманих даних і порівняння з ТЗ, було прийнято рішення розробити блок автоматизованого управління і контролю лабораторного стенду ФАР.

3 КОНСТРУКТИВНИЙ РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ

3.1 Розрахунок фазованої антеної решітки

Спроекуємо за наведеними даними фазовану антенну решітку (ФАР), яка працює в лабораторних умовах в складі лабораторного стенду з автоматизованим управлінням і обробкою даних.

Початкові дані:

- робоча частота – $f = 11,375 \cdot 10^9$ Гц;
- смуга частот – $2\Delta f / f_0 = \pm 5\%$;
- тип поляризації – горизонтальна;
- сектор огляду – $\theta_{\max} = 0,925$ рад;
- коефіцієнт спрямованої дії (КСД) – 17 дБ;
- геометричний розмір хвилеводу: $a = 0,021$ м, $b = 0,01$ м.

Визначаємо довжину хвилі:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_0}, \quad (3.1)$$

$$\lambda_0 = \frac{3 \cdot 10^8}{11,375 \cdot 10^9} = 0,026 \text{ м.}$$

Крок сітки випромінювачів вибирається з умови відсутності вторинних максимумів:

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + \sin(\Theta_{\max})}, \quad (3.2)$$

звідси:

$$d < \frac{\lambda}{1 + \sin(\Theta_{\max})}$$

$$d < \frac{0,026}{1 + \sin(0,925)} = 0,017 \text{ м} = 17 \text{ мм}$$

Розрахуємо площину еквівалентного розкриву ФАР. Коефіцієнт використання поверхні беремо (КВП) $\gamma = 0,5$:

$$D = \frac{4\pi S\gamma}{\lambda^2}, \quad (3.3)$$

$$S = \frac{D\lambda^2}{4\pi\gamma} = \frac{17 \cdot (0,03)^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,5} = 0,006 \text{ м}^2$$

Знаючи еквівалентну площу S і виходячи з того, що розміщення випромінювачів лінійне, визначимо розміри еквівалентного полотна:

$$L_x = a + 0,002, \quad (3.4)$$

$$L_x = 0,021 + 0,002 = 0,023 \text{ м}$$

$$L_y = \frac{S}{L_x}, \quad (3.5)$$

$$L_y = \frac{0,006}{0,023} = 0,265 \text{ м}$$

Виберемо кількість випромінювачів рівною п'яти ($N = 5$).

Діаграма спрямованості випромінювача описується виразом:

$$f(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{\pi \cdot b}{\lambda} \cdot \sin\theta\right)}{\left(\frac{\pi \cdot b}{\lambda} \cdot \sin\theta\right)}, \quad (3.6)$$

Виходячи з виразу (3.6) побудуємо діаграму спрямованості випромінювача (рис.3.1).

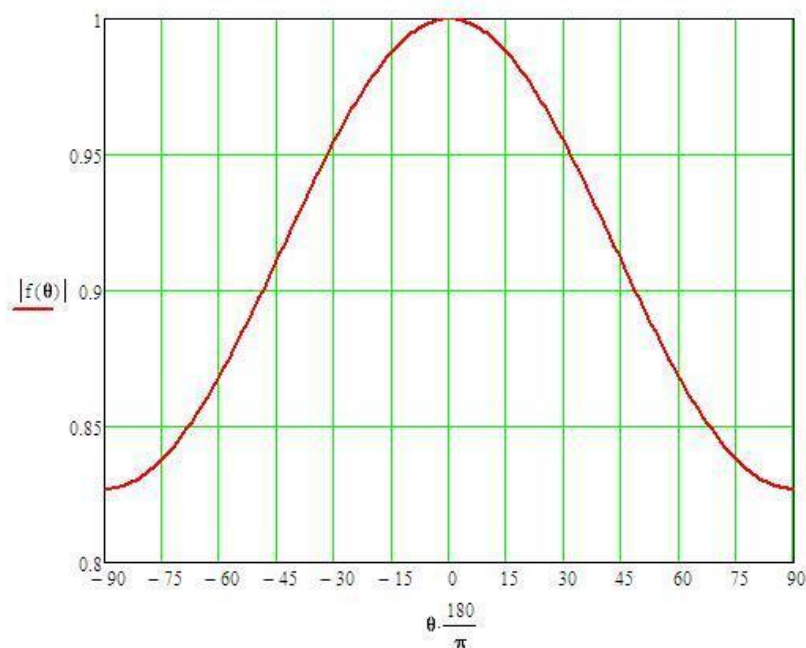


Рисунок 3.1 – Діаграма спрямованості випромінювача

Визначимо значення множника антенної решітки. Для цього розрахуємо діаграму спрямованості антени методом дискретного перетворення Фур'є.

Розрахуємо діаграму спрямованості при центральному (не відхиленому) положенні головної пелюстки: $\varphi_n = 0$.

Значення будемо розглядати на інтервалі:

$$n = -\frac{N-1}{2}, -\frac{N-1}{2} + 1 \dots \frac{N-1}{2} \quad (3.7)$$

Для побудови амплітудного розподілу по полотну в місцях розташування випромінювачів використовуємо формулу:

$$E(n) = \cos\left(\frac{\pi n d}{L_Y}\right). \quad (3.8)$$

На рисунку 3.2 побудуємо графічно амплітудний розподіл по полотну.

