

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра теоретичних основ радіотехніки**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Федір ДУБРОВКА

« ___ » _____ 2020 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра за освітньо-професійною програмою

«Радіосистемна інженерія»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Ультраширокосмугова фазована антенна решітка на основі
модифікованої антени Вівальді»**

Виконав:

студент IV курсу, групи РС-гб1-1

Лемешев Дмитро Іванович _____

Керівник:

Асист.

Ткаченко Костянтин Олександрович _____

Консультант з охорони праці:

К.б.н., доцент

Гусєв Аркадій Миколайович _____

Рецензент:

Ст. викл.

Турєєва Ольга Василівна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проекті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра теоретичних основ радіотехніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіосистемна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Федір ДУБРОВКА

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Лемєшеву Дмитру Івановичу

1. Тема проекту «Ультраширокосмугова фазована антенна решітка на основі модифікованої антени Вівальді»,

керівник проекту Ткаченко Костянтин Олександрович, ст. викладач,
затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту _____

4. Зміст пояснювальної записки _____

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)

6. Консультанти розділів проекту*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Гусев А.М., к.б.н., доцент		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз антенних решіток та їх характеристик	15.04.2020-20.04.2020	
2	Огляд ультраширокопосмугових антенних решіток	21.04.2020-25.04.2020	
3	Освоєння програми CST Microwave Studio	25.04.2020-30.04.2020	
4	Побудова моделі	01.05.2020-14.05.2020	
5	Аналіз параметрів реалізованої моделі	15.05.2020-19.05.2020	
6	Заходи з охорони праці	20.05.2020-25.05.2020	
7	Оформлення дипломного проекту	26.05.2020-04.06.2020	

Студент

Лемешев Дмитро

Керівник

Костянтин Ткаченко

АНОТАЦІЯ

Даний дипломний проект зроблений для реалізації ультраширокопосмугової фазованої антенної решітки. Даний тип антени дозволяє досягти прийнятної імпульсної характеристики при невеликих розмірах. Особливістю цієї антени є її проста конструкція, працездатність на широкій смузі частот, великий коефіцієнт підсилення і невеликий рівень бокових пелюсток.

Мета роботи – побудова та моделювання ультраширокопосмугової фазованої антени на основі модифікованої антени Вівальді.

Реалізована антена з нарізними ребрами не потребує безперервного електричного з'єднання з ортогональними суміжними елементами. Ці унікальні особливості можуть бути використані для значного спрощення процесу виготовлення двополяризованих пристроїв.

Результатом цієї роботи є вдало зроблена модель ультраширокопосмугової фазованої антенної решітки, отримані графіки і результати підтверджують успішність даного типу антен.

ABSTRACT

This diploma project is made for the implementation of an ultra-wide phased array antenna. This type of antenna allows you to achieve an acceptable pulse characteristics in small sizes. Feature of this antenna is its simple design, wide bandwidth performance, high gain and small level of side lobes.

The aim is to build and simulate an ultra-wide phased antenna based on Vivaldi's modified antenna.

The realized antenna with ribbed ribs does not require coating to suppress the resonances of scanning parallel plates, and does not require a continuous electrical connection with orthogonal adjacent elements. These unique features can be used to greatly simplify the bipolar device manufacturing process.

The result of this work is a successful model of an ultra-wide phased array antenna, the resulting graphics and results confirm the success of this type of antenna.

ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
1 Розкриття основних понять та характеристик антенної решітки.....	9
1.1 Антенна решітка	9
1.2 Фазована антенна решітка	12
1.2.1 Активна фазована антенна решітка.....	13
1.3 Багатопроменева антенна решітка.....	13
1.4 Діаграма направленості антени.....	15
1.4.1 Ширина діаграми направленості	18
1.4.2 Амплітудна діаграма спрямованості	19
1.4.3 Коефіцієнт направленої дії.....	20
2 Види ультраширококуглових антен	24
2.1 Ультраширококуглова логіперіодична антена	24
2.2 Балансна антиподова антена Вівальді	28
2.3 Щілинна антена	33
2.4 Антиподова антена Вівальді.....	35
2.5 Антена Вівальді	36
2.6 Антенні решітки з розширюючими прорізами.....	39
2.7 Антена SNA.....	45
3 Розрахунки.....	54
3.1 Порівняння характеристик антен з різною довжиною елемента.....	54
3.2 Порівняння характеристик антен з різною висотою елемента	59
4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	64
4.1 Оцінка головних шкідливих та небезпечних чинників при користуванні ПК.....	64
4.2 Технічні вимоги з приводу безпеки та охорони здоров'я.....	65
4.3 Освітлення робочих місць користувачів.....	66
4.4 Мікроклімат робочої зони	67
4.5 Виробничий шум	68
4.6 Пожежна безпека	69
Висновок	70
Список літератури.....	71

					PC-261.758744.001 -1	Арк.
						6
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АР** – антенна решітка.
ДН – діаграма направленості.
КНД – коефіцієнт направленої дії.
ФАР – фазована антенна решітка.
АФАР – активна фазована антенна решітка.
КП – коефіцієнт підсилення антени.
дБ – децибел.
ЧХ – частотна характеристика антени.
КСХ – коефіцієнт стоячої хвилі.
КСХН – коефіцієнт стоячої хвилі по напруженості.
АДС – амплітудна діаграма спрямованості антени.
УШС – ультраширококутова антена.
ЛПА – логоперіодична антена.
ДП – друкована плата.
FNA – антенні решітки з розширюючими прорізами .
SNA – sliced notch antenna
UWB – ultra-wide band.
TSA – tapered slot antenna.
BAVA - balanced antipodal Vivaldi antenna.

					PC-261.758744.001 -1	Арк.
						7
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Метою даного дипломного проекту є дослідження ультраширококугової фазованої антенної решітки на основі модифікованої антени Вівальді та комп'ютерне конструювання. Для того, щоб зрозуміліше описати дану тему, для початку треба розібратись в основах, а саме антенних решітках.

В наш час вдосконалення технічних сфер, такі як радіолокація, радіосистемна інженерія не можна уявити без вдосконалення та інновацій в антенній техніці. Антенні решітки почали використовувати через те, що виникла необхідність у збільшенні коефіцієнта підсилення антени.

АР з n елементів дають змогу підвищувати коефіцієнт направленої дії та підсилення антени, в зіставленні з одиночним випромінювачем. Решітки дозволяють нам збільшити електричну міцність та рівень потужності. Це відбувається за рахунок високочастотних підсилювачів, які розташовані в каналах решіток. Один з найбільших плюсів АР є здатність швидкого огляду місцевості, що відбувається при коливанні електричному скануванні.

Одна із значущих задач на сьогодні є побудова комплексної системи, яка може поєднувати декілька функцій. Для реалізації такої задачі виникає питання створення антенної решітки, яка сканує на різних частотах.

					РС-261.758744.001 -1	Арк.
						8
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 Розкриття основних понять та характеристик антенної решітки

На сьогодні, АР – найрозповсюдженіший тип антен, в склад яких можуть входити вібратори (металеві або щілинні), хвилеводи, а також апертурні антени.

1.1 Антенна решітка

Антенна решітка – система випромінювачів одного типу, які розташовані певним чином і збуджуються одним генератором або декількома когерентними генераторами. Типовими антенними решітками є директорна антена, щілинна антена, поверхневі антени з напівхвильових симетричних вібраторів та ін. Антенні решітки можуть бути класифіковані по наступним основним ознакам: геометрії розташування випромінювачів у просторі, способу їхнього збудження, закономірності розміщення випромінюючих елементів у самих решітках, способу обробки сигналу в решітці, амплітудно-фазовому розподілу струмів (поля) по решітці та типу випромінювачів. Залежно від геометрії розташування випромінювачів АР підрозділяються на лінійні, дугові, кільцеві, плоскі, опуклі (циліндричні, конічні, сферичні та ін.) і просторові (тривимірні) (рис. 1.1).

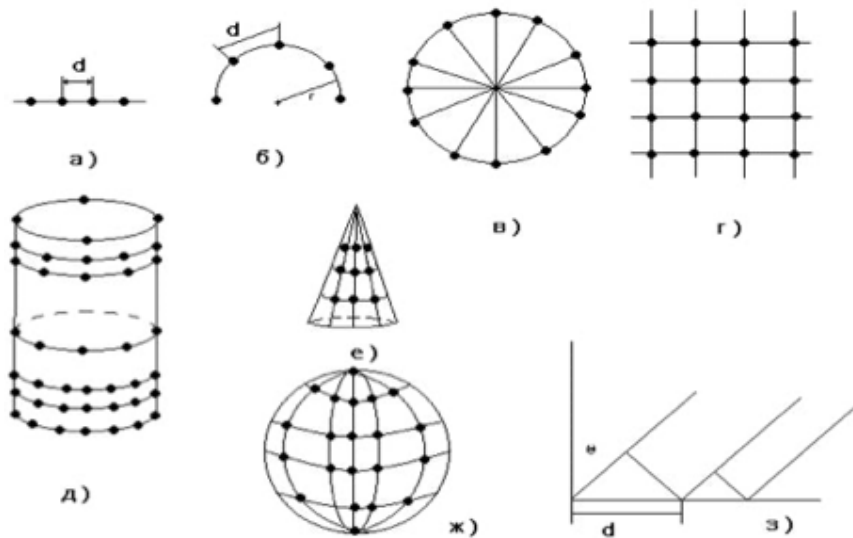


Рисунок 1.1 — Антенні решітки: а) лінійні; б) дугові; в) кільцеві; г) плоскі; д) циліндричні; е) конічні; ж) сферичні; з) нееквідистантна.

Просторова решітка в простому випадку являє собою систему з двох плоских решіток, паралельно розташованих в просторі. [1]

Розташування випромінюючої системи буває еквідистантним, та нееквідистантним. Різниця між цими поняттями полягає в тому, що в першому випадку крок між випромінювачами – величина постійна, а в другому – видозмінюється.

У плоскій антенній решітці випромінювачі мають декілька варіантів розташування, а саме: в прямокутній (рис. 1.2, а) або косокутній системі.

Якщо косокутна сітка формується з рівносторонніх трикутників, то в результаті отримуємо гексагональну решітку. (рис. 1.2, б).

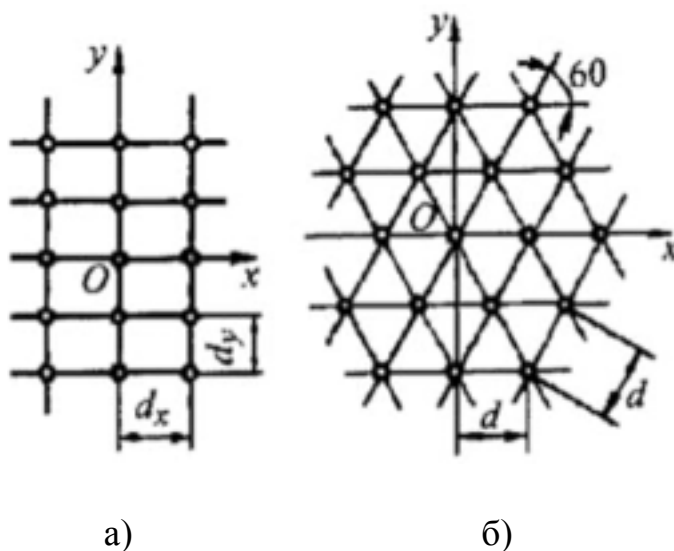


Рисунок 1.2 — Пряма косокутна (а) та гексагональна (б) решітки

Для того, щоб знижувати бокові пелюстки застосовують еквідистантні решітки. В таких решітках середні вібратори мають більший струм ніж периферійні. В конкретних випадках, коли дано розміри антени, найвищий коефіцієнт направленої дії (КНД) мають саме еквідистантні решітки. При

знижені бокових пелюсток – КНД зменшується, в цей же час зростають габарити антени.

Решітки поділяють на решітки з послідовним та паралельним живленням (збудженням). Якщо АР має не малі розміри – використовують схеми послідовно-паралельного живлення випромінювачів. Насамперед вони використовуються якщо решітку розділили на менші частини. Коли живлення решітки послідовне, то її елементи збуджуються хвилею послідовно (рис.1.3, а), а коли паралельне – незалежно (рис.1.3, б). Також один із видів паралельного живлення називається «ялинка» (рис.1.3, в). Суть такої схеми в тому, що вона отримується завдяки розподілу потужності. Також буває просторовий спосіб, іноді його описують ще як оптичний (рис. 1.3, г). В ньому збудження відбувається за рахунок падаючої хвилі, яка живиться від опромінювача.

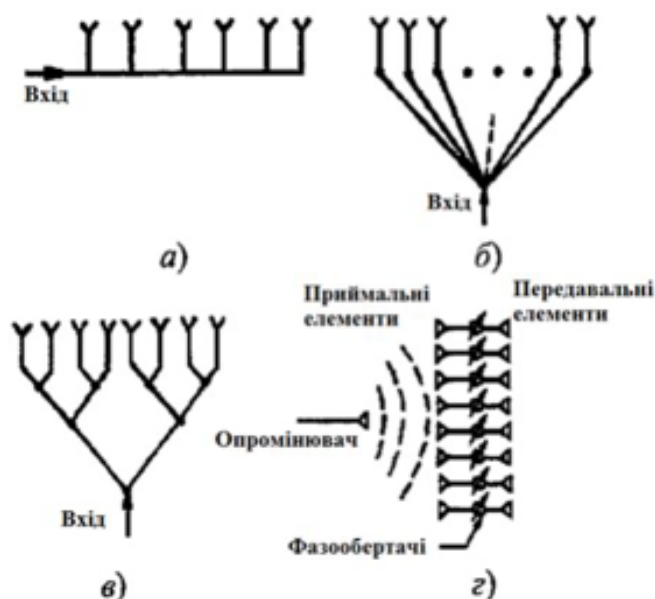


Рисунок 1.3 — Збудження випромінювачів в решітці: а) послідовна схема; б) паралельна схема; в) схема живлення типу «ялинка»; г) просторове збудження.

1.2 Фазована антенна решітка

Тип антен, у яких за допомогою зміни фази радіосигналу можна досягти максимального випромінювання і відповідної форми діаграми – називаються фазованими антенними решітками (ФАР). За допомогою такої системи можна управляти максимумом діаграми направленості (ДН). Приймальні АР із саморегульованим амплітудно-фазовим розподілом у залежності від заводої обстановки називаються адаптивними. Приймальні АР з обробкою сигналу методами когерентної оптики називаються радіооптичними. Приймальні АР, у яких вся обробка ведеться цифровими процесами, називаються цифровими АР. Сполучені антенні решітки мають у своєму випромінюючому розкритті два (чи більш) типи випромінювачів, кожний з яких працює у своєму робочому діапазоні. [2]

Фазовані антенні решітки відрізняються від інших АР включенням в антенний тракт системи фазообертача чи комутаторів, що дозволяє здійснювати керування фазовим чи амплітудно-фазовим розподілом для електричного сканування.

Знайшли застосування різні схеми побудови ФАР у залежності від вимог до системи. Просторовий спосіб збудження допускає два варіанти антен: відбивну ФАР і прохідну ФАР.

Фідерний спосіб збудження (розподільник закритого типу) допускає послідовне, паралельне, двійково-поверхове (ялинки) живлення випромінювачів і фазообертачів і їхньої комбінації. Знаходять застосування гібридні антени – спільне використання ФАР і антен оптичного типу.

Сполучення радіолінзи з ФАР та застосування спрямованих випромінюючих елементів ФАР (дзеркал, підрешіток і т.д.) дозволяє одержати ті ж результати: зменшення числа керованих фазообертачів при обмеженому секторі сканування. Сполучення лінзи з ФАР розширює сектор

					РС-з61.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

сканування плоскої ФАР. Одночасно з цим відбувається погіршення інших характеристик антенної системи. [3]

1.2.1 Активна фазована антенна решітка

Якщо до кожного випромінювача ФАР або до їхньої групи приєднувати підсилювач потужності, генератор або перетворювач частоти, то такі решітки називаються активними фазованими антенними решітками (АФАР) (рис.1.4, а, б).

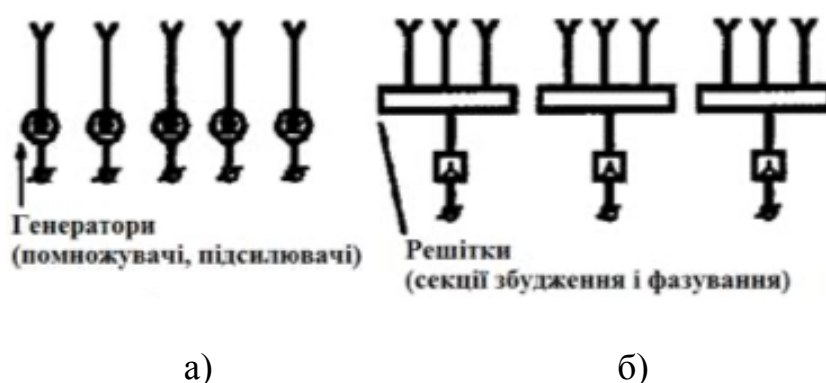


Рисунок 1.4 – Активні фазовані решітки: а) – активний елемент в кожному випромінювачі; б) – активний елемент на групу випромінювачів (модульна конструкція)

Циліндричні решітки випромінювачів, що підключаються комутаторами (з фазообертачами чи без них) для збудження систем полоскових ліній, хвилеводів, радіальних хвилеводів і інших елементів, дозволяють сканувати в широкому секторі кутів. [4]

1.3 Багатопроміньова антенна решітка

Антенні решітки, за допомогою яких може бути сформований ряд незалежних один від одного ДН, називаються багатопроміньовими. Також цей тип АР можна охарактеризувати наступним чином: багатопроміньові антенні решітки – це такі АР, які утворюють з одного випромінюючого розкриття

декілька променів і що мають відповідне число виходів. Схема багатопроменевої антенної решітки показана на рис.1.5.

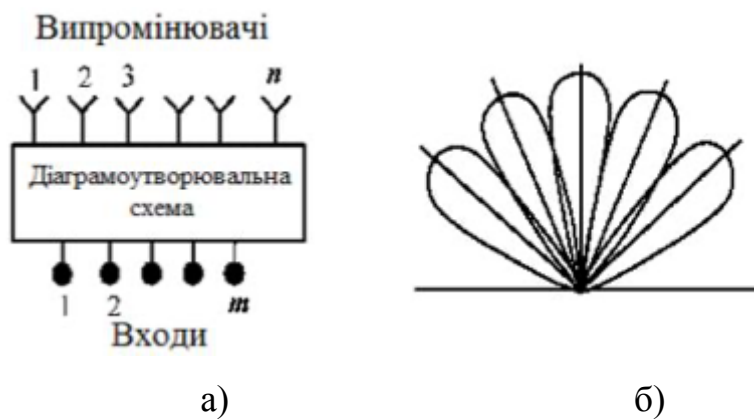


Рисунок 1.5 — Багатопроменева АР а) структурна схема б) діаграма направленості.

В її склад входять решітки випромінювачів та діаграмостворююча схема, яку також називають матрицею. Ця схема служить для забезпечення незалежного живлення випромінювачів решітки через різні входи. При підключенні передатчика до одного із входів схеми в випромінювачах решітки утворюється амплітудно-фазова діаграма направленості. Якщо підключати передатчик до будь-якого іншого входу схеми – виникає зміна амплітудно-фазового розподілу в випромінювачах решітки і утворення нової, відмінної від попередньої, діаграми спрямованості. [5]

В загальному випадку, число входів діаграмоутворюючої схеми відповідає кількості променів, які формуються багатопроменевою антеною решіткою, а число входів схеми рівна числу випромінювачів решітки. Якщо багатопроменева АР призначена для роботи в заданому секторі простору, то вона конструюється таким чином, щоб сусідні промені перетинались

приблизно на рівні половинної потужності. Багатопроменева антенна решітка – це досить універсальний пристрій. Якщо вона має N входів, то при одночасному їх використанню формується N незалежних один від одного променів як в режимі передачі, так і в режимі прийому. Якщо підключати почергово – формується один із променів, який відповідає підключеному входу.

Для живлення багатопроменевих АР застосовуються послідовні або паралельні діаграмостворюючі схеми.

В залежності від співвідношення амплітуд струмів збудження розрізняють решітки з рівномірним, експонентним і симетрично спадаючими амплітудними розподілами щодо центра решітки. Якщо фази струмів випромінювачів змінюються уздовж лінії їхнього розміщення по лінійному закону, то такі решітки називають решітки з лінійним фазовим розподілом.[6]

1.4 Діаграма направленості антени

Діаграма направленості антени – це графічне зображення розподілу рівнів потужності, яку випромінює антена на однаковій відстані від неї в різних напрямках та площинах, що проходить через центр чи вісь антени. Якщо антену, наприклад симетричний вібратор, оточити сферою певного радіуса і в кожній точці на її поверхні виміряти величину потоку потужності, випромінюваного антеною, то в результаті вимірювань можна отримати деяку фігуру – характеристику направленості антени. В нашому прикладі такою фігурою є тороїд, який показано на рис.1.6.

					<i>РС-261.758744.001 -1</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

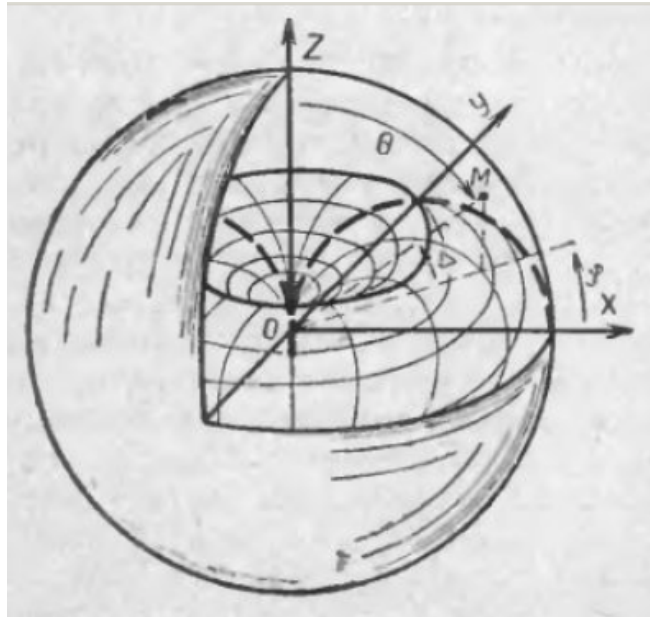


Рисунок 1.6 — Симетричний вібратор в системі координат

Положення будь-якої точки на сфері повністю визначається трьома координатами – радіусом сфери, азимутальним кутом і зенітним кутом.[7]

Радіохвилі – поляризовані хвилі. Поляризацію радіохвилі визначають по орієнтації вектора напруженості електричного поля відносно напрямлення її розповсюдження. У випадку прийому по земній хвилі наявність поляризації накладає певні вимоги на орієнтацію прийомної антени в просторі. Вона повинна співпадати по поляризації з передавальною антеною. Інакше – прийом радіохвиль буде послаблений.

Для визначення характеристики направленості антени в більшості випадків обмежуються зняттям її діаграм направленості в двох взаємно перпендикулярних площинах поляризації E та H. В залежності від положення антени відносно поверхні землі, площина E може бути горизонтальною або вертикальною.[8]

При знятті діаграми направленості в горизонтальній площині змінюється азимутальний кут, при цьому зенітний кут залишається

постійним. Діаграми направленості будують в полярній та прямокутній (декартовій) системах координат (рис.1.7 а, б).

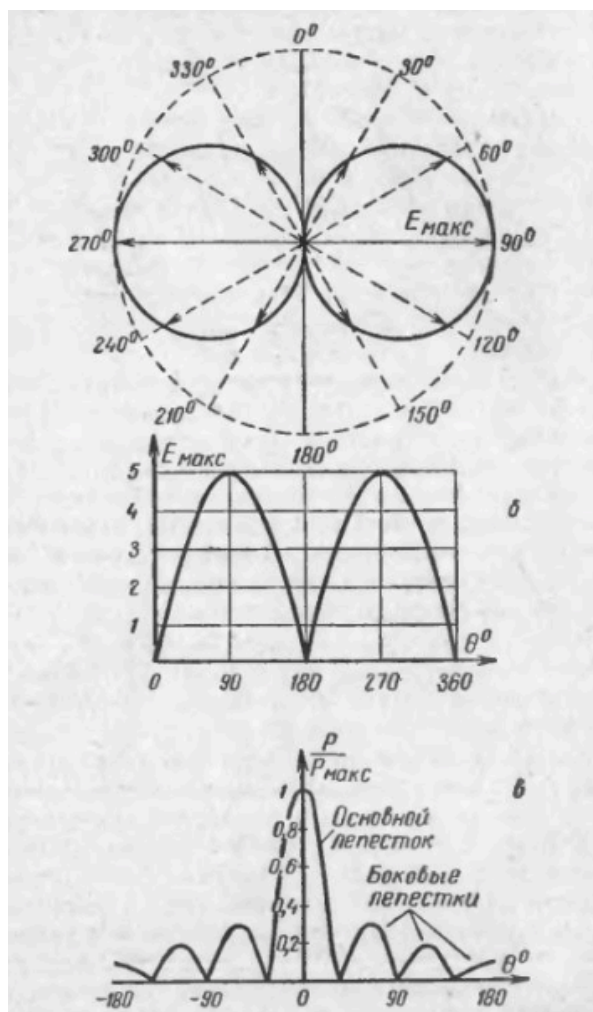


Рисунок 1.7 — Діаграма направленості антени в полярній (а) і прямокутній (б, в) системах координат.

На цьому рисунку зображена діаграма направленості симетричного вібратора в Е-площині. Діаграми спрямованості, виконані в полярних координатах (а), відрізняються більшою наглядністю, оскільки дають змогу представити зміну інтенсивності випромінювання в просторі. Прямокутна система координат (б) дозволяє змінювати масштаб по двох осях і отримати на графіку більш кращий результат в областях малої інтенсивності випромінювання. На практиці широко використовують нормовані діаграми

направленості, в яких всі величини віднесені до максимального значення (рис.1.7 в).

В загальному випадку, діаграми направленості антени мають ряд максимумів та мінімумів. Як правило, один із максимумів помітно перевищує інші. Частина діаграми спрямованості, яка має цей максимум називається основним пелюстком. Сусідні максимумами утворюють бокові пелюстки. Лінію, яка проходить через початок координат і точку максимуму головного пелюстка, називають направленням основного випромінювання. По пелюсткам, які знаходяться в секторі кутів відносно головного пелюстка, характеризують про заднє випромінювання антени. На практиці користуються поняттям коефіцієнта захисної дії антени. Під ним розуміють відношення рівня випромінювання в зворотньому напрямку до рівня випромінювання в основному напрямку.[9]

1.4.1 Ширина діаграми направленості

Також є таке поняття як ширина діаграми направленості. Ширина діаграми направленості антени визначається як кут між двома напрямками, в яких рівень потужності випромінювання рівний половині рівня максимуму. Ширина ДН оцінюється по її головному пелюстку. Зазвичай, ширина ДН указується для координатної площини і визначається як кут між напрямком, в якому густина потоку потужності зменшується в 2 рази до нуля порівняно з направленням головного максимуму (рис.1.8). Відповідно говорять про ширину діаграми направленості по половинній потужності і по нулям.

					<i>РС-261.758744.001 -1</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

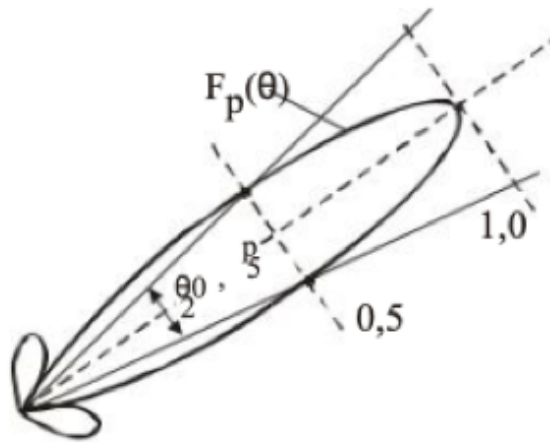


Рисунок 1.8 — Визначення ширини ДН

Також існує рівень паразитних пелюсток, який визначається як відношення їх максимумів до головного максимуму. Зазвичай цю величину виражають у відсотках або в децибелах (дБ).

1.4.2 Амплітудна діаграма спрямованості

Амплітудна діаграма спрямованості (АДН) антени – це відношення напрямку спостереження від амплітуди напруженості електричного поля в точках дальньої зони. АДН являється головною характеристикою, що характеризує спрямовані властивості антени. Це відношення розкривається лише структурою антени та розподілом струмів, які проходять у її елементах. Якщо пояснювати з фізичної точки зору, то в будь-яку точку Р в один час, але з різним фазовим зсувом надходять хвилі від випромінюючих елементів. Внаслідок цього формується сумарне поле. Величина цього поля рахується як відношення амплітуд і парціальних полів. Фазовий зсув парціальних полів рівний:

$$\Delta\Phi = \omega \frac{\Delta r}{c} = 2\pi f \frac{\Delta r}{\lambda} \quad (1.1)$$

де c — швидкість світла;

ω — кутова частота;

$\Delta\tau$ — різниця ходу фазового зсуву;

f — лінійшна частота;

λ — довжина хвилі.

За рахунок взаємодії полів від усіх випромінюючих елементів антени в повітрі формується інтерференція, форму якої й характеризує амплітудна ДН. Вона надає розуміння про те, як працюють поля. В одному випадку вони додаються, в іншому – віднімаються, а може бути й таке де вони компенсуються. Нормовані діаграми направленості по напруженості поля та по потужності для лінійної поляризації характеризуються відношеннями:

$$\tilde{F}(\theta, \varphi) = E(\theta, \varphi)/E_{max}(\theta_1, \varphi_1) \quad (1.2)$$

$$\tilde{F}^2(\theta, \varphi) = E^2(\theta, \varphi)/E_{max}^2(\theta_1, \varphi_1) \quad (1.3)$$

де $E_{max}(\theta_1, \varphi_1)$ — вираз амплітуди електричного поля в максимумі ДН;

θ_1, φ_1 — кути, які відповідають найбільшим значенням випромінювання.

Якщо описувати графічно ДН, то вона буде виглядати як замкнута поверхня. Якщо ДН перетинає основна площина, яка має електричний вектор, то таке явище називають ДН у площині E . Якщо площина має магнітний вектор, то таке явище називають ДН у площині H . Для різних антен з різними направленнями – використовуються різні системи координат. Так, полярна система координат застосовується для слабонаправлених антен, а прямокутна – для гостронаправлених. [10]

1.4.3 Коефіцієнт направленої дії

Які не були б зручні ДН, проте вони не завжди задовольняють негативні властивості антени. Оскільки направлений ефект антени проявляється у збільшенні напруженості поля у приймача, ввели число, яке показує у скільки разів потрібно було б збільшити потужність передатчика

					<i>РС-з61.758744.001 -1</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

при переході від направленої антени до ненаправленої, при умові збереження напруженості поля у приймача. Це число носить назву коефіцієнта направленої дії антени (КНД).

Зазвичай розглядаються КНД антени по напрямку її максимального випромінювання. Якщо цей напрямок вибрано правильно, то КНД визначає той рівень потужності, який отримується в результаті наявності направленості антени.

Показником, який характеризує антену в цілому, як з точки зору втрат енергії при її перетворюванні, так і з точки зору розподілу енергії в просторі, являється коефіцієнт підсилення антени (КП). Він чисельно дорівнює добутку коефіцієнта корисної дії антени і її коефіцієнта направленої дії і тому завжди менше останнього. Слід відзначити, що часто антену порівнюють не з ізотропним випромінювачем, а з її КП з коефіцієнтом підсилення якої-небудь іншої антени. При цьому обов'язково обговорюють яка антена принята в даному випадку за еталону.

Необхідно мати на увазі, що антена повинна виконувати відмічені вище функції не до одної частоти, а до декількох смуг частот і виконувати їх так, щоб весь антенний тракт не вносив помітних спотворень в розподіл енергії між окремими частотами спектру.

Наскільки антена справляється з поставленою задачею, показує її частотна характеристика, яка обумовлена залежністю вхідних опорів антени і її КНД від частоти. [11]

Частотною характеристикою антени (ЧХ) прийнято характеризувати як відношення амплітуди електромагнітного поля в дальній зоні від частоти передатчика. Частіше всього це співвідношення рахують як відношення КСХ від частоти. Рис.1.9.

					<i>РС-з61.758744.001 -1</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

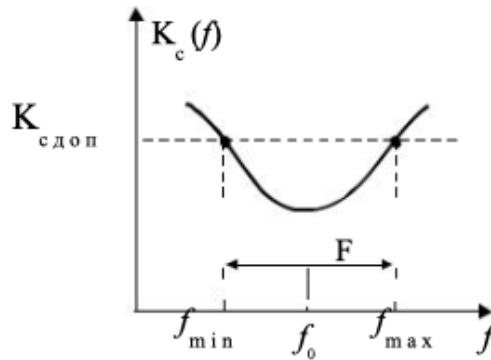


Рисунок 1.9 — Залежність КСХ від частоти

Властивостями антени являються номінальна частота f_0 , смуга пропускання F і коефіцієнт перекриття K_p .

Смуга пропускання – смуга частот, в межах якої параметри антени не виходять за допустимі межі:

$$F = f_{max} - f_{min} \quad (1.4)$$

де f_{max} — максимально допустима частота;

f_{min} — мінімально допустима частота.

Коефіцієнт перекриття – це відношення частот:

$$K_p = \frac{f_{max}}{f_{min}} \quad (1.5)$$

Для вузькосмугових антен $K_p \leq 1,1$.

Висновки

У даному розділі було розглянуто антенні решітки та їх характеристики.

Антенна є таким пристроєм, який має задачу поглинати та випромінювати електромагнітні хвилі. Сигнал який поступає з генератора до антени – формує в ній рухомі заряди. Цей процес і надає можливість випромінювання. Загалом, передавальна та приймальна антени нічим не відрізняються, окрім функції яку вони виконують. Важливо відмітити, що крім роботи випромінювання та поглинання енергії, антенна надає направленість, забезпечуючи поліпшення головних характеристик. Для поліпшення

направленості в період розвитку радіолокації почали використовувати систему вібраторів (антенні решітки).