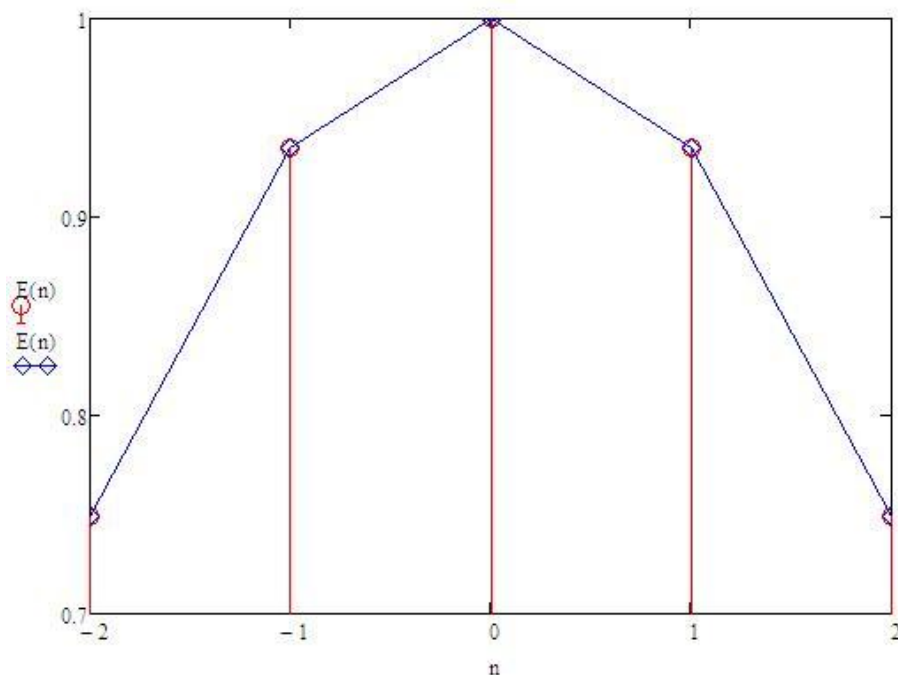


Рисунок 3.2 – Графічне зображення розподілу амплітуди поля

Для розподілу амплітуди поля (3.8), запишемо вираз:

$$F(\theta) = \sum_{n=-\left(\frac{N-1}{2}\right)}^{\left(\frac{N-1}{2}\right)} E(n) \cdot e^{j\varphi(n)} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda} n d \sin(\theta)}. \quad (3.9)$$

Побудуємо нормовані діаграми спрямованості всієї антенної решітки (рис. 3.3):

$$F(\theta) = \frac{F(\theta)}{F(0)}. \quad (3.10)$$

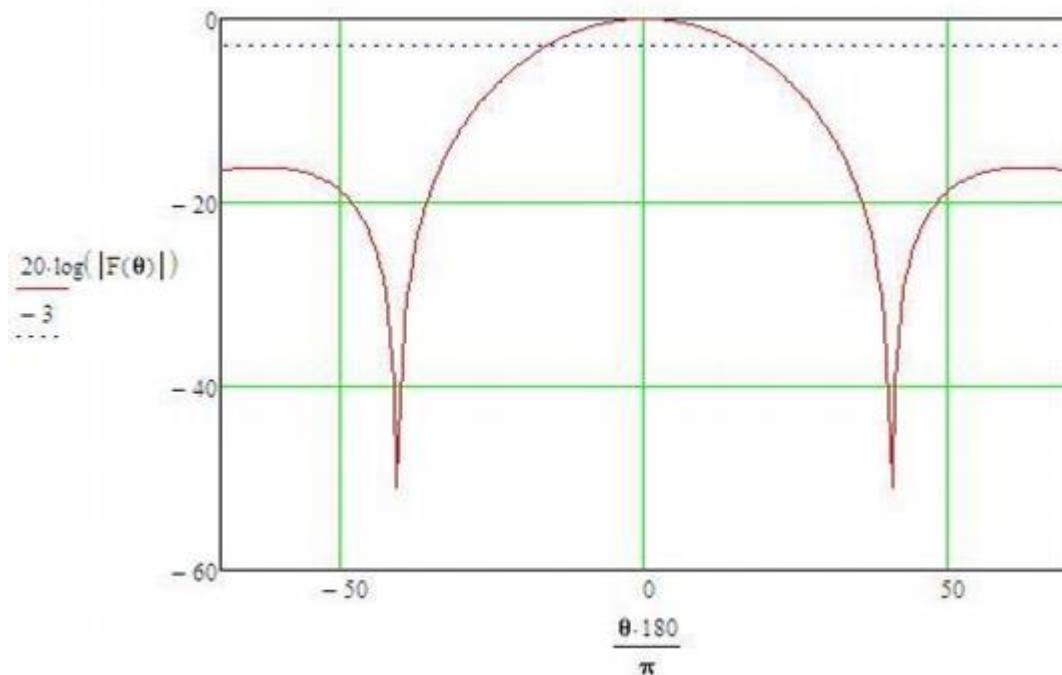


Рисунок 3.3 – Діаграма спрямованості антенної решітки

Для забезпечення необхідного рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості вибираємо розподіл косинуса амплітуди поля, тому, що рівень бічних пелюсток діаграми спрямованості при цьому становить -19.81дБ .

Розрахуємо діаграму спрямованості при бічному положенні головної пелюстки $\varphi_n \neq 0$.

Для визначення кута, на який можна повернути головну пелюстку, скористаємося рисунком 3.4, на якому наведено схему розрахунку кута повороту головної пелюстки діаграми спрямованості.

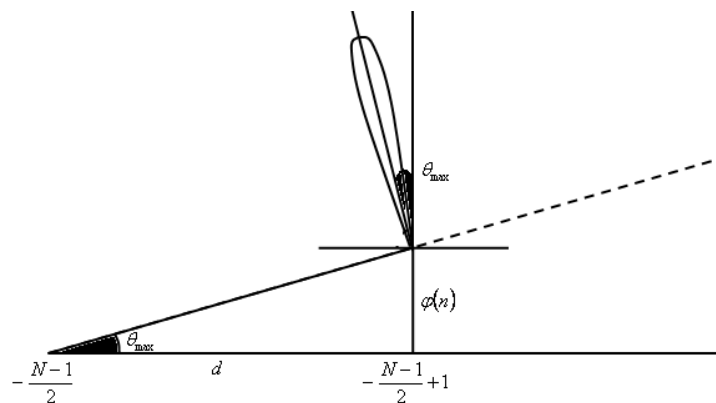


Рисунок 3.4 – Схема розрахунку кута повороту головної пелюстки діаграми спрямованості

Згідно рисунку 3.4, кут, на який повернуто головну пелюстку ДС, визначається за формулою (3.11):

$$\frac{\varphi(n)}{d} = \operatorname{tg}(\theta_{\max}). \quad (3.11)$$

Звідси, за формулою (3.12), визначимо необхідну для цього фазу $\varphi(n)$:

$$\varphi(n) = n \cdot d \cdot \operatorname{tg}(\theta_{\max}). \quad (3.12)$$

На рисунку 3.5 побудуємо графічну залежність фази φ від значення n .