Дана тема є актуальною в наш час, адже зі збільшенням технології і інформації конструюються нові види решіток та їх елементів.

					<i>РС-з61.758744.001 -1</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм..</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		23

2 Види ультраширококуосмугових антен

2.1 Ультраширококуосмугова логоперіодична антена

Ультраширококуосмугова логоперіодична антена (ЛПА) виготовляються із двох однакових металевих логоперіодичних структур плечей, які розділяються зазором і збуджуються в протифазі. Структури розташовані паралельно або під кутом один до одного і живляться від симетричної двохпровідної лінії або від коаксіальної лінії, яка проходить вдовж повздовжньої осі антени.

Одна з перших логоперіодичних антен, яка використовувалась як випромінювач для лінзових або дзеркальних антен, працювала в діапазоні частот 600-6000 МГц.

Більшість, практично реалізованих логоперіодичних антен, працюють в діапазоні частот нижче 10 ГГц. [12]

Найбільш близькою по технічним вимогам є вибрана в ролі прототипа логоперіодична направлена антена НЛО50. Антена працює в діапазоні частот від 850 МГц до 26,5 ГГц і є найбільш високочастотною із відомих ЛПА. Конструктивно антена представляє собою дві однакові плоскі металеві логоперіодичні структури, які встановлені під кутом один до одного. Кожна із логоперіодичних антен складається із двох частин. Нижня частина встановлена в опорному корпусі і з'єднана з верхньою частиною, яка є високочастотним продовженням логоперіодичної структури. Поблизу верхівки антени є елементи кріплення, які фіксують верхівки логоперіодичних структур одну відносно іншої. Антена закривається радіо-прозорим кожухом.

До недоліків цих антен можна віднести вказане обмеження високочастотної частини робочого діапазону частот.

					РС-261.758744.001 -1	Арк.
						24
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою винаходу є розробка ультраширокопосмугової максимально високочастотної логоперіодичної антени. Цього досягли шляхом друкування з двох сторін діелектрику логоперіодичних антен, які розташовані під кутом один до одного та з'єднаних на вершині. Пластини діелектрика вигнуті під потрібним кутом у місці зазору між вершинами друкованих ЛПА. [13]

На рис.2.1 показана конструкція ультраширокопосмугової ЛПА, де 1 – логоперіодичні структури, 2 – лінія живлення, 3 – опорний діелектричний корпус.

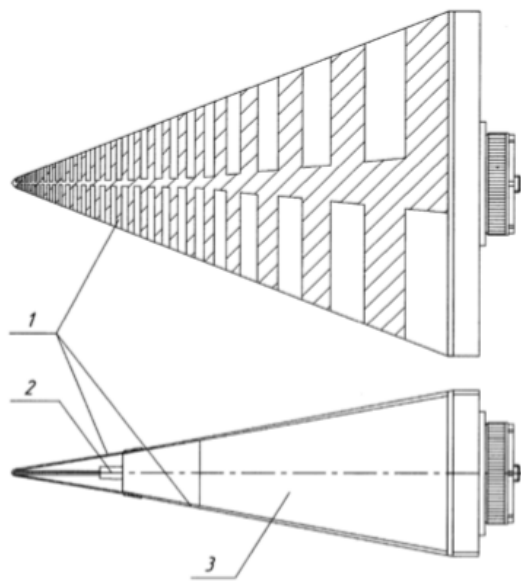


Рисунок 2.1 — Ультраширокопосмугова ЛПА

На рис.2.2 продемонстровано логоперіодичні структури на пластині фольгованого діелектрика.

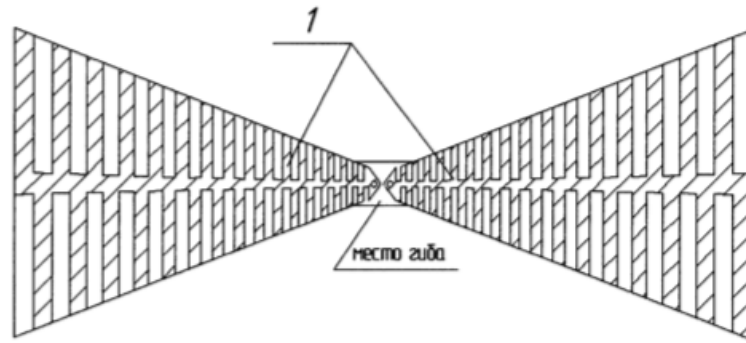


Рисунок 2.2 — Логоперіодичні структури на пластині діелектрика

Ультраширокопasmугова логоперіодична антена складається із двох однакових плоских металевих логоперіодичних плечей, які виконано у вигляді друкованої плати на одній стороні фольгованого діелектрика. Структури на ДП розташовуються співвісно вершинам один одного з необхідним зазором. Перед початком збірки антени логоперіодичні структури вирізаються по вершинам вібраторів, причому в місці зазору між плечами залишається частина діелектричної пластини, яка вільна від металу. Далі пластина встановлюється на опорний діелектричний корпус. Плечі логоперіодичних антен збуджуються в протифазі лінією живлення, яка розташована по віссі антени, та виконана у вигляді ультраширокопasmугового симетруючого узгоджуючого трансформатора. Верхня межа частот робочого діапазону ЛПА теоретично не обмежена і на практиці залежить від типу і розмірів лінії живлення і досягненої точності виготовлення вібраторів, які розташовані поблизу вершин логоперіодичних структур. Довжина таких вібраторів повинна бути менше половини довжини хвилі на верхній частоті робочого діапазону, що відносно легко реалізуються при їх виготовленні у вигляді ДП методом фотохімічного травлення на діелектрику.

В той же час при використанні в антені двох окремо виготовлених логоперіодичних плечей важко добитися повторюваності розположення їх

					РС-з61.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

вершин відносно один одного і від провідників лінії передачі. Порушення необхідного взаємного положення або використання яких-небудь додаткових елементів кріплення у вершині антени впливають на амплітудно-фазовий розподіл струмів у вібраторах активної зони у вершині антени і, як наслідок, спотворюється форма діаграм направленості і збільшується рівень бокового випромінювання. Це обмежує межу на верхніх частотах робочого діапазону частот антени. [14]

Виконання обох логоперіодичних структур у вигляді ДП на одній пластині гнучкого діелектрика з наступним згинанням пластини на потрібний кут забезпечує тучну фіксацію їх вершин відносно один одного і від провідників лінії живлення без додаткових елементів кріплення. Це дозволяє, при достатньо малій довжині вібраторів в вершинах логоперіодичних структур, отримати задовільну форму діаграми направленості і низький рівень бічного випромінювання в області верхніх частот, тим самим зробити антену максимально високочастотною.

Друковане виконання логоперіодичних плечей спрощує конструкцію антени, зменшуючи її масу. Сучасна прогресивна технологія фотохімічного травлення забезпечує хорошу повторюваність геометричних розмірів логоперіодичних структур, високу технологічність і стабільність радіотехнічних характеристик антени.

Таким чином, виготовлення обох плечей логоперіодичних антени у вигляді друкованої плати на одній стороні пластини гнучкого діелектрика вирішує поставлену умову – розширення робочого діапазону частот антени в області верхніх частот.

Ультраширокосмугова ЛПА працює в неперервному діапазоні частот від 1 до 32 ГГц. Антена має задовільні діаграми направленості з шириною від 100 градусів в нижній частині робочого діапазону частот до 35 градусів в

					<i>РС-з61.758744.001 -1</i>	Арк.
						27
<i>Зм..</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

його верхній частині. Відхилення діаграми направленості від повздовжньої віссі антени загалом не більше 10° . Рівень бічного випромінювання не більше 5%. У верхній частині діапазону частот вище 26 ГГц діаграми направленості мають невеликі спотворення, глибина яких менше 1,9 дБ. В цілому антена діюча в ультрашироких діапазонах з перекриттям 32:1. [15]

2.2 Балансна антиподова антена Вівальді

Модифікацією антиподової антени Вівальді є балансна антиподова антена Вівальді або як її ще називають - BAVA (balanced antipodal Vivaldi antenna). Презентували її 1996 року. Було зроблено вимірювання параметрів одного елемента і в сукупності невеликої решітки. Внаслідок цього було одержано смуги пропускання 40:1 та 3:1 відповідним чином. В наступному році відбулося вивчення будови цієї решітки. Отриманні результати не відповідали теоритичним передбаченням. На базі цього презентували двополяризаційну низькопрофільну модульну решітку, що працює в діапазоні 10:1, при кутах від -45° до 45° . Під час вивчення елементарна комірка (DmBAVA-MAS) отримала вдосконалення. Її кінцевий вид показано на рис.2.3.

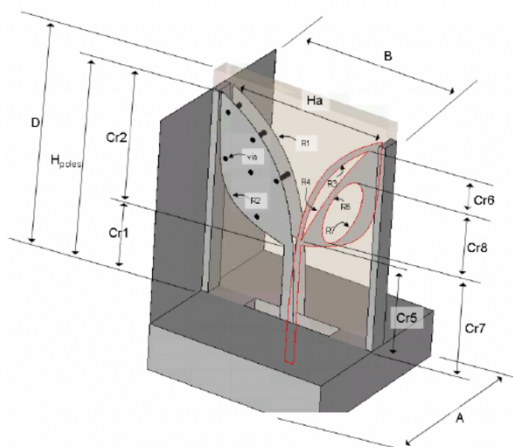


Рисунок 2.3 — Структура елементарної комірки DmBAVA-MAS

					PC-з61.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

Із рис.2.4 можна побачити, що узгоджений перехід від лінії живлення до мікросмужки не потрібен. Живлення передається по SMA роз'єму.



Рисунок 2.4 — VAVA-решітка. (Макет).

Охарактеризуємо головні аспекти антени. Основний недолік - це аномалії на імпедансній характеристиці, які ставлять обмеження на робочий діапазон частот. Спершу дослідники ввели металеві отвори, які поєднують зовнішні провідники антен та формують рівний потенціал, внаслідок чого утворюване поле між провідниками - усувається. Далі запровадили подвійне віддзеркалення елементів, яке поліпшує узгодження імпедансу, збільшує діапазон кутів сканування та знижує рівень крос-поляризаційного випромінювання. Крім того у внутрішньому провіднику створили магнітні щілини для того щоб Н-поле було нескінченне. Остаточне покращення було запровадження каналів U-форми в будови антени (Рис.2.5). Збільшення смуги частот здійснюється за рахунок незначного зменшення індуктивності. [16]

					РС-з61.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

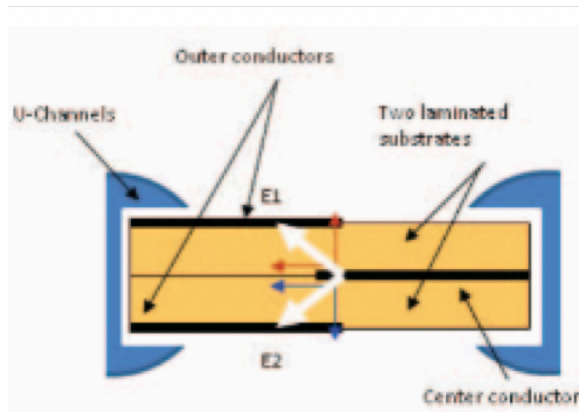


Рисунок 2.5 — VAVA і канал U-форми , вигляд зверху

На Рис.2.6 зображено графік КСХН для решітки VAVA при 45° в різних площинах та осьовому випромінюванні.

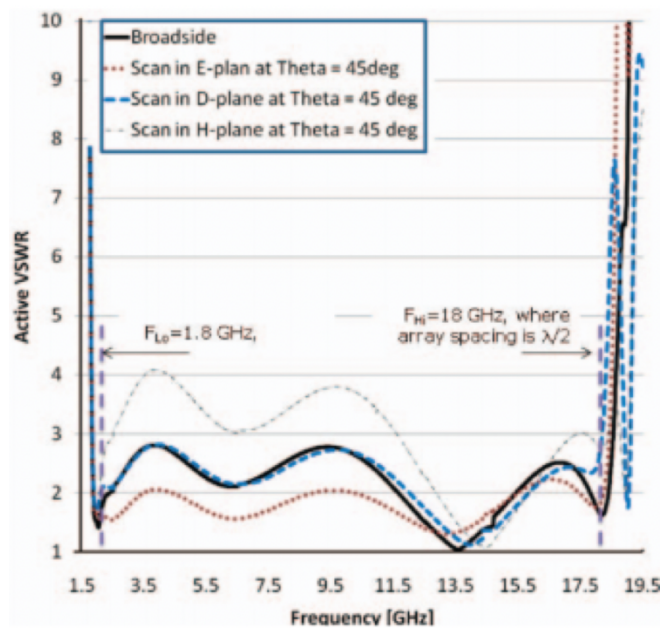


Рисунок 2.6 — Графік КСХ на основі VAVA при осьовому випромінюванні та 45° для площин E, H, D.

Обчислення відбувались в CST Microwave studio. Симуляція відбувалась для скінченної, двополяризаційної решітки розміром 55×10 в CST. Після цього, результати порівнювались з іншою решіткою (66×66) розрахунки для якої проводились за допомогою FEM-DD (Finite Element Method and Domain

Decomposition). При осьовому випромінюванні $KCX < 2,75$, проте в Н-площині KCX має вище значення, однак не більше ніж 3,75.

Ступінь крос-поляризаційного випромінювання для решітки в площині D при 45° не змінюється на значення менше ніж -17 дБ. На рис.2.7 показано графік частотної залежності крос-поляризаційного випромінювання в D площині для елементарної комірки та решітки 55×10 .

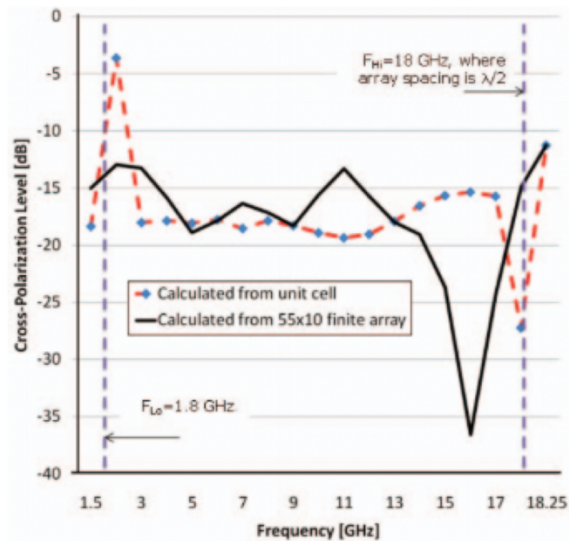
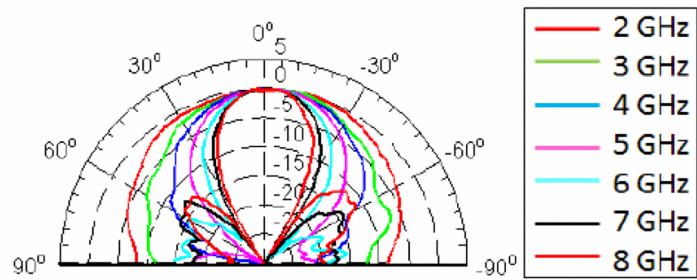
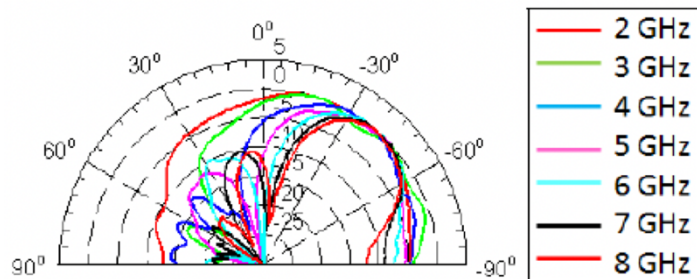


Рисунок 2.7 — Результати розрахунку максимального рівня крос-поляризаційного випромінювання для елементарної комірки періодичної решітки та центрального елемента решітки 55×10 .

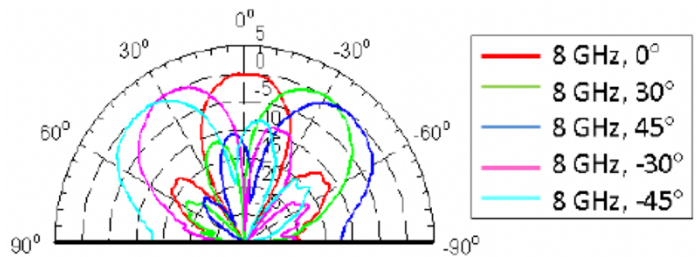
Вимірювання відбувалися для восьми центральних елементів решітки ВАВА (8×9). Крім цього, решта елементів підключались до узгодженого навантаження. На рис.2.8 показано діаграми спрямованості в діапазоні 2-8 ГГц при скануванні в секторі від 45° до -45° . [17]



а)



б)



в)

Рисунок 2.8 — Нормовані діаграми спрямованості решітки 8x9 а) осьове випромінювання; б) при 45°; в) при перемиканні основного променя на $\pm 45^\circ$.

Таким чином, решітка на елементах ВAVA може перекривати великий частотний діапазон та сканувати в досить значному секторі кутів. Також вона є низкопрофільною, однак має велике значення крос-поляризаційного випромінювання.

На основі досліджень які описано вище, 2016 року було запатентовано

кільцеву решітку з елементами ВAVA. Смуга робочих частот від 830 МГц до 5 ГГц, що являється майже 5:1.

2.3 Щілинна антена

Решітки з щілинними антенами стали усталеною технологією для сканування в широкому діапазоні частот. Для проектування решітки необхідно належним чином використовувати взаємний зв'язок. Тому виникли проблеми, коли ці решітки виготовляють у вигляді незалежних підрешіток без електричного контакту між сусідніми елементами або підрешітками. Проте, дуже корисно розглядати решітки з проміжками між елементами, оскільки набагато простіше виготовляти і ремонтувати їх, якщо елементи можна вставляти або видаляти окремо або невеликими групами. Далі буде представлено результати деяких досліджень антенних решіток Вівальді, в яких є проміжки між елементами. Такі проміжки між усіма елементами решітки зазвичай створюють розузгодження внаслідок зміни імпедансу, що порушуює робочу смугу. Використання дзеркальних симетрій в решітках збалансованих антен Вівальді усуває ці аномалії в значній частині робочого діапазону частот.

Антени Вівальді продемонстрували широку смугу пропускання (10:1) в решітках при скануванні, що дозволяє їм бути найкращим варіантом для реалізації заданих умов. Однак широка смуга пропускання досягається тільки тоді, коли сусідні елементи електрично з'єднані вздовж їх Е-площини. Важко зібрати і відремонтувати решітки Вівальді через їх незвичайне з'єднання між елементами, тому існуючі конструкції решіток Вівальді не піддаються модульній конструкції. [18]

Якщо елементи решітки можуть працювати з невеликими проміжками між окремими елементами або між малими підрешітками з'єднаних

					РС-261.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

елементів, то збірка і обслуговування решітки буде значно простіша. На рис.2.9 показана решітка з'єднаних елементів і масивів з проміжками між елементами або підрешітками.

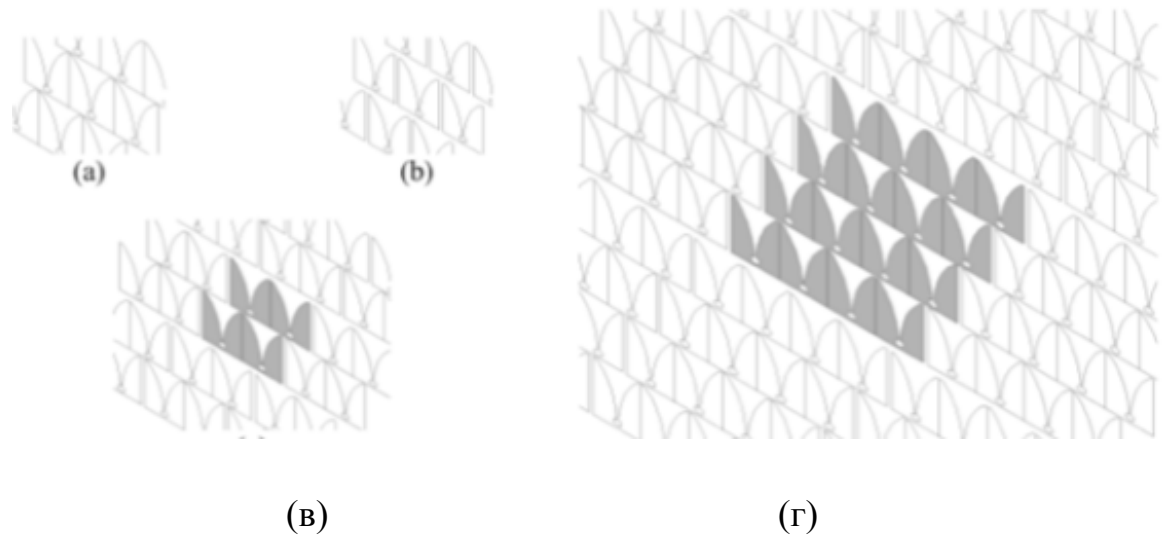


Рисунок 2.9 — Зміни нескінченних масивів: а) Усі підключені елементи; б) Елементи електрично ізолювані; в) плитка 2x2 електрично ізолювана від своїх сусідів; г) плитка 4x4 електрично ізолювана від своїх сусідів
Електронний літак, Н-Відстань між площинами = 3,2 см, глибина антени = 5.4 см.

Однополяризаційний елемент Вівальді, який має смугу пропускання 3:1 виконаний з металевих шарів на зовнішніх поверхнях діелектричної підкладки. У конфігурації, де елементи електрично з'єднані в нескінченній решітці показано на рис.2.9 (а). Ці ж елементи розміщені в нескінченній решітці з зазорами показано на рис.2.9 (б), причому зазори є нескінченно періодичними, а ширина зазору дорівнює одній товщині підкладки.

Перша аномалія виникає на частоті, де глибина антени становить четвертину довжини хвилі. При цій частоті виникають стоячі хвилі в проміжках між елементами з електричним полем в напрямку, протилежному від випромінюючої (конічної) щілини. Більш високочастотна аномалія є

результатом того ж явища, коли глибина антени становить три четвертини довжини хвилі. На рис.2.9 (в) показані проміжки між кожною підрешіткою 2x2 з двома електрично з'єднаними елементами Е-площини. Підрешітки електрично ізольовані між собою у складі нескінченної антенної решітки (проміжки також є нескінченно періодичними). На рис.2.10 показано поведінку одного елемента в плитці 2x2.

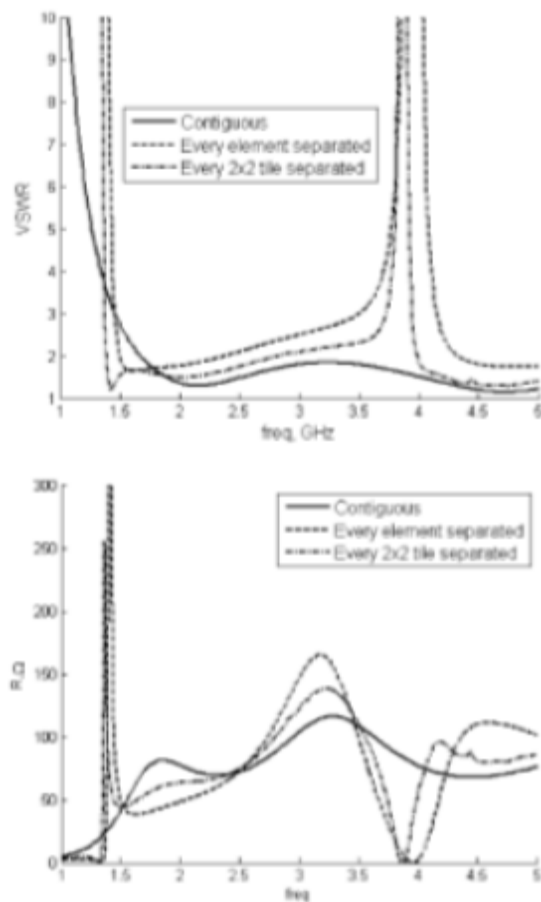


Рисунок 2.10 — Графіки КСХН і опору для елементів в безперервних змінах з одноелементна зазором і масивом плиток 2x2

2.4 Антиподова антена Вівальді

Модифікацією антени Вівальді, є «антиподова антена Вівальді» або антена типу «Кроляче вухо». Антена має аналогічну щілину, що будується за

рахунок еліптичної апроксимації, але нижня сторона елемента відрізається лишаючи лише вузьку провідну смужку. Якщо поставити два плеча з одного боку підкладки - то антену такого виду називають «Кроляче вуха», проте коли інше плече розташоване з другої сторони підкладки - то антену такого виду називають антиподовою антеною Вівальді. Остання - була запропонована Газітом в 1988 році. Будова передбачає розімкнені елементи, внаслідок цього застосовується конічний перехід від щілини до лінії живлення. Внаслідок цього, Газіт одержав смугу пропускання 18:1 для ізольованого елемента, однак антена має достатньо велику міру крос-поляризаційного випромінювання. Серед плюсів цієї будови є менший розмір антени, а саме її профілю та адаптивне живлення. На рис.2.11 показано загальну конструкцію даної антени. [19]

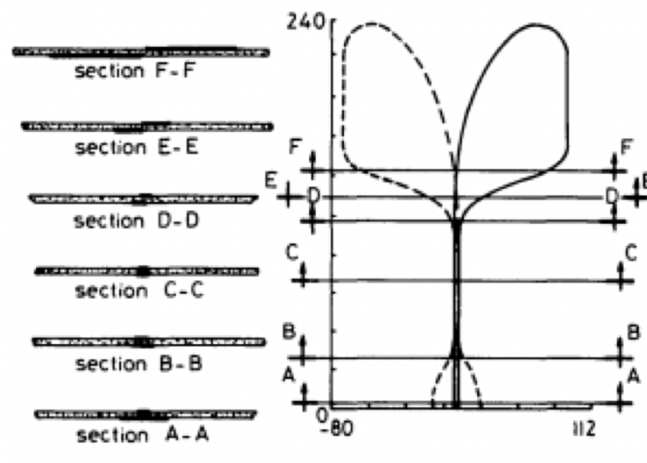


Рисунок 2.11 — Конструкція антени Газіта

2.5 Антена Вівальді

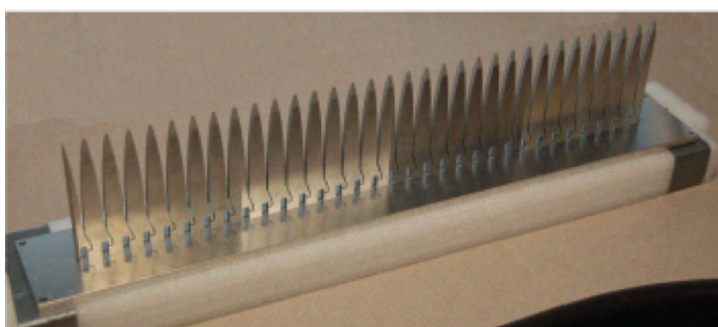
Найбільш оптимальним варіантом конструкції УШС антени є антена Вівальді. Даний тип антени дозволяє досягти прийнятної імпульсної характеристики при невеликих розмірах. Також дана антена забезпечує

					РС-з61.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

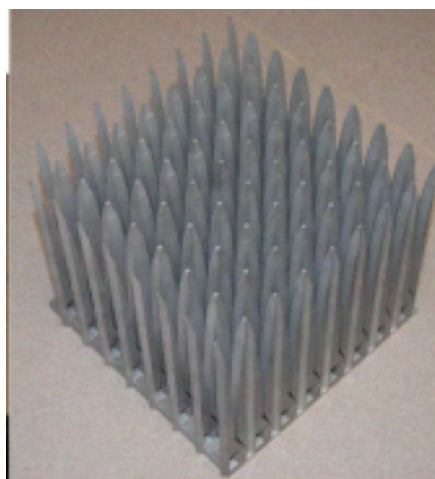
характеристики направленості, які задовольняють вимоги технічного завдання.

Антену Вівальді розробив Гібсон 1979 року. Своїм дослідженням він показав смугу частот в діапазоні 2-40 ГГц. Підсилення та рівень бічних пелюсток відповідно 10 дБ та -20 дБ. Особливістю цієї антени є її проста конструкція, працездатність на широкій смузі частот, великий коефіцієнт підсилення і невеликий рівень бокових пелюсток. Один з найбільших недоліків є великий рівень випромінювання, який виникає при крос-поляризації.

Далі буде показано метод побудови АР, прикладом якої виступить антена Вівальді. Її частини зроблені з металу. Також в нижній частині присутній SMA-з'єднувач через який проходить живлення. Одна із ознак АР є відсутність пайки. Нижче зображено дві решітки: 32-елементна лінійна (рис.2.12, а) та 8x8-елементна плоска (рис. 2.12, б). Вони гарантують перекриття по частоті 12:1, при КСХН <2. На рис.2.12, б спостерігаємо, що 2-поляризаційна решітка має робочий діапазон частот 0,73–8,7 ГГц. [20]



а)

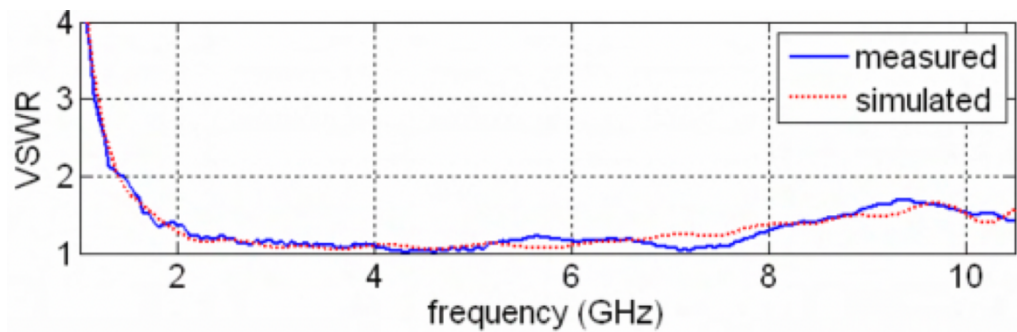


б)

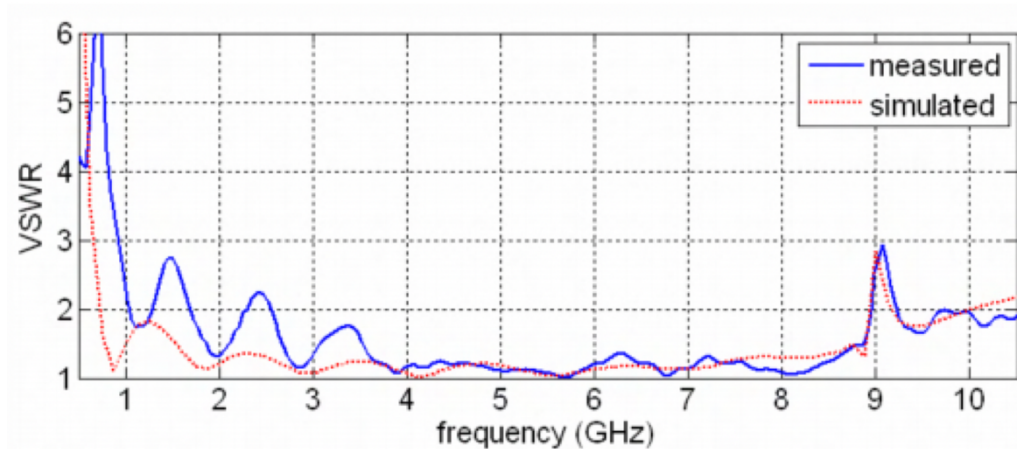
Рисунок 2.12 — а) 32-елементна лінійна, б) 8x8-елементна плоска

					РС-з61.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Одержані експериментальні дані порівняно з результатами розрахунків. Виміри відбувались для внутрішнього елемента 32-елементної лінійної та 8x8 решіток. Розраховувався параметр S_{11} , який характеризує ізольоване відбиття в n елементі при збудженому m . На рис. 2.13, а) та б) показано зіставлення результатів вимірювання КСХН для внутрішніх складових решітки та результатів КСХН для елемента періодичної нескінченної решітки.



а)



б)

Рисунок 2.13 — Графіки КСХН для; а) 32-елементної лінійної решітки, б) 8x8-елементної решітки;

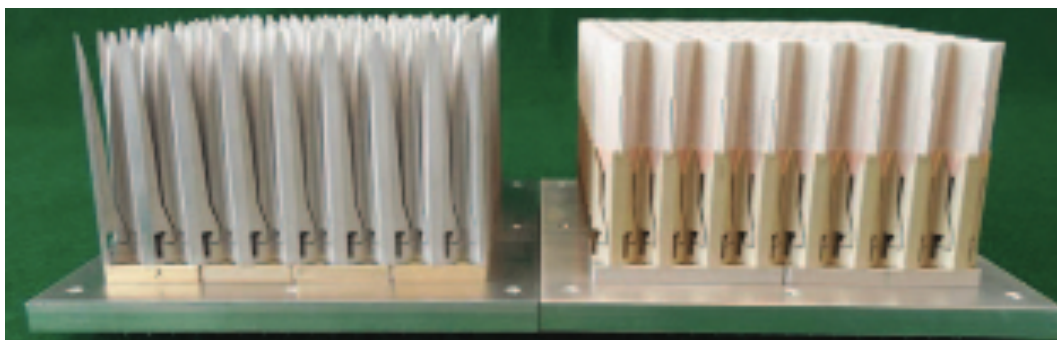
На рис.2.13 ми бачимо, що на частоті 9 ГГц КСХН максимальний і дорівнює 3. Пояснення цьому — скінченні розміри внутрішньої складової (елемента). При скануванні до 40° лінійна решітка демонструє добре

елементами. Обидві решітки працюють в одному і тому ж частотному діапазоні, приблизно від 2 до 12 ГГц (ширина смуги пропускання 6:1), із сумісним підсиленням. Для сканування при 60° у всіх площинах, звичайні та решітки з прорізами забезпечують $KСХН < 3.0$ і $KСХН < 2.2$ відповідно.

Близькою до максимуму частоти при 45° скануванні в діагональній площині звичайна розширююча виїмка демонструє повну зміну поляризації, в той час як нарізна решітка зберігає близько до 20 дБ крос-поляризаційного відхилення.