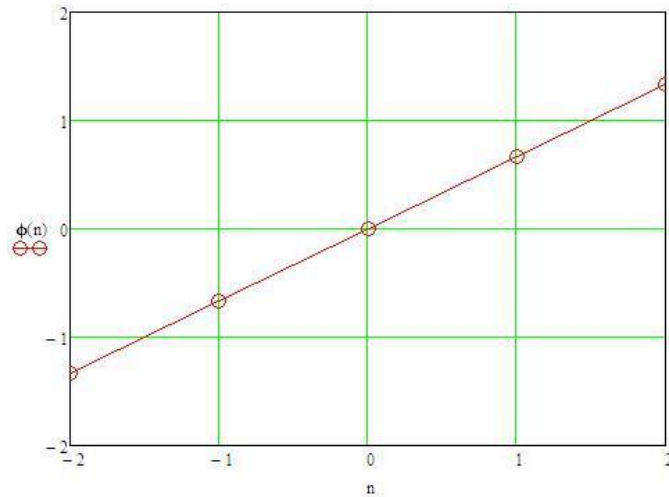


Рисунок 3.5 – Графічна залежність фази φ від значення номера випромінювача n

Використавши формули (3.11), (3.12) і пронормувавши їх, побудуємо нормовані діаграми спрямованості всієї антенної решітки при бічному положенні головної пелюстки (рис. 3.6).

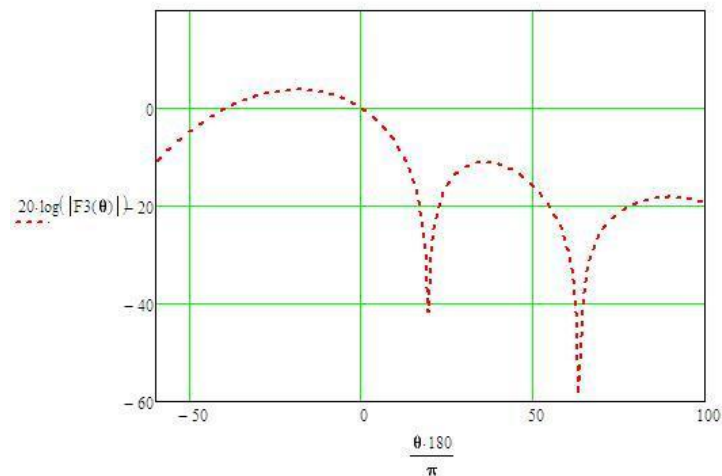


Рисунок 3.6 – Діаграма спрямованості антенної решітки, при зміщеному положенні головної пелюстки

Отже, при зміщеному положенні головного променя діаграми спрямованості антени спостерігається невелике спотворення діаграми щодо центру головної пелюстки, а зрушення діаграми спрямованості на кут добре помітне.

3.2 Блоки автоматизованого управління антеною

Для управління струмами фазообертачів і опорно-поворотним пристроєм використовується блок автоматизованого управління ФАР, блок управління фазообертачами і блок управління опорно-поворотним пристроєм.

Блок автоматизованого управління ФАР виконаний в пластмасовому корпусі розмірами 220x220x50 мм і вагою в 800 грам. На верхній панелі блоку виведено три світлодіода, для сигналізації про наявність напруги живлення мікроконтролерів. На одному боці блоку перебувати три роз'єми USB-BF для підключення до ПК. З протилежного боку закріплений роз'єм DB-25 для підключення до лабораторного стенду. Всередині блок складається з двох друкованих плат: А1 плата апаратного сполучення з ПК (розміри 80x100 мм) і А2 плата автоматизованого управління (розміри 40x70 мм). Для зменшення ковзання по поверхні пристрій доповнено чотирма гумовими ніжками.

Блок управління фазообертачами виконаний в металевому корпусі розмірами 80x100мм і вагою 760 грамів. На передню панель блоку виведено п'ять ручок для ручного управління струмами фазообертачів, тумблер живлення і світлодіод наявності напруги. Ззаду знаходяться три роз'єми: живлення, управління фазообертачами і підключення до блоку автоматизованого управління. Всередині блок складається з джерела живлення, плати випрямляча і пристроїв обмеження сили струму.

Блок управління опорно-поворотним пристроєм виконаний в металевому корпусі розмірами 100x100мм і вагою в 345 г. На передню панель блоку виведений індикатор стану антени, тумблер живлення і світлодіод наявності напруги. Ззаду знаходяться три роз'єми: живлення, пульта управління ОПП і підключення до блоку автоматизованого управління. Всередині блок

складається з джерела живлення, редуктора, двигуна, плати контролю і управління становищем ОПП. Також до блоку підключено пульт дистанційного керування поворотом антени.

3.3 Розрахунок підсилювача постійного струму на біполярному транзисторі

Для того, щоб керувати струмами фазообертачів, потрібен підсилювач постійного струму. Так як схеми підсилювачів дуже складні, ми розробимо підсилювач, який буде побудований на одному транзисторі, і з мінімальною кількістю деталей. Схема наведена на рисунку 3.7.

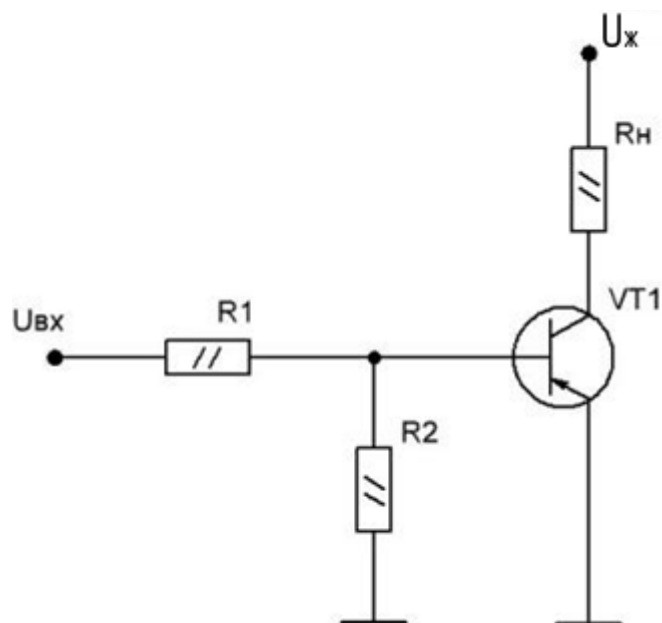


Рисунок 3.7 – Підсилювач постійного струму на біполярному транзисторі

Вхідні дані:

- $E_{жив} = 30 \text{ В}$ – напруга джерела живлення;
- $\Delta U_{ВХ} = + 5 \text{ В}$ – максимальний рівень вхідного сигналу;
- $R_C = 10 \text{ МОм}$ – внутрішній опір джерела вхідного сигналу (ним можна знехтувати);
- $R_H = 300 \text{ Ом}$ – опір обмотки фазообертача;
- $t^{\circ}\text{ОКР} = (30 \pm 10)^{\circ}\text{C}$ – температура навколишнього середовища.

Зробимо розрахунок і вибір елементів R1, R2 та VT1.

Так як фазообертач має опір обмотки 300 Ом, то можна розрахувати струм який протікає через нього:

$$I_n = \frac{U_{жив}}{R_n} \quad (3.13)$$

$$I_n = \frac{30}{300} = 0,1A$$

Тепер, знаючи струм і напругу, можна вибрати транзистор для підсилювача. Виберемо транзистор BC547.

$$|U_{ке\max}| = 45V;$$

$$I_{k\max} = 500\text{ мА};$$

$$I_{кб} = 5\text{ мкА};$$

$$T_{k\max}^0 = +150^\circ\text{C};$$

$$P_{k\max 25C} = 625\text{ мВт};$$

$$h_{21\varepsilon} = 50 \div 100 \text{ (для розрахунку приймаємо } h_{21} = 75).$$

Напруга зсуву забезпечує закритий стан транзистора при відсутності вхідного сигналу:

$$U_{\bar{o}} = E_{зм} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - I_{кб\max} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \leq 0, \quad (3.14)$$

де $I_{кб\max}$ – значення зворотного струму транзистора при максимальній температурі. Для транзистора типу BC547 при температурі 60°C маємо $I_{кб\max} = 5\text{ мкА}$.

З виразу (3.14) випливає, що:

$$|E_{зм}| / R_2 \geq I_{кб\max}. \quad (3.15)$$

Напругу зсуву вибираємо з умови $|E_{зм}| = (0,1 \div 0,3) E_{жив}$. Приймавши $|E_{зм}| = 0,2 E_{жив}$, з виразу (3.15) визначаємо опір резистора R2:

$$R_2 \leq \frac{|E_{зм}|}{I_{кб\max}}, \quad (3.16)$$

$$R_2 \leq \frac{|E_{зм}|}{I_{кб\max}} = \frac{0,2 E_{жив}}{I_{кб\max}} = 1,2\text{ МОм}$$

Прийmemo $R_2 = 1,2 \text{ МОм}$.

Розрахуємо потужність, що розсіює резистор:

$$P_{pc2} = I^2 R_2 \quad (3.17)$$

$$R_{pc2} = (5 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1,2 \cdot 10^6 = 0,00003 \text{ Вт}$$

Вибираємо тип резистора С2-33-0.125.

Для забезпечення заданого ступеня насичення транзистора визначимо необхідний струм бази:

$$I_{\text{б}} = \frac{S \cdot E_{\text{пит}}}{\beta_{\text{min}} R_{\text{н}}} \quad (3.18)$$

З іншого боку, вважаючи, що напруга на переходах відкритого транзистора дорівнює $U_{\text{бe}} = 3\text{В}$, маємо:

$$I_{\text{б}} = \frac{U_{\text{вк}} - U_{\text{бe}}}{R_1} - \frac{E_{\text{см}} - U_{\text{бe}}}{R_2} \quad (3.19)$$

Підставляючи (3.18) в (3.19) і виражаючи з отриманого рівняння R_1 , матимемо:

$$R_1 = \frac{U_{\text{вк}} - U_{\text{бe}}}{\frac{S \cdot E_{\text{пит}}}{\beta_{\text{min}} R_{\text{н}}} - \frac{E_{\text{см}} - U_{\text{бe}}}{R_2}} \quad (3.20)$$

$$R_1 = \frac{5 - 3}{\frac{30}{75 \cdot 300} - \frac{6 - 3}{1,2 \cdot 10^6}} = 1,497 \cdot 10^3$$

Приймаємо $R_1 = 1,5 \text{ кОм}$.

Розрахуємо потужність, що розсіює резистор:

$$P_{pc1} = I^2 R_1 \quad (3.21)$$

$$R_{pc1} = (2 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 1,5 \cdot 10^3 = 0,00006 \text{ Вт}$$

Вибираємо тип резистора С2-33-0,125.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

4.1 Структурні схеми вимірювань параметрів і характеристик антени

Під коефіцієнтом підсилення антени G розуміють відношення інтенсивності випромінювання антени в напрямку головного максимуму діаграми спрямованості до середнього значення інтенсивності випромінювання, відповідного коефіцієнту корисної дії $\eta = 100\%$. Відомі способи визначення коефіцієнта підсилення дзеркальних антен методом абсолютних змін, що включають вимір потужності на вході приймальної антени (P_2) і визначення коефіцієнта підсилення (КП) зі співвідношення:

$$G = \frac{4 \cdot \pi \cdot R}{\lambda \cdot \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}}, \quad (4.1)$$

де R – відстань між приймальною і передавальною антенами; λ – робоча смуга хвилі; P_1 – потужність НВЧ сигналу на вході передавальної антени.

Однак, такі способи вимірювань мають низьку точність внаслідок відбиття від земної поверхні, так як вимірювання проводяться на відкритих антенних полігонах.

Найбільш близьким технічним рішенням до заявленого є спосіб, який передбачає відносний метод вимірювань КП і включає вимірювання потужності випромінювання випробуваної (P_A) і еталонної (P_e) дзеркальних антен і визначення КП випробуваної антени (G_A) зі співвідношення:

$$G_A = G_e \frac{P_A}{P_e}, \quad (4.2)$$

де G_e – коефіцієнт підсилення еталонної антени.

Недоліком такого способу вимірювань є низька точність внаслідок відбиття від землі.

Для визначення коефіцієнта підсилення антен спочатку повинні бути зняті їх діаграми спрямованості в вертикальній і горизонтальній площині і знайдено

напрямок головного максимуму. При вимірі КП антени застосовують метод еталонної антени.

Метод еталонної антени полягає в порівнянні коефіцієнта підсилення досліджуваної антени з коефіцієнтом посилення еталонної антени. Так як в лабораторії відсутня еталонна антена, експериментальні вимірювання будемо проводити на лабораторному стенді ФАР без її використання. Структурна схема виміру представлена на рисунку 4.1.