Антенні решітки з розширюючими прорізами (FNA) протягом десятиліть використовувалися для ультраширококутних фазованих решіток. Розширюючі вирізи мають хороші характеристики випромінювання з надзвичайно великими смугами пропускання. Як правило, збільшення довжини розширюючих виїмок призводить до збільшення робочої смуги пропускання. Однак по мірі того, як розширюючі прорізи стають електрично довгими, управління поляризацією погіршується, особливо при скануванні у діагональній площині. У двополяризованих решітках, що мають окремі горизонтальні і вертикальні канали, змінюється поляризація при будь-якому куті сканування.

Дві решітки в цьому порівнянні показані поруч на рис.2.15.



					РС-з61.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

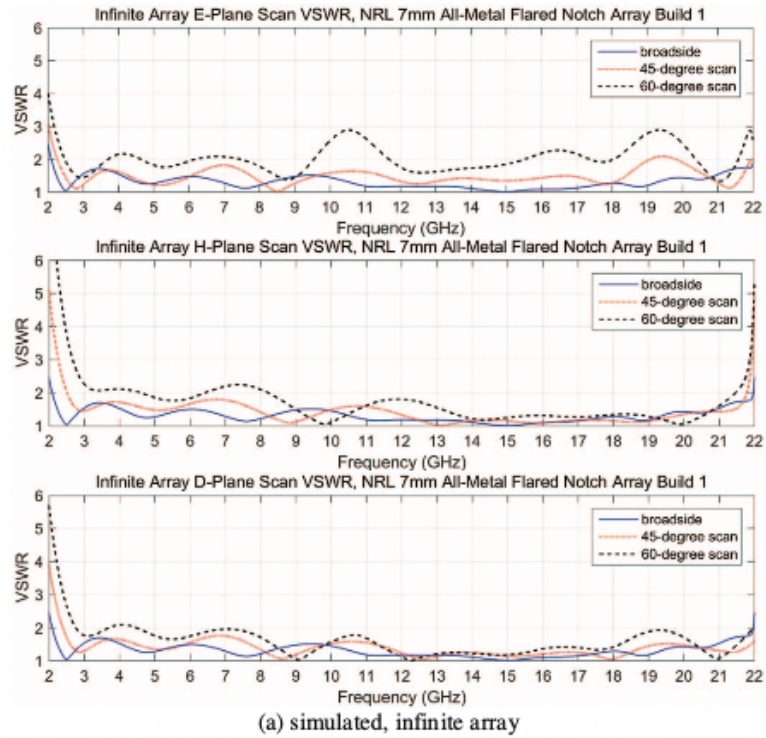
Рисунок 2.15 — Порівняння металевої звичайної решітки, з розширюючими прорізами (зліва), з прорізами (праворуч)

Обидві мають двополяризаційну лінійну компоновку із загальною кількістю портів (256) в квадратній сітці 16x16. Суцільнометалева конструкція може бути виготовлена за допомогою високоточної обробки і не вимагає пайки для збірки. Решітки, показані на рис.2.15, побудовані на відстані 7 мм від решітки і використовують роз'єми mini-SMP. Щільова антена має суцільну металеву основу, але в цьому варіанті конструкції суцільнометалева основа переходить в вертикальні елементи. Пластини з подвійною поляризацією зв'язані в корпусі і ємнісно з'єднані з основою таким чином, що немає необхідності в паяльних з'єднаннях будь-якого типу. [21]

Обидві решітки мають приблизно 10:1 ширину смуги пропускання при скануванні на 60 градусів з використанням КСХН <3 або більше.

Коефіцієнт стоячої хвилі для решітки з розширюючими прорізами продемонстрована на 2.16 (а, б). Решітка має приблизно 10:1 смугу пропускання КСХН <2 для 45° сканувань у всіх площинах, КСХН<3.0 для 60° сканувань у всіх площинах.

					РС-з61.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41



Активне КСХН вимірювали для центрального елемента решітки 16x16 з результатами, показаними на рис.2.16 (б), для різних випадків сканування. Лінійна двополяризована решітка 16x16 відносно мала в порівнянні з передбачуваною робочою смугою пропускання. Проте, сканування КСХН і смуги пропускання демонструє, що невелика решітка 16x16 цього типу має досить непогані результати, які задовольняють задані умови.

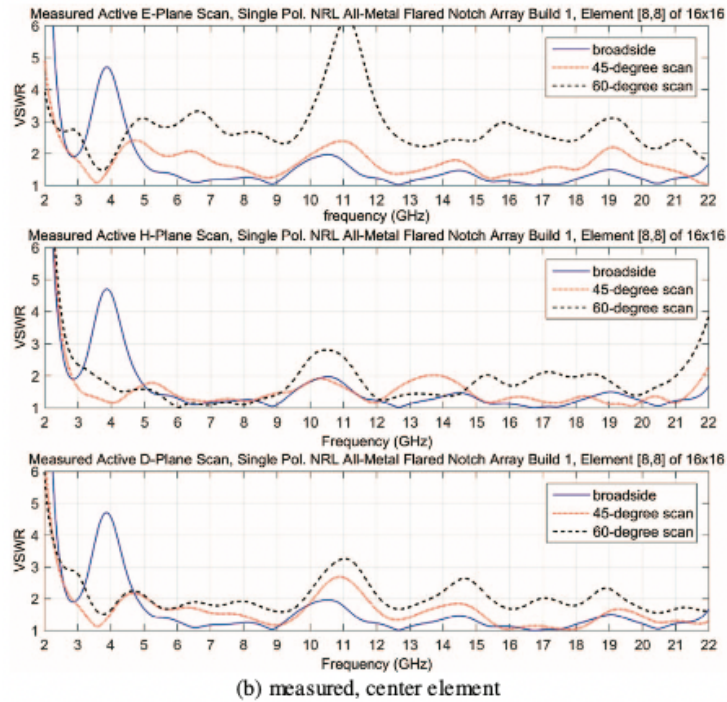


Рисунок 2.16 — Коефіцієнт стоячої хвилі для решітки з розширюючими прорізами: а) при 60-градусному скануванні КСХН <3.0 у всіх площинах; б) при 45-градусному сканування КСХН <2.0 у всіх площинах.

Вимірний КСХН для центрального елемента решітки показує відносно узгодження з розрахунковими числами, за винятком деяких відхилень, які спостерігаються на певних частотах в діапазоні.

КСХН для щільової антени показаний на рис.2.17. В цілому, антена має дещо кращі результати по всій смузі з 60-градусним скануванням – КСХН <2,2 в порівнянні з КСХН <3 для звичайної решітки. Очікується, що більш великі решітки матимуть нижчі рівні КСХН. Невеликий розмір решітки був обраний з урахуванням витрат і призначений тільки для демонстрації.

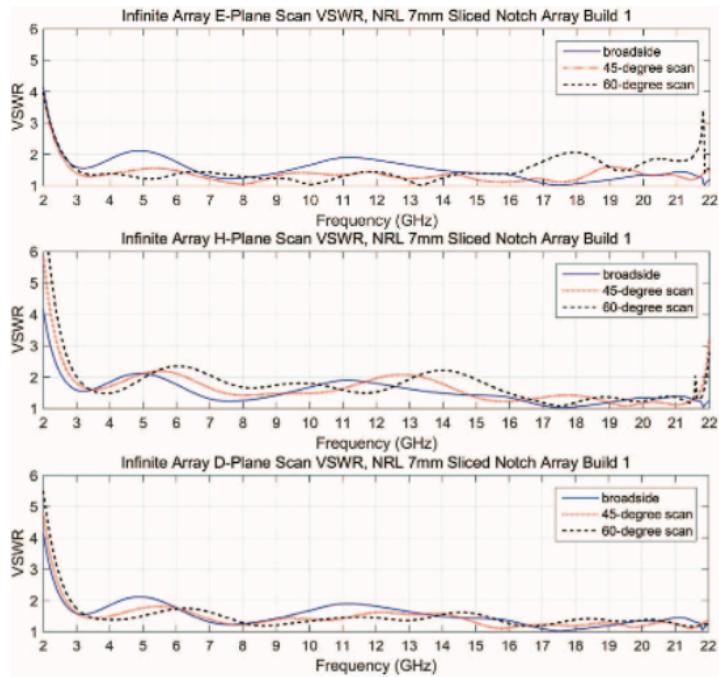


Рисунок 2.17 — Масив з розрізом, у якому при 45-градусному скануванні КСХН <2 і 60-градусному скануванні КСХН <2.2

Антенна решітка Вівальді, розширюючий проріз, і т.д., зіграли важливу роль в дослідженні ультраширокопосмугових (UWB) антен. Дослідження та дослідно-конструкторські роботи за останні десятиліття привели до появи безлічі практичних рішень і головних принципів проектування, завдяки яким решітка Вівальді стала важливою серез систем UWB. Незважаючи на це, значний рівень кросполяризації при скануванні в неосновних площинах залишається невирішеною проблемою в таких решітках.

Тому була представлена решітка з нарізною антеною, яка здатна досягти тієї ж смуги пропускання, що і решітка Вівальді, але при збереженні низької кросполяризації. Теоретична основа для роботи решітки щілинної антени заснована на поєднанні суперпозиції вертикальних і горизонтальних струмів, що поширюються вздовж конічної області елемента, для придушення кросполяризаційного випромінювання.

2.7 Антена SNA

Як решітка Вівальді, так і решітка SNA виготовлені за схожою технологією (рис.2.18).

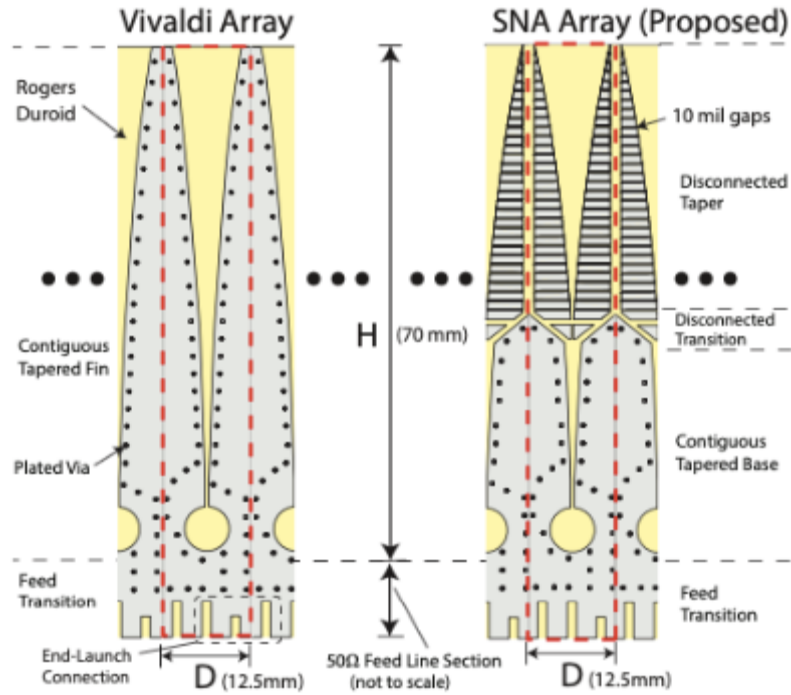


Рисунок 2.18 — Порівнення масивів Вівальді (ліворуч) та SNA (праворуч).

У SNA є область з ребрами, де верхня частина конфігурується в ряд вертикально складених (відносно елемента) і роз'єднаних (відносно ребер) металевих смуг.

Висота (H) кожного елемента становить 70 мм (профіль елемента над площиною землі), а D відповідає частоті напівхвильової дифракційної решітки. Розміри глибини і періодичності (H / D) кожного елемента матриці дорівнюють 5,6.

На рис.2.19 можна побачити, що обидві решітки демонструють задовільну роботу, а решітка SNA має дещо вищі рівні КСХН (<1,8) в порівнянні з решіткою Вівальді (<1,6).

					PC-z61.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

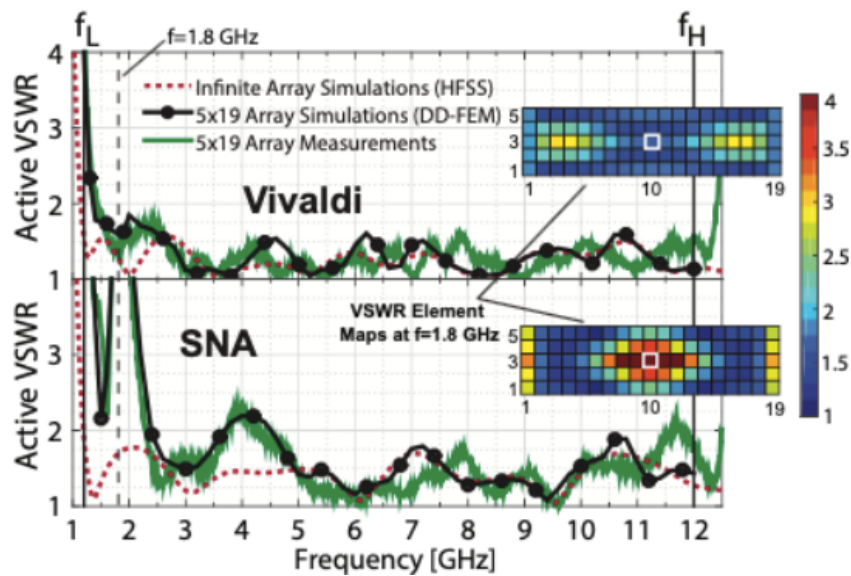
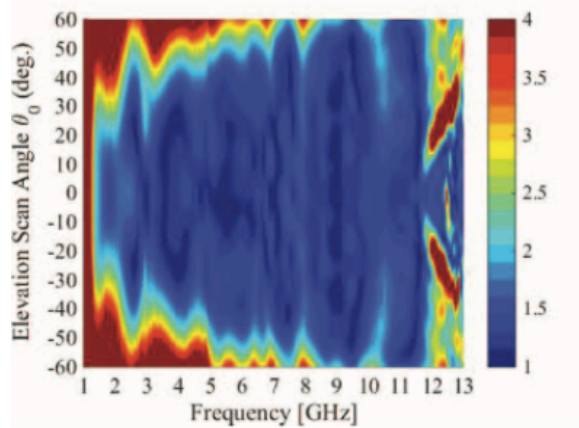


Рисунок 2.19 — Графіки порівняння теоретичних та рпактичних результатів активного КСХН для решіток Вівальді та SNA.

Вимірний центральний елемент демонструє чудове узгодження, а також вказує різні результати в обох решітках на більш низьких частотах через електрично малі розміри решітки. Можна відзначити, що решітка Вівальді має підвищений КСХН.

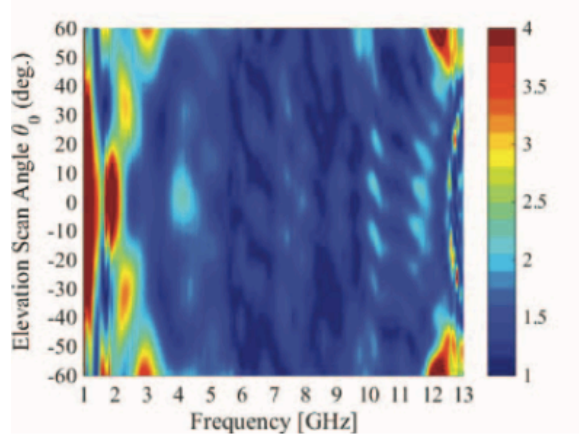
Вимірні активні КСХН для сканувань в Е площині, в залежності від частоти та кута сканування показані на рис.2.20 для матриці Вівальді (а) та SNA (б), в діапазоні 1–13 ГГц.

5×19 Vivaldi Array E-Plane Scan Active VSWR



(а)

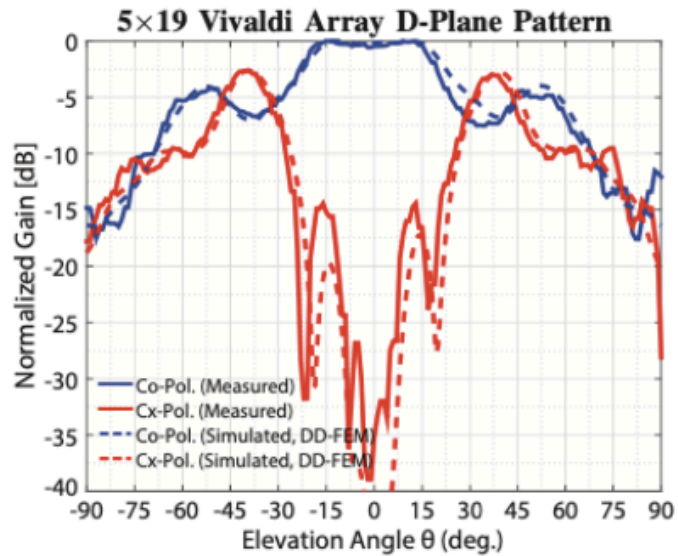
5×19 SNA Array E-Plane Scan Active VSWR



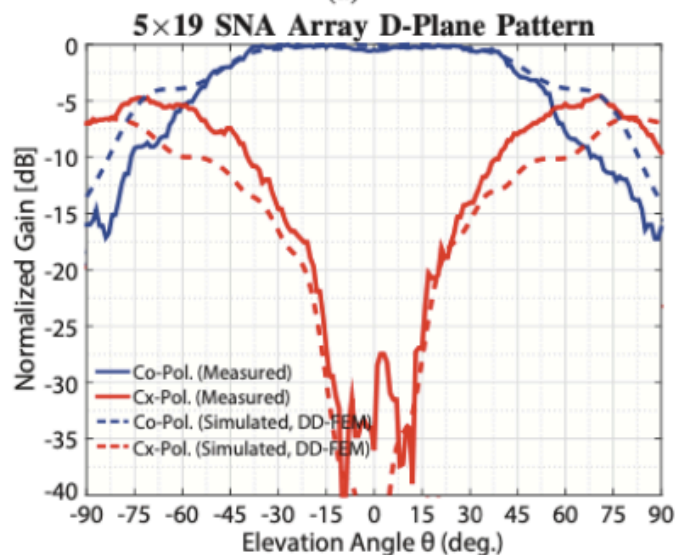
(б)

Рисунок 2.20 — Вимірний однополяризаційний елемент 5×19 решітки в Е-площині сканування активних КСХН в порівнянні з частотою і кутом сканування. а) масив Вівальді; б) пропонуванний масив SNA.

У випадку, при більш високих частотах, характеристики імпедансу стають кращими. Вимірювання центрального елемента в далекій зоні для обох матриць показані на рис.2.21 поряд з моделюванням на високій частоті (12 ГГц).



(a)



б)

Рисунок 2.21 — Вимірювання центрального елемента в далекій зоні D-площини з поперечною поляризацією і моделюванням результатів кінцевих масивів на частоті 12 ГГц для конфігурацій 5×19 однополярних масивів. а) масив Вівальді; б) масив SNA.

Моделювання добре узгоджується з вимірами в цілому; є деякі розбіжності при широких кутах сканування в решітці SNA. Решітка SNA забезпечує більш широкий діапазон сканування (приблизно до 60°).

Модифікацією антени TSA є решітка SNA (slised notch antenna). Її

робочий частотний діапазон 1,2-12 ГГц (10:1). Також має непоганий КСХН (<2,5 при скануванні 60 градусів), що і є основною ознакою даної решітки.

Однак висота елемента 2,95λвч. Новий елемент побудований на базі TSA. До роз'єму (SMA) під'єднаний коаксіальний кабель (50 Ом), через який подається живлення. Для того щоб був перехід від небалансної до балансної лінії передач застосовують балун Кнора. Різниця антен в тому, що плече порізано на короткі провідники. Зауважимо, що за допомогою відступу відрізків провідника від краю - суміжні елементи не мають електричного контакту між плечима. Порівняння будови TSA та SNA представлено на рис.2.22. Також, на рис.2.23 зображено живлення для даних антен. [7]

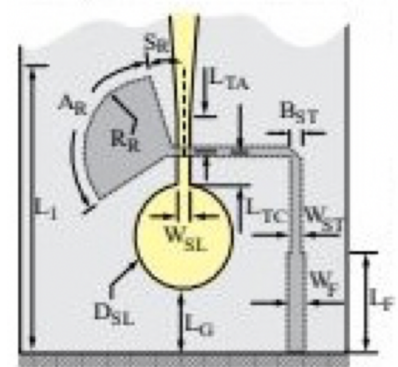
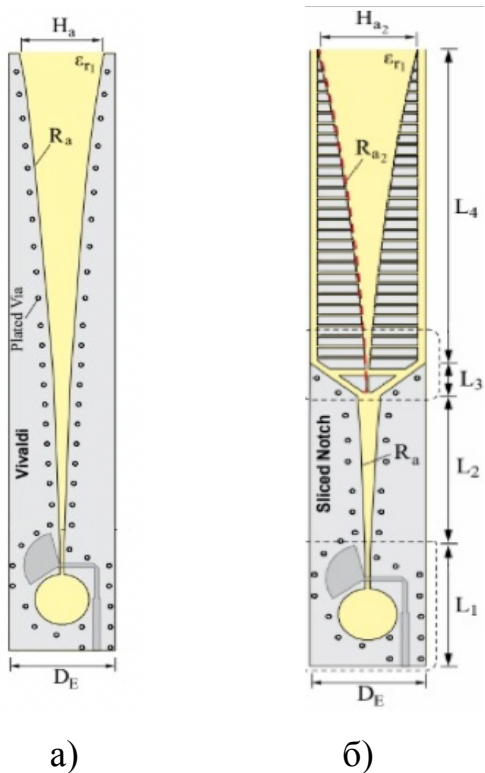


Рисунок 2.22 — Структура елементів Вівальді (а) та SNA (б).

Рисунок 2.23 — Балун Кнора.

На рис.2.24 зображено порівняння теоретично отриманих графіків

КСХН центрального елмента, при 45° та 60° кутах сканування для плоскої решітки.

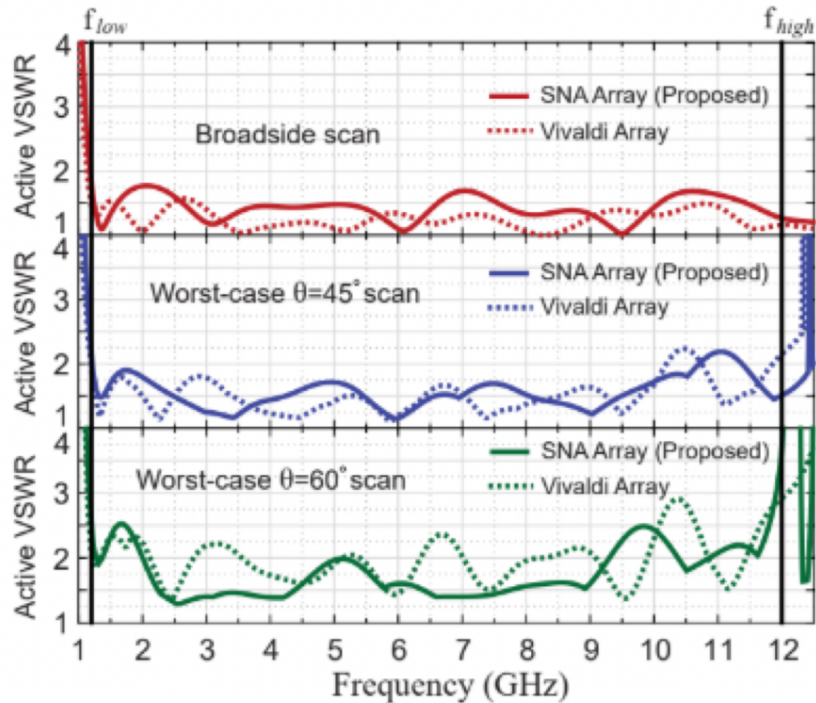
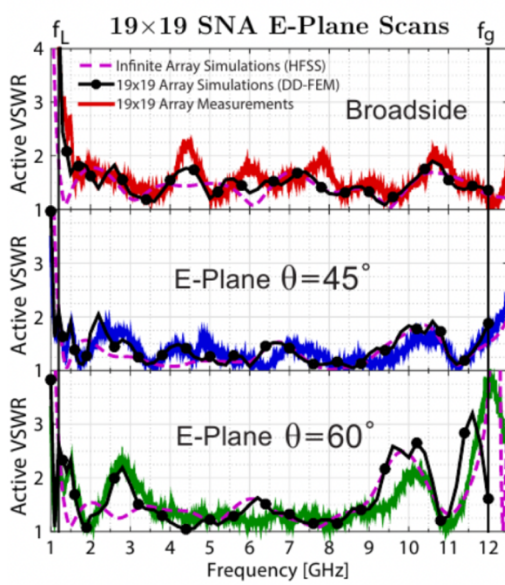
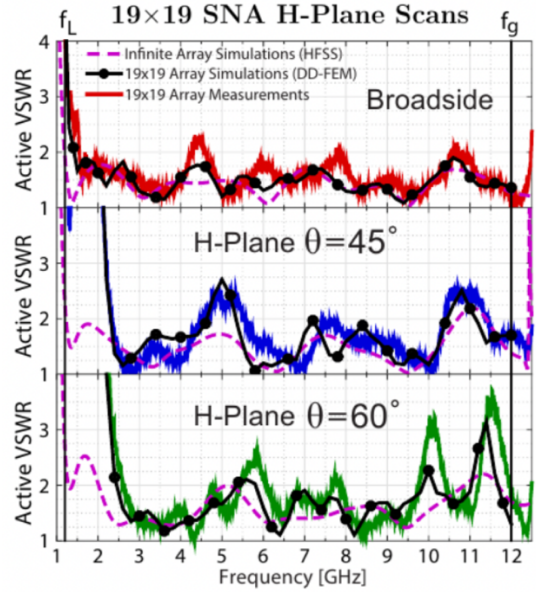


Рисунок 2.24 — Графіки КСХН внутрішнього елемента для TSA та SNA при осьовому випромінюванні 45° та 60° .

D-площина має проміжні результати між результатами E та H площин. На рис.2.24 видно, що максимальне значення КСХН для центрального елемента SNA = 2.5, при 60° . Рис.2.25 демонструє нам графіки виміру КСХ внутрішнього елемента 1-поляризаційної решітки SNA (19x19 на кутах 45° та 60° та осьовому випромінюванні в E і H площинах). Також зазначимо, що при 60° у H-площині максимальний КСХН внутрішнього елемента дорівнює 3,75.



а)



б)

Рисунок 2.25 — Порівняння графіків КСХН внутрішнього елемента для двох результатів вимірювання при осьовому випромінюванні, 45° та 60° .

На рис.2.26 показано графіки рівнів крос-поляризаційного випромінювання при 8,10 та 12 ГГц в D та E площинах. Можна побачити, що максимальне значення для площини D є майже -5 дБ, однак із наближенням до осьового випромінювання знижується до -30 дБ. Коефіцієнт підсилення SNA та TSA дорівнює 5. [22]

Висновки

На відміну від матриці Вівальді, пропонована область з нарізними ребрами не потребує безперервного електричного з'єднання з суміжними елементами. Ці унікальні особливості можуть бути використані для значного спрощення процесу виготовлення двополяризованих пристроїв.

Решітка Вівальді також має вплив від резонансів сканування поза смуги частот близько 12 ГГц. SNA зменшує цю проблему в межах робочої смуги внаслідок меншого розміру частини елемента.

					<i>PC-261.758744.001 -1</i>	Арк.
<i>Зм..</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		53

3 Розрахунки

В даному дипломному проекті основною задачею було побудувати ультраширокопосмугову антенну решітку SNA. Будеться вона на основі модифікованої антени Вівальді.

Конструювання проводилося в програмі CST Microwave Studio. На цій платформі було детально змодельовано конструкцію антени.

3.1 Порівняння характеристик антен з різною довжиною елемента

Розрахунки проводились для центрального елемента в складі нескінченної антенної решітки. Розміри було взято з наукового журналу про антени. В програмі порівнювалися S-параметри, КСХН, діаграми направленості та інше. На рис.3 продемонстровано порівняння результатів S-параметрів для елемента антенної решітки.

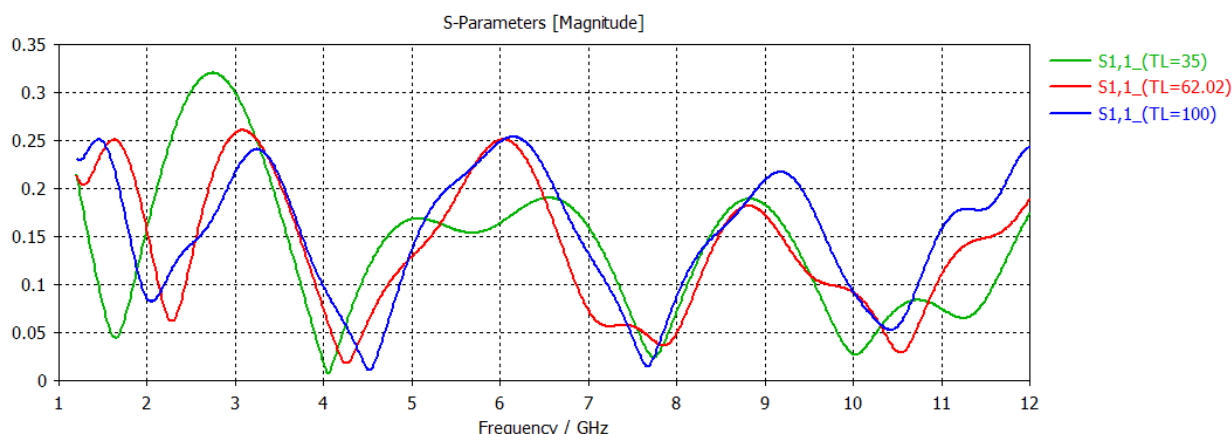


Рисунок 3 — S-параметри різних довжин антени

В даному випадку порівнювалися S-параметри при різній довжині елемента антени. Можна сказати, що довжина майже не впливає на цю характеристику.

При збільшенні довжини антени з 62.02 мм до 100 мм (брали умовно) характеристика S-параметрів майже не змінюється, навіть стає кращою. При

зменшенні довжини антени до 35 мм, наші характеристики антени погіршуються. Так, наприклад, на рис.3 видно, що S-параметри при цій довжині погіршилися.

Наступний критерій для порівняння — це КСХН. На рис.3.1 представлено порівняння результатів вимірювання КСХН.

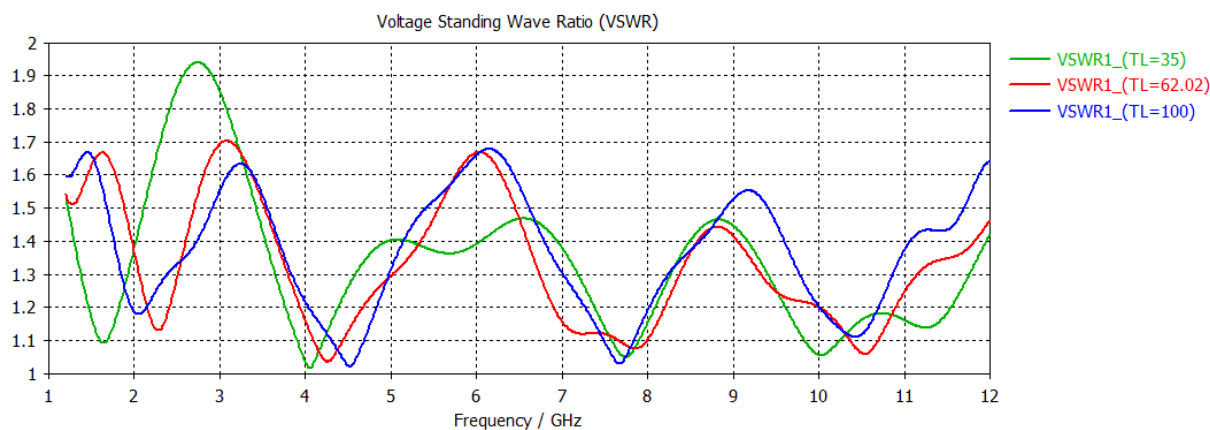


Рисунок 3.1 — Порівняння КСХН антен різних довжин

Дивлячись на графіки можна сказати, що ми отримали деякі аномалії в результатах на низьких частотах. Проте можна відзначити, що КСХН має непогані характеристики, адже у всіх трьох випадках не перевищує 3 та не досягає навіть 2 по всьому діапазону частот, що вказує на досить хороше узгодження. Також, на частоті 2.7 ГГц спостерігаємо максимальне значення КСХН, яке дорівнює 1.9.

Тепер можна звернути увагу на діаграми направленості при різних довжинах антени та частотах. Порівнювати їх можна в полярній системі координат та у вигляді 3D. В другому випадку, ми можемо бачити зміни більш наглядно. На рис.3.2 (а, б, в) показані діаграми направленості в полярній системі координат для трьох довжин антени при частоті $f=4$ GHz.

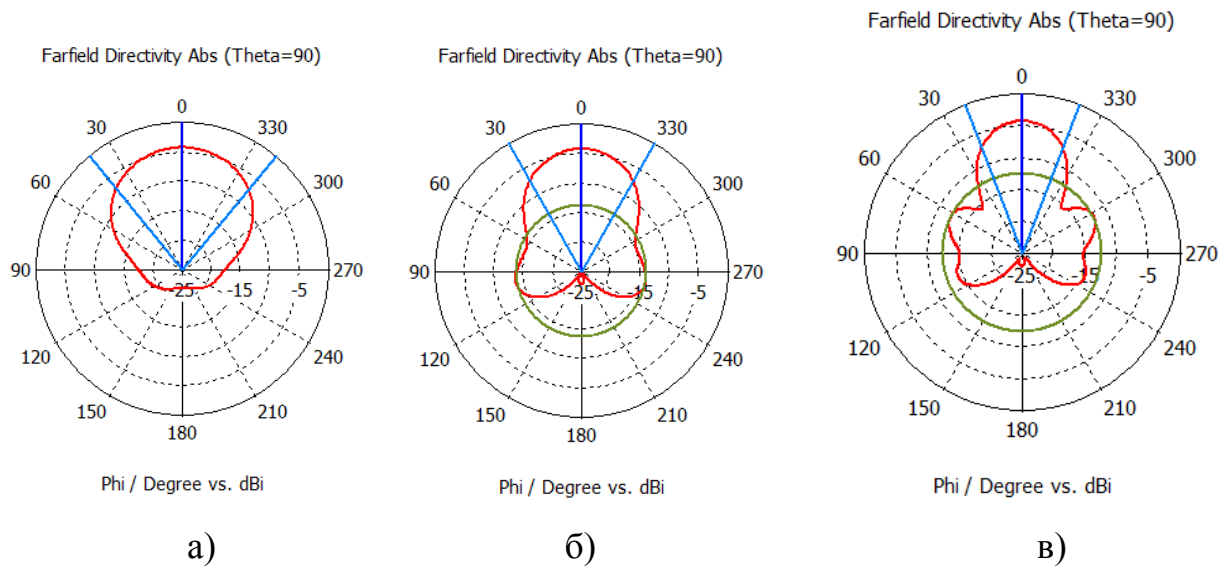


Рисунок 3.2 — Діаграми направленості в полярній системі координат при частоті 4 ГГц для довжини антени: а) 35 мм; б) 62 мм; в) 100 мм.