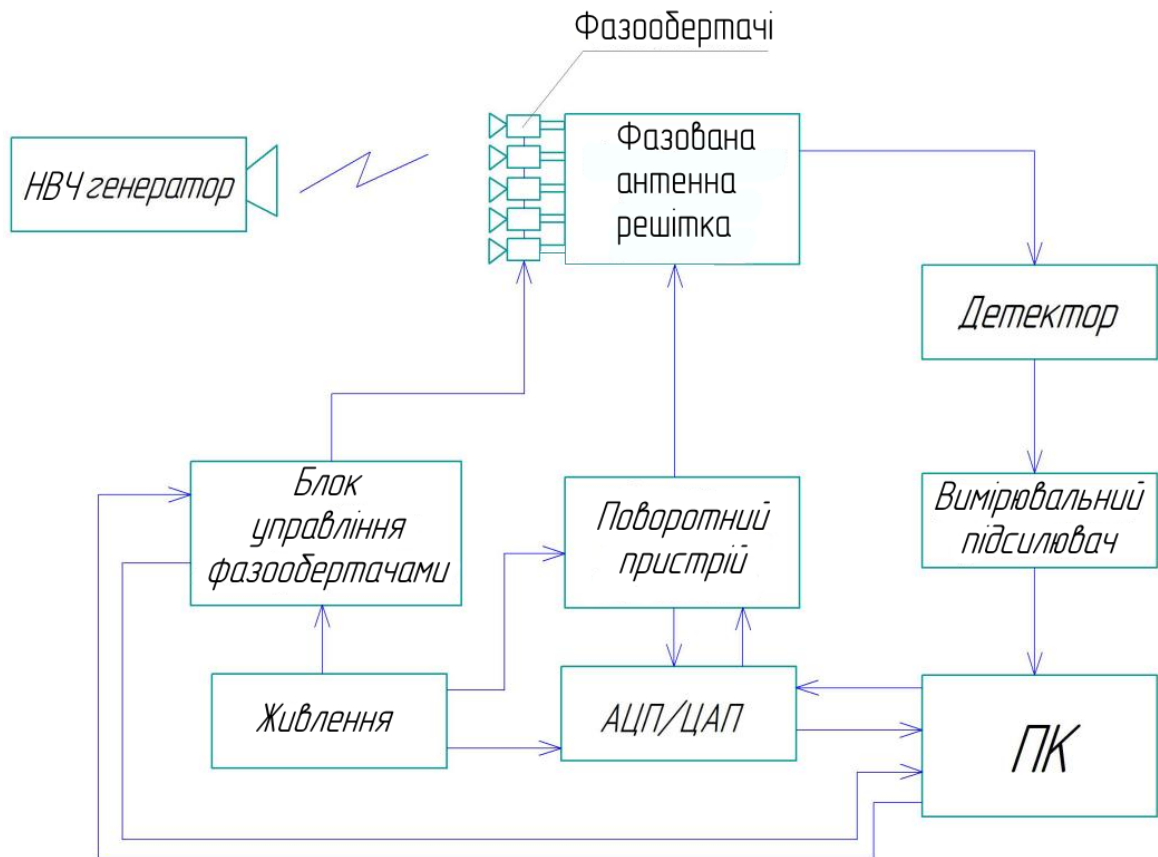


Рисунок 4.1 – Структурна схеми експериментальної установки

4.2 Вимірювання діаграми спрямованості

Здійснимо кілька експериментальних досліджень. Спочатку дослідимо ДС антени без використання фазообертачів (синфазний розподіл поля).

Встановимо на НВЧ-генераторі частоту 11,375ГГц, що відповідає довжині хвилі 2,6 см. За допомогою програми управління задаємо кут повороту – 180°. Отже, антена буде повертатися за годинниковою стрілкою на кут 180°.

З рисунка 4.2 видно, що ширина ДС складає близько 140, а рівень бічних пелюсток не перевищує -14дБ.

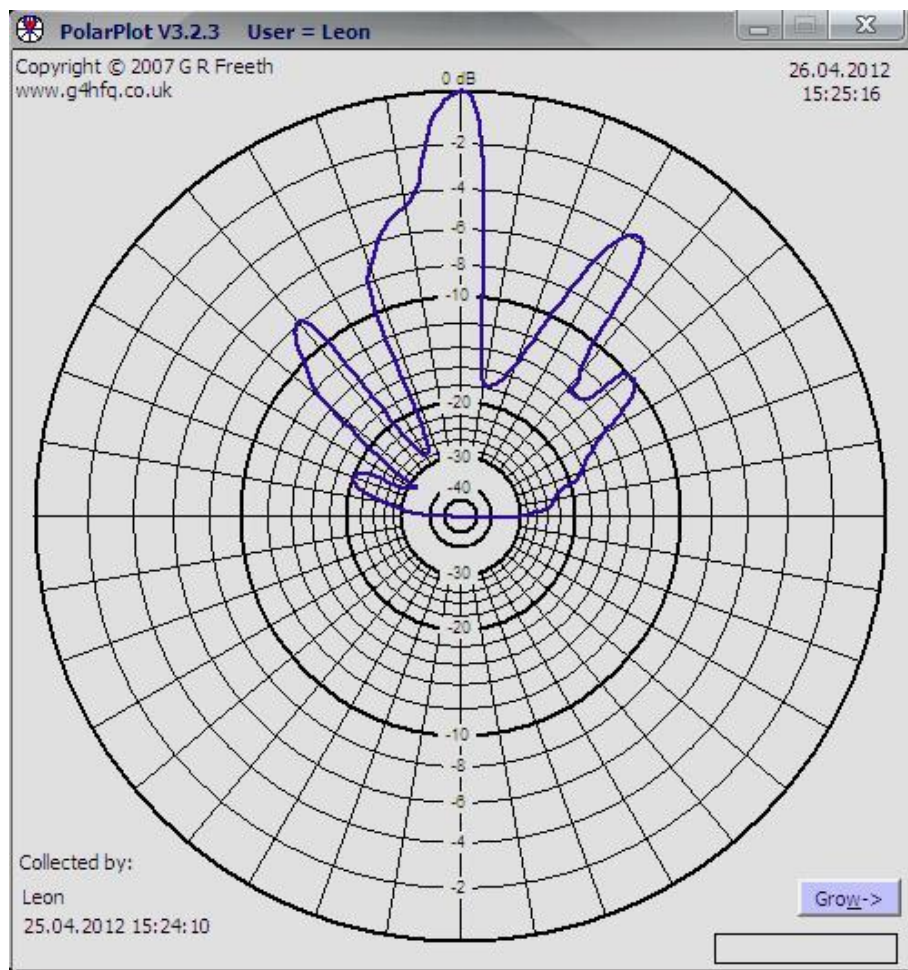


Рисунок 4.2 – Діаграма спрямованості антени при синфазному розподілі поля на частоті 11,375 ГГц

Досліджуємо ДС антени при тому ж розподілі поля на іншій частоті.