Також на рис.3.3 (а, б, в) продемонстровано цю характеристику при максимальній частоті, а саме $f=12$ GHz.

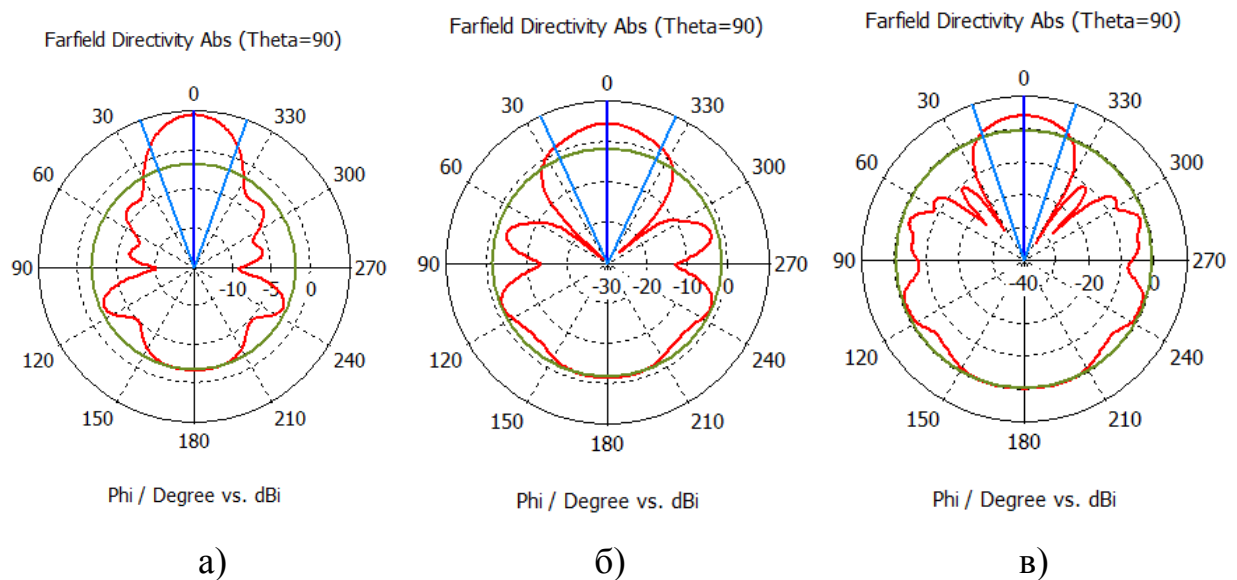
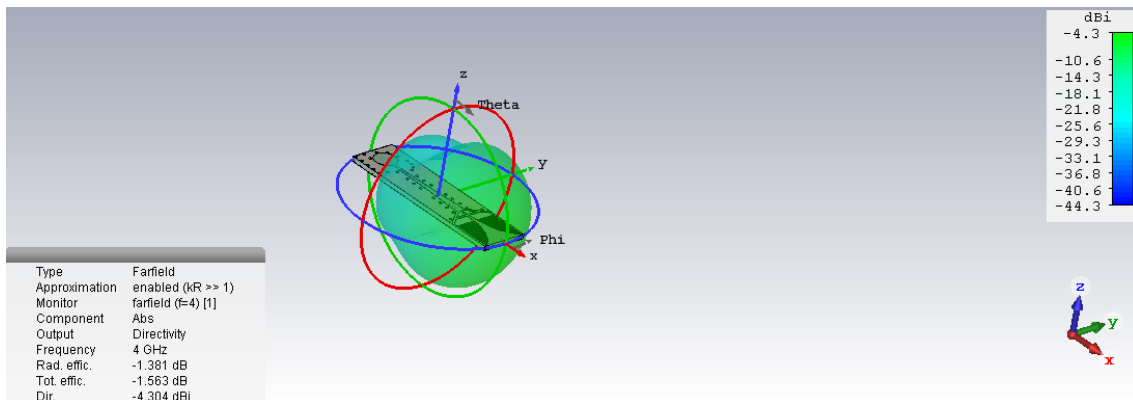
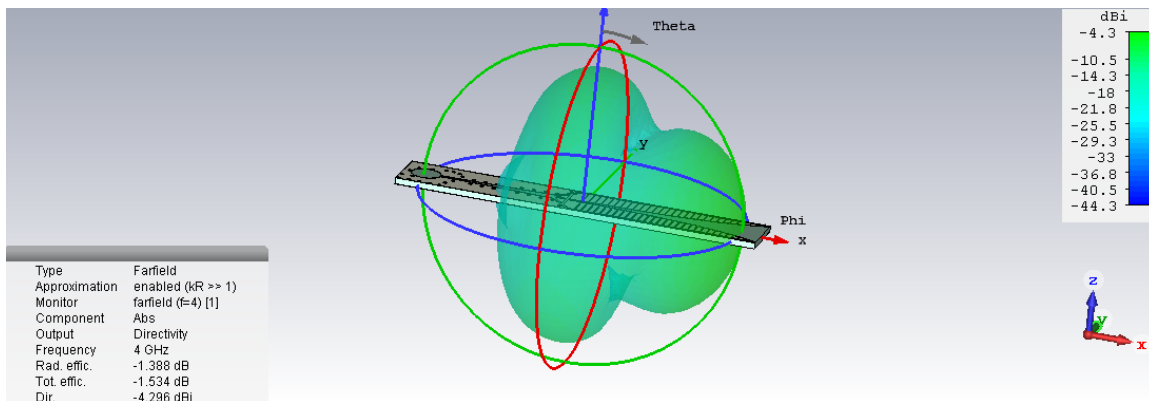


Рисунок 3.3 — Діаграми направленості в полярній системі координат при частоті 12 ГГц для довжини антени: а) 35 мм б) 62 мм в) 100 мм.

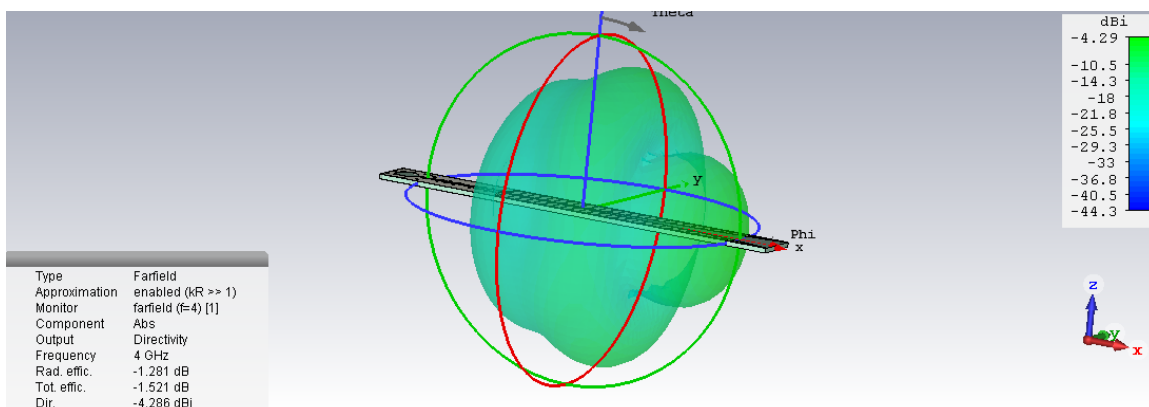
В свою чергу на рис.3.4 (а, б, в) представлені діаграми спрямованості у вигляді 3D при $f=4$ GHz.



а)



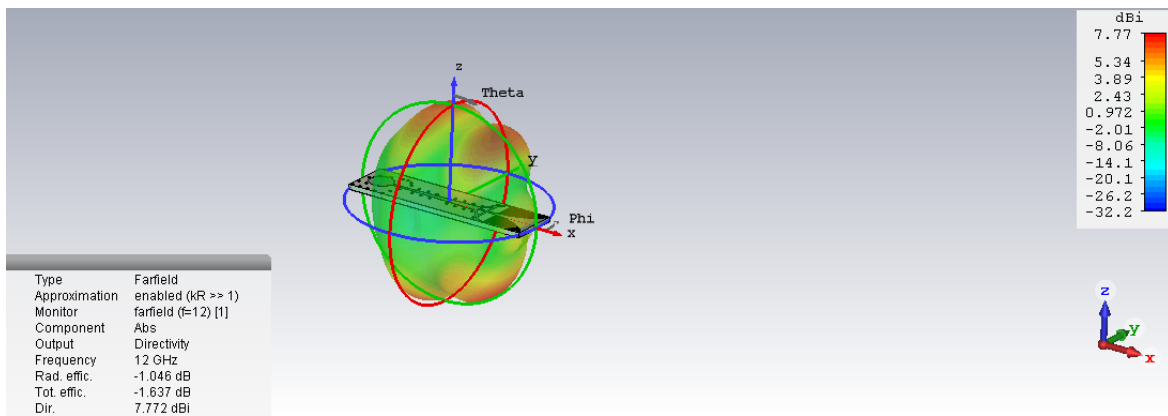
б)



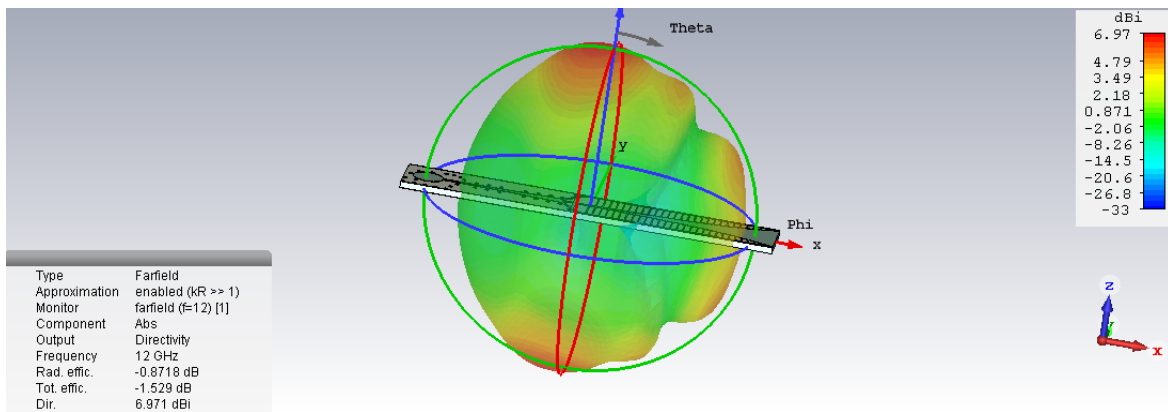
в)

Рисунок 3.4 — Діаграми направленості у вигляді 3D при частоті 4 ГГц для довжин антени: а) 35 мм б) 62 мм в) 100 мм.

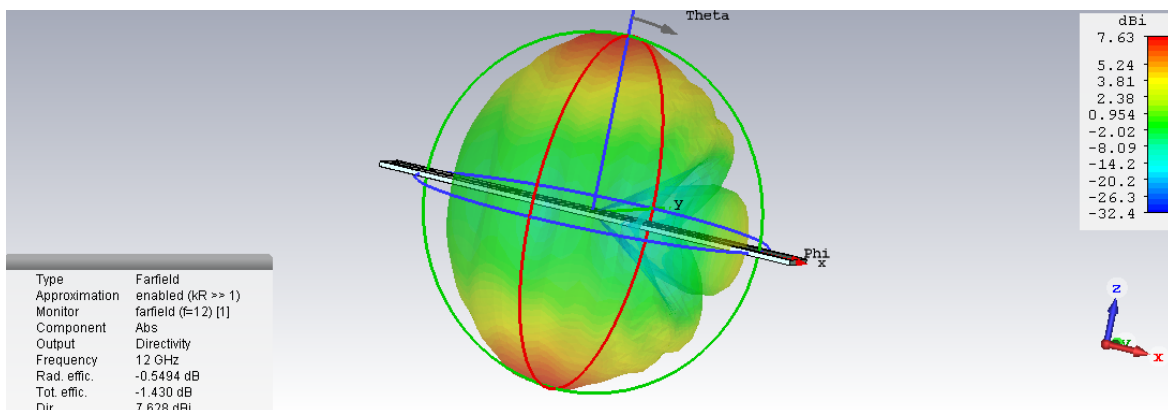
На рис.3.5 (а, б, в) представлені діаграми спрямованості у вигляді 3D при $f=12$ GHz.



а)



б)



в)

Рисунок 3.5 — Діаграми направленості у вигляді 3D при частоті 12 ГГц для довжини антени: а) 35 мм б) 62 мм в) 100 мм.

Дивлячись на ці графіки, можна сказати, що при збільшенні довжини антени – змінилась область випромінювання. При зменшенні довжини антени до 35 мм — діаграма має не явно виражений вигляд та характер. Також узгодження при цьому значно погіршилось.

3.2 Порівняння характеристик антен з різною висотою елемента

Наступний критерій, на який можна звернути увагу — висота елемента. Якщо при заданих нами параметрах, на виробництві буде допущена помилка з реалізованою висотою антени — ми будемо знати заздалегідь які характеристики значно зміняться та чи буде цей елемент і надалі виконувати задані умови. В даному випадку порівнювалась висота елемента с похибкою $\pm 10\%$.

На рис.3.6 продемонстровано порівняння результатів S-параметрів різної висоти елемента.

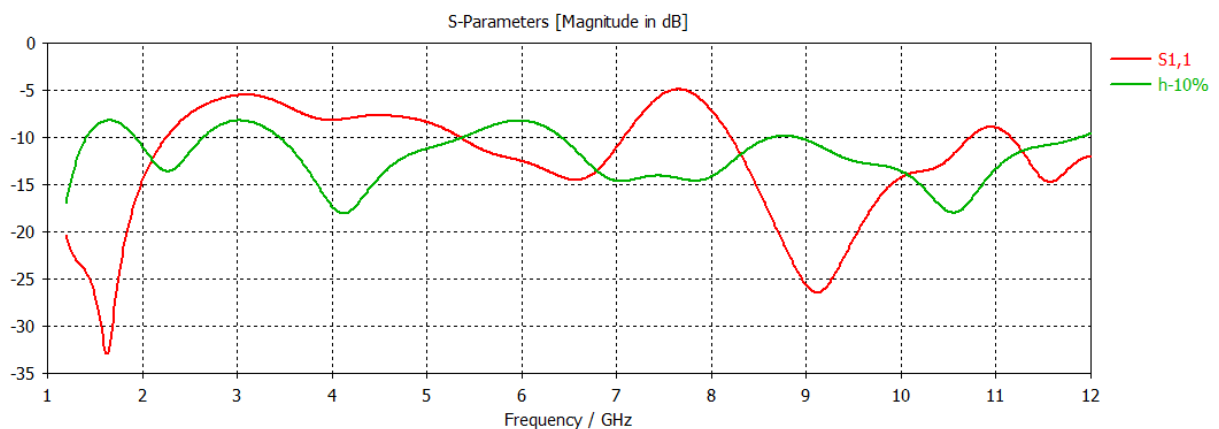


Рисунок 3.6 — S-параметри збільшеної (червоний) та зменшеної (зелений) висот.

З графіків можна спостерігати, що при збільшенні або зменшенні висоти елемента – його характеристики майже не змінюються.

Потрібно звернути увагу, що попри незначну різницю, в елемента з більшою висотою присутній пік графіку, який сягає -5 дБ при 3 ГГц та при

7.5 ГГц. Однак у цього ж елемента і найгірший показник при 1.6 ГГц та при 9 ГГц. Можна зробити висновок, що елемент з меншою висотою більш стабільний.

Наступний крок – порівняння КСХН при різній висоті елемента. Для цього випадку було проведено вимірювання та аналіз. На рис.3.7 продемонстровано порівняння КСХН при «h+10%» та «VSWR1» (h-10%).