Встановимо на НВЧ-генераторі частоту 10,850 ГГц, що відповідає довжині хвилі 2,8 см. У програмі управління встановлюємо чинне положення антени нульовим і задаємо кут повороту - 180°.

З рисунка 4.3 видно, що основна пелюстка змістилася праворуч. Це пов'язано з механічним люфтом антени. Так само помітно, що бічні пелюстки «підтягнулися» ближче до головної пелюстки.

Тут ширина ДС складає 160, а рівень бічних пелюсток приблизно -14дБ.

Дослідимо ДС антени на ще одній частоті. Частоту генератора встановимо 11,944 ГГц, що відповідає довжині хвилі 2,5 см. У програмі управління обертанням кроковим двигуном встановлюємо кут повороту антени 180°.

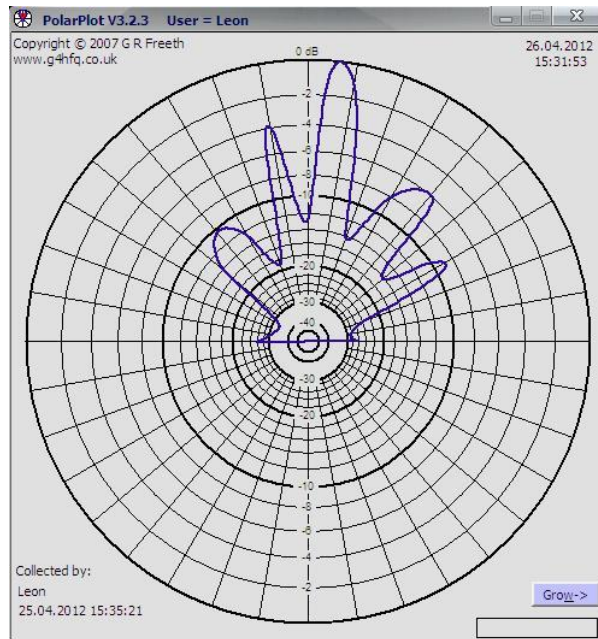


Рисунок 4.3 – Діаграма спрямованості антени при синфазному розподілі поля на частоті 10,850 ГГц

З рисунка 4.4 видно збільшення ширини бічних пелюсток. Так як програма Polar Plot після знімання даних відразу нормує отримані результати щодо 0dB, то ми не бачимо, що головна пелюстка зменшилася щодо попередніх замірів, і це дещо ускладнює дослідження ДС, а саме вимірювання ненормованого рівня головної пелюстки.

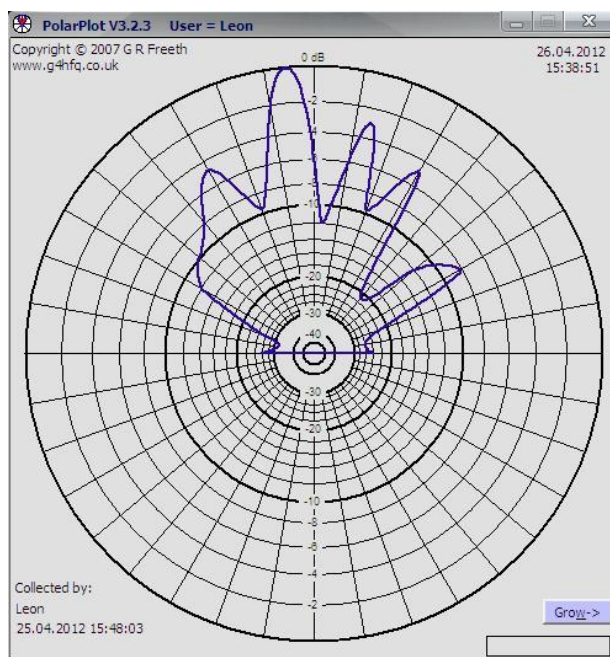


Рисунок 4.4 – Діаграма спрямованості антени при синфазному розподілі поля на частоті 11,944 ГГц

Далі проведемо серію вимірювань з різноманітними фазовими розподілами поля. Встановимо на НВЧ-генераторі частоту 11,375 ГГц. Проведемо заміри діаграми при синфазному розподілі. Кут повороту антени – 180° .

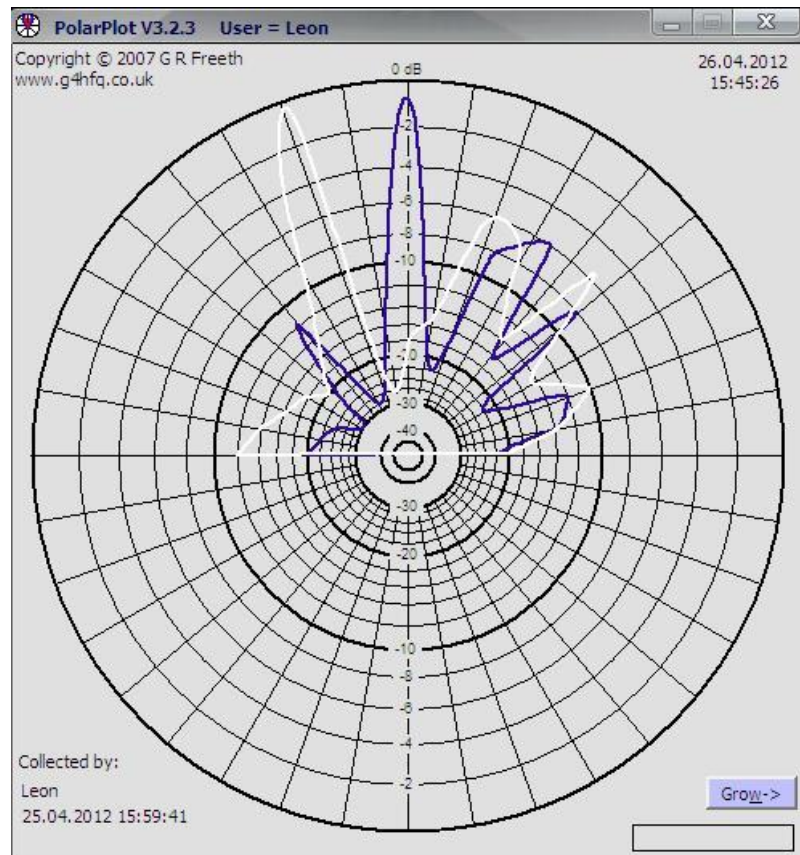


Рисунок 4.5 – Діаграма спрямованості антени з лінійним фазовим розподілом

З рисунка 4.5 видно, що крайні пелюстки набагато зменшилися, в той час як головна і дві бічних – навпаки збільшилися. Це може бути корисним у випадку, коли необхідно спрямувати антену на джерело сигналу, і при цьому послабити перешкоди в напрямку бічних пелюсток. Результати вимірювань ДС при синфазному розподілі і різних більш складних законах фазового розподілу поля, досліджувані на різних частотах, поміщені в графічний додаток до пояснювальної записки «Експериментальні дослідження ДС».

4.3 Вимірювання коефіцієнта спрямованої дії

Спрямовані властивості різних антен зручно оцінювати коефіцієнтом спрямованої дії (КСД). Найбільш поширеними є три методи вимірювання КСД.

Коефіцієнт спрямованої дії випробуваної антени може бути визначений за допомогою спеціальних вимірювальних антен з відомим значенням коефіцієнта спрямованої дії D за формулою:

$$D = D_A \frac{\alpha}{\alpha_A}, \quad (4.3)$$

де D_A – коефіцієнт спрямованої дії вимірювальної антени; α – значення індикаторного приладу при підключенні його до випробуваної антени; α_A – показання того ж приладу при підключенні його до вимірювальної антени.

В якості індикаторного приладу може використовуватися вимірювальний приймач, вольтметр або вимірювач потужності.

Для зменшення похибки при вимірюванні коефіцієнти спрямованої дії випробуваної і вимірювальної антен не повинні значно відрізнятись (не більше ніж в 10 разів). В іншому випадку потрібно встановити атенюатор на виході генератора НВЧ. З цією ж метою необхідна також установка розв'язувального атенюатора між антенами і детекторною секцією з величиною розв'язки не меншою за 10 дБ.

Так як на надвисоких частотах ККД антен практично дорівнює одиниці, то виміряне значення коефіцієнта спрямованої дії дорівнюватиме коефіцієнту підсилення антени.

При вимірюванні величини D повинно дотримуватися звичайних правил і умов, що є властивими антенним вимірам (правильний вибір відстані між передавальною і приймальною антенами, висоти розташування антен над землею повинні бути достатніми для виключення спотворювальної взаємодії ін.).

4.4 Джерела похибок під час вимірювань

На вимірювання антени впливають різні джерела похибок список яких можна знайти у другому стовпці таблиці 4.1. Третій стовпець визначає, чи впливає джерело на діаграму спрямованості (RP), спрямованість (D) або підсилення в напрямку максимального випромінювання (G).

Невизначеність положення та орієнтації AUT впливає на всі три вимірювані величини. Невизначеність фазового центру стандартного рупора посилення (SGH), який використовувався для діаграми спрямованості, становить 5 мм і 1 мм для інтегрованої антени (№4), яка використовувалася як AUT під час вимірювань посилення.

З іншого боку, невизначеності антени Rx (#7 – 10) не впливають на результат, оскільки вони зникають після нормалізації (RP, D) або після калібрування (G).

Коефіцієнт підсилення вимірювався за допомогою методу порівняння підсилення, коли отриманий сигнал AUT порівнюється з опорною антеною (REF) із відомим підсиленням. Ця еталонна антена, її орієнтація, а також будь-які роз'єми, які відрізняються від еталонного вимірювання (наприклад, пластинчастий зонд), були проаналізовані для вимірювання підсилення (№ 11 – 15).

Різниця між кількома вимірюваннями з однаковими параметрами пояснюється невизначеністю положення тригера, переміщенням кабелю та шумом. Таким чином, їх сукупний внесок показано в таблиці 4.1 замість індивідуальних внесків (№16 – 18). Точність положення антени залежить від швидкості роботи. Для цієї оцінки швидкість була обрана таким чином, щоб час вимірювання для однієї площини становив 1 хвилину.

Смугу ПЧ було встановлено на 100 Гц. Щоб мінімізувати відхилення через переміщення кабелю, було використано прокладання кабелю, яке забезпечує певне положення кабелю та великі радіуси вигину.

Оскільки всі вимірювання проводилися в дальньому полі AUT, перетворення ближнього поля в дальнє не було необхідним. Тому фазові невизначеності, спричинені кабелями, які згинаються внаслідок руху, не досліджувалися.

Антенa Rx і AUT були вирівняні після виконання а поляризаційне сканування AUT. Таким чином, вплив невизначеності поляризації AUT-Rx (№19) є незначним.

Поки вимірювання проводиться в дальньому полі АУТ, відстань справді незначно впливає на діаграму спрямованості або спрямованість. Під час вимірювання відстань (#20) залежить виключно від точності робота. Невизначеність набагато менша, ніж невизначеність позиції АУТ, і, отже, незначна.

Щоб мати можливість вимірювати інтегровані антени, установка містить зондову станцію. Його металева поверхня викликає відбиття та розсіювання, що погіршує вимірювання. Вплив відображень (№21) оцінювали шляхом порівняння вимірювань з різницею відстані $d = 4$. Щоб мінімізувати відбиття, установка знаходиться в безеховому боксі, і робот, і зондова станція покриті поглиначами. Оскільки тестовий діапазон був призначений для відносно невеликих антен, вимірювання дальнього поля можна виконувати без додаткових відбивачів, які впливатимуть на амплітуду та фазу та зменшуватимуть розмір тихої зони [6]. Тому розмір тихої зони в першу чергу залежить від відображень, які виникають, незважаючи на використовувані поглиначі.

Через високе затухання на частотах мм-хвиль спеціальний аналіз тихої зони не проводився.

Було встановлено, що інші невизначеності мають незначний вплив і не були враховані в остаточній невизначеності аналіз. Серед них невідповідність АУТ і SGH, дрейф амплітуди та перехресні перешкоди (№25, 26).

Для аналізу діаграми спрямованості та невизначеності спрямованості використовувалася рупорна антена. Для аналізу підсилення було виміряно вбудовану антену зі стандартним рупором підсилення як еталон. Усі вимірювання проводились на частоті 280 ГГц

Щоб отримати бюджет невизначеності для вимірювань спрямованості, підсилення та діаграми спрямованості, було оцінено різні джерела похибок x_i та їх індивідуальний вплив на відповідну виміряну величину y (наприклад, підсилення або спрямованість) було кількісно визначено, як показано в [7]. Знаючи вплив конкретного джерела помилок x_k на y , чутливість y до x_k можна розрахувати за допомогою:

$$c_k = \frac{dy(x_k)}{dx_k} \quad (4.4)$$

Чутливість була знайдена шляхом поширення міркувань про похибки або шляхом повторних вимірювань.

Якщо зв'язок між параметрами x_k і y був відомий, використовувався розповсюдження похибки. При поширенні похибки чутливість визначається обчисленням впливу x_k на кінцевий результат y . Це було використано, наприклад, для розрахунку чутливості підсилення до помилкової відстані вимірювання, як співвідношення між відстанню та прийнятою амплітудою, і, таким чином, вимірний коефіцієнт підсилення можна легко обчислити з ослабленням y вільному просторі.

Коли вплив невизначеності параметра вимірювання не був відомий, чутливість кількісно визначали за допомогою кількох вимірювань, у яких джерело помилки x_k було навмисно змінено, щоб внести помилку. Шляхом порівняння помилкового результату вимірювання y_{err} з еталонним вимірюванням y_{ref} , де не було внесено навмисної помилки, можна визначити вплив цієї конкретної невизначеності вимірювання, а потім розрахувати чутливість.

Якщо чутливість результату до кожного джерела помилки відома, загальний бюджет невизначеності $u_c(y)$ можна розрахувати за допомогою

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i \cdot s_{x_i})^2}, \quad (4.5)$$

де N – загальна кількість врахованих невизначеностей. s_{x_i} — стандартне відхилення певного x_i . Його отримують шляхом множення максимального відхилення $u(x_i)$ на коефіцієнт, що залежить від розподілу x_i . Для нормального розподілу похибок, який було прийнято для всіх параметрів для цього аналізу, коефіцієнт становить 13 [7]. Щоб отримати вищий рівень впевненості, можна розрахувати розширену невизначеність $U_c(y) = k \cdot u_c(y)$. У цій роботі використовувалося $k = 2$, що відповідає 95% вірогідності.

ВИСНОВКИ

В ході виконання магістерської роботи були проаналізовані методи тестування антен (метод конічної секції і метод великого кола), встановлені переваги і недоліки кожного з них.

Незважаючи на те, що метод конічної секції концептуально простіше, в ньому присутній цілий ряд недоліків. Для маніпулювання вимірювальним пристроєм потрібні велика поворотна консоль або підтримуючий пристрій у вигляді арки. Для великих розмірів тестованого об'єкта це може стати непереборною перешкодою. Так само, якщо тести планується здійснювати в абсолютно невідбивній камері, то ця камера повинна мати значно більші розміри, ніж зазвичай, оскільки для відповідності габаритним вимогам об'єкта тестування, підлога і стеля камери повинні бути на однаковій відстані від задньої панелі вимірювального пристрою. Все це може істотно збільшити вартість тестів антени.

Метод великого кола має ту перевагу, що він сам по собі відносно простий в реалізації. Крім того, сама система ручного обертання досліджуваної антени по горизонтальній осі дуже недорога, але, як і всі процедури такого роду, даний метод може виявитися дуже виснажливим для виконавця, якщо не будуть задіяні якісь додаткові засоби автоматизації.

Проте, метод має очевидну перевагу. Тракт між досліджуваною антеною і вимірювальним пристроєм ніколи не перекривається механічним конструктивом, хоча при цьому потрібно завжди звертати увагу на забезпечення того, щоб цей конструктив не мав відбивних властивостей, які були б здатними спотворити діаграму спрямованості антени, особливо тоді, коли потрібні додаткові консолі для підтримки досліджуваної антени в різноорієнтованих напрямках. Був обраний метод великого кола.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Michael D. Antenna Pattern Measurements: Concepts and Methodologies Measuring instruments and systems. – 2009. – № 4-5. – С. 78-84.
2. D. Titz, F. Ferrero, and C. Luxey, “Development of a Millimeter-Wave Measurement Setup and Dedicated Techniques to Characterize the Matching and Radiation Performance of Probe-Fed Antennas [Measurements Corner],” *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 54, pp. 188–203, Aug 2012.
3. S. Pivnenko, J. M. Nielsen, and O. Breinbjerg, “Very High-Accuracy Calibration of Radiation Pattern and Gain of a Near-Field Probe,” in *Antennas and Propagation (EuCAP), 8th European Conference on*, The Hague, Netherlands, pp. 1690–1694, IEEE, 2014.
4. L. Boehm, S. Pledl, F. Boegelsack, M. Hitzler, and C. Waldschmidt, “Robotically Controlled Directivity and Gain Measurements of Integrated Antennas at 280 GHz,” in *European Microwave Conference (EuMC)*, Paris, France, Sep 2015.
5. M. Hitzler, S. Bader, and C. Waldschmidt, “Key aspects of robot based antenna measurements at millimeter wave frequencies,” in *Antennas and Propagation (EuCAP), 8th European Conference on*, The Hague, Netherlands, pp. 392–396, April 2014.
6. L. Le Coq, B. Fuchs, T. Kozan, S. Burgos, and P. Iversen, “IETR Millimeter-wave Compact Antenna Test Range Implementation and Validation,” in *Antennas and Propagation (EuCAP), 2015 9th European Conference on*, Lisbon, Portugal, pp. 1–5, April 2015.
7. J. Migl, J. Habersack, C. Hoetzel, A. Geise, C. Schmidt, and H.-J. Steiner, “Performance of Scanned Quiet Zones in Compensated Compact Ranges for Antenna and Payload Testing,” in *Antenna Measurement Techniques Association (AMTA)*, Bellevue, USA, AMTA, 2015.
8. NIST/SEMATECH, “e-Handbook of Statistical Methods.” <http://itl.nist.gov/div898/handbook/mpc/mpc.htm>. Accessed: 2015-10-02
9. Ruse J. Antenna Tolerance Theory – *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, 1966. – T. 54. – С. 205-213.