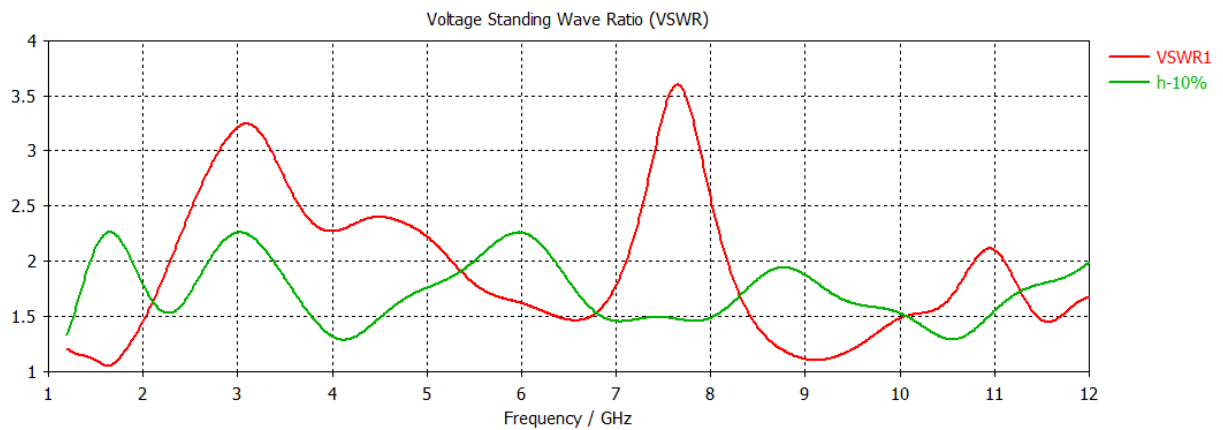
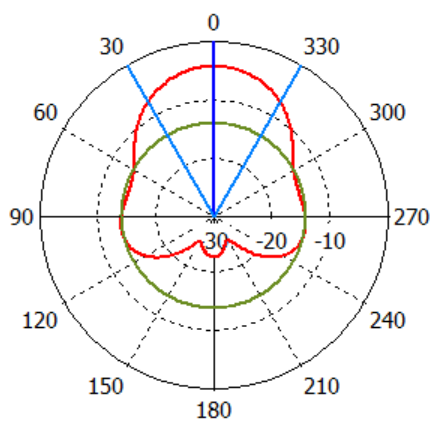


Рисунок 3.7 — Порівняння КСХН при різній висоті елемента

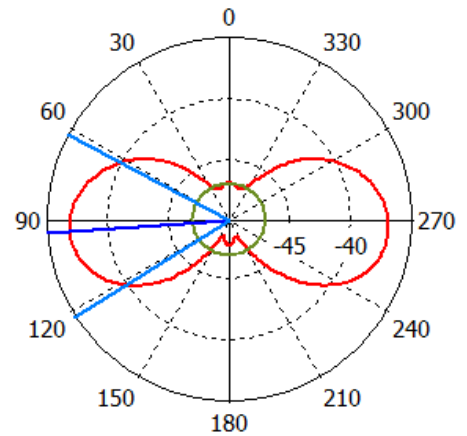
З графіків можна зробити висновок, що “h+10%” має дещо гірші властивості. Пік його характеристики при 7.5 ГГц та сягає 3.5.

При малих частотах – елемент зі збільшеною висотою має кращі результати. Загалом, ці графіки мають нерівномірний характер та при різній частоті кожен з них має кращий або гірший показник.

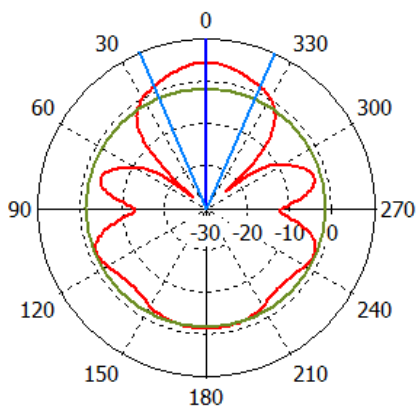
Наступний критерій порівняння — діаграма направленості елемента в полярній системі координат. Порівняння відбувалось для різних висот (рис.3.8 а, б) та частот (рис.3.8 в, г) антени.



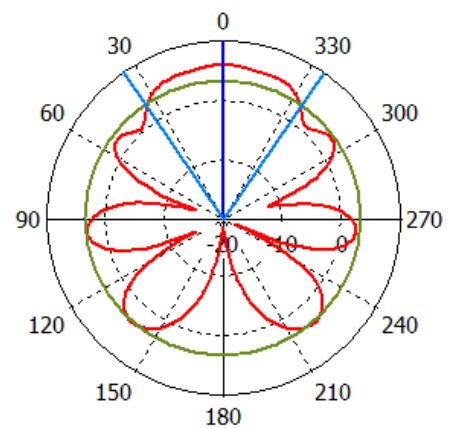
а)



б)



в)

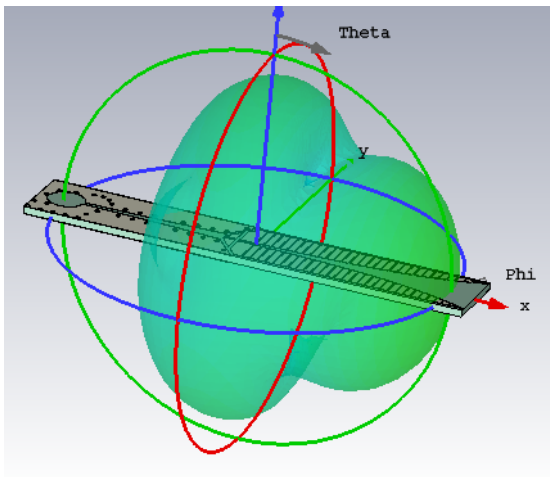


г)

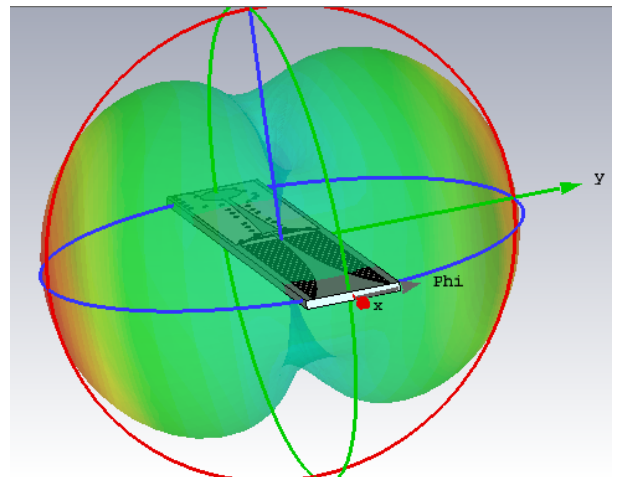
Рисунок 3.8 — Порівняння діаграм направленості в полярній системі координат при: а) висоті $h-10\%$ та $f=4$ ГГц; б) висоті $h+10\%$ та $f=4$ ГГц; в) висоті $h-10\%$ та $f=12$ ГГц; г) висоті $h+10\%$ та $f=12$ ГГц.

Проаналізувавши ці ДН, можна зробити висновок, що при зменшеній висоті і частоті елемента — його характеристики кращі. Зі збільшенням висоти елемента та при сталій частоті — ДН змінює свою форму та кут випромінювання.

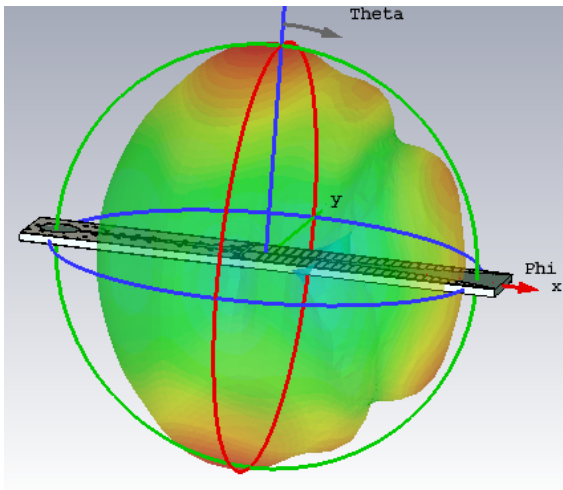
Ці ж характеристики можна побачити більш наглядно, за допомогою 3D демонстрації (рис.3.9 а, б, в, г).



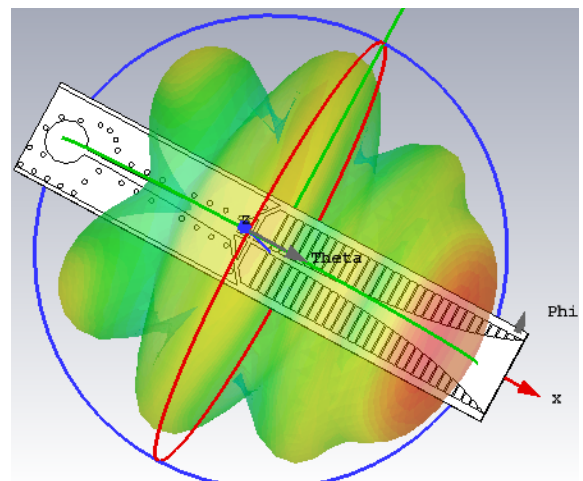
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.9 — Порівняння діаграм направленості в 3D при: а) висоті $h-10\%$ та $f=4$ ГГц; б) висоті $h+10\%$ та $f=4$ ГГц; в) висоті $h-10\%$ та $f=12$ ГГц; г) висоті $h+10\%$ та $f=12$ ГГц.

Висновки

Дані результати були отримані в програмі CST Microwave Studio. Проаналізувавши графіки можна сказати, що при зміні довжини та висоти елемента антени результати матимуть значну різницю.

Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Збільшення довжин — позитивно впливає на характеристики антени. Узгодження та діаграма має кращий результат. В той час як зі збільшенням висоти — рівень КСХН збільшується і відповідно характеристики погіршуються.

Також слід звернути увагу, що зі збільшенням довжини та висоти — виникає негативний чинник, а саме масогабаритні характеристики, які можуть стати завадою в деяких випадках.

					РС-261.758744.001 -1	Арк.
						63
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

В цьому дипломному проекті відбувається побудова та реалізація ультраширококутної фазованої антенної решітки на основі модифікованої антени Вівальді. Основною задачею під час роботи — є конструювання за допомогою персонального комп'ютера. Тому необхідно проаналізувати охорону праці при роботі з комп'ютером.

При написанні цієї роботи, крім основних факторів, також треба звернути увагу на протипожежні норми та опалення, вентиляцію та кондиціонування приміщення.

4.1 Оцінка головних шкідливих та небезпечних чинників при користуванні ПК

При використуванні персонального комп'ютера на людину діє електромагнітне випромінювання, яке може призводити до подразнення зорової та нервової системи. Ці фактори повинні відповідати вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин». [22]

При використанні ПК можуть бути такі негативні чинники:

- Вадмірна освітленість монітору;
- Випромінювання різних видів;
- Недостатня освітленість, що призводить до погіршення зору;
- Одноманітне положення при роботі, що спричиняє деформацію та біль хребта;
- Хімічні реакції, які можуть виникнути внаслідок загоряння пластику.

					PC-261.758744.001 -1	Арк.
						64
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4.2 Технічні вимоги з приводу безпеки та охорони здоров'я

Вимоги щодо робочого місця та використанні персонального комп'ютера вказують ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин». №382/3675, 1998р. [23]

Якщо дотримуватися даних правил можна значно зменшити непередбачувані негативні фактори на організм, які можуть виявитися при використанні ПК.

Будова робочого місця, його габарити та місце кожного електронного елемента має бути згідно з антропометричним, фізіологічним характеристиками людини.

Екран повинен бути встановлений в оптимальне для людини місце, щоб не погіршувати зір користувача. Відстань від людини до екрану має бути приблизно 650 мм. На зорову область людини не повинно діяти пряме сонячне світло, яке може мати відблиски від екрану та перешкоджати нормальній роботі користувача. Робочі місця біля вікон мають бути на відстані не менше 1.5 м. Робочі місця відносно інших повинні встановлюватися на відстані не менше 1 м.

Для того щоб уникнути негативних подразників, слід використовувати таку мишку, яка би підходила для індивідуальної фізіології кожного користувача, а саме для його кисті.

Інший електронний елемент, а саме клавіатура, має бути на робочому місці на відстані приблизно 200 мм від краю. Кут підйому клавіатури має бути приблизно 10° (якщо це перебачено конструкцією). Також бажано мати підставку для зап'ястків, що зменшує втому в цій частині організму.

Для того щоб не було неприємних випадків зі спиною, слід використовувати м'яке сидіння та високу спинку, бажано зі здатністю

					<i>РС-з61.758744.001 -1</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

пропускати свіже повітря та з підголівником, для меншої втоми шиї. Крісло повинно підніматися та повертатися для забезпечення комфортної посадки людини. Регулювання окремих систем в кріслі має функціонувати згідно з нормами.

Робочий стіл має бути в межах від 650 до 800 мм за висотою, а його інші параметри – давати змогу користувачеві вільну безперешкодну роботу та зміну положення тіла.

4.3 Освітлення робочих місць користувачів.

Основні положення до освітлення робочих місць при роботі з комп'ютером.

- Рівновелике розповсюдження світла по всьому робочому місці;
- Ідентичний колір та яскравість екрану;
- Коефіцієнт відбиття робочого місця повинно бути від 0.2 до 0.7.

При поганій освітленості приміщення, відсоток помилкових дій та небезпечних рухів збільшується. Збільшення освітлення робочої поверхні призводить до кращого розпізнавання об'єктів та зростання робочої ефективності.

Для збільшення продуктивності треба базуватися нормами ДБН В. 2. 5–28–2018 «Природне і штучне освітлення». Цими нормами також користуються для штучного світла. [24]

Для зменшення блискавості слід обрати правильне розташування ламп і робочої зони, врахувати коефіцієнти відбивання різних елементів.

Коефіцієнти відбиття для різних матеріалів для:

- стель (0.7...0.9);
- стін (0.5...0.8);
- робочих поверхонь (0.2...0.7);
- підлоги (0.2...0.4).

					<i>РС-з61.758744.001 -1</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Також потрібно враховувати колір приміщення. Якщо в робочому приміщенні використовувалась світла фарба – рівень освітленості зростає приблизно на 30%. Якщо в приміщенні є зони і предмети з різними рівнями освітленості — це призводить до швидкої втоми зору людини. І через це, поверхням які знаходяться на найвидніших зонах — слід надавати більш

темні відтінки, коефіцієнт яких від 0.3 до 0.6.

Освітленість робочого місця має дорівнювати не менше 10% нормованої. Крім цього, освітленість має бути більш ніж 200 лк з розрядними лампами, більше ніж 75 лк — з лампами розжарювання. Найкращі для приміщення є люмінесцентні лампи (40 Вт).

4.4 Мікроклімат робочої зони

Загальні вимоги мікроклімату визначаються для постійних робочих місць. Температура повітря в робочому приміщенні протягом робочої зміни не мають перевищувати нормовані величини температури приміщення з ПК та їх користувачами.

При неправильному виборі мікроклімату співробітники можуть скаржитися на здоров'я. Також при надмірній температурі повітря користувач ПК може відчувати втому та не зосередженість за робочим місцем. Це може призвести до втрати ефективної працездатності.

За ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» - К.: МОЗ, мікрокліматичні умови приміщень мають наступні показники:

- інтенсивність випромінювання (теплого або як ще називають - інфрачервоного);
- відносна вологість повітря;
- температура поверхні та повітря

					<i>РС-з61.758744.001 -1</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Також, за цими нормами встановлюється приблизне значення мікроклімату дивлячись яка пора року та категорія робіт. [25]

Розділяють декілька категорій роботи. В нашому випадку використовують категорії 1а та 1б, які визначають роботу сидячи та без фізичної праці. В категорії 1а витрачається 140 Вт енергії, тому що це майже повністю сидяча робота. До категорії 1б відносять переважно сидячу роботу але з деяким фізичним навантаженням, наприклад ходіння. При цій категорії витрачається трохи більше енергії, а саме — від 140 Вт до 175 Вт.

При холодній порі року та категорії робіт 1а температура повітря повинна досягати не вище 24 градусів за Цельсієм, швидкість руху при цьому 0.1 м/с. При категорії роботи 1б, максимально допустима температура повітря — 21 градус за Цельсієм.

При теплій порі року категорія 1а має норму температури повітря 23–25 градусів та швидкість повітря 0.1 м/с, а категорія 1б в цей час має норму температури 22–24 градусів за Цельсієм та швидкість руху повітря 0.2 м/с.

Для того, щоб підтримувалась температура повітря в приміщенні – встановлюють кондиціонер, який підтримує свіжість повітря та дає змогу уникнути задушливості. Також є батареї, які в холодну пору року можуть підтримувати тепло в приміщенні.

4.5 Виробничий шум

Шумові ознаки на робочих місцях визначаються ДСН 3.3.6.037-99. “Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку”.- К.: МОЗ України, 2000. [26]

В приміщенні всі шуми можуть бути викликані від електронних приладів, людей та інших механічних впливів за межами кімнати.

Для забезпечення оптимального робочого шуму слід використати норми ДСН 3.3.6.037-99, а також вимкнути зайві прилади та вдосконалити кімнату

					<i>РС-з61.758744.001 -1</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

за допомогою звукоізоляційного матеріалу. Рівень шуму повинен бути не більше ніж 55 дБ. [27]

4.6 Пожежна безпека

Згідно з НАПБ А.01.001-2014. “Правила пожежної безпеки в Україні” в кожному приміщенні повинен бути документ, який включає в себе основні положення щодо протипожежної безпеки, такі як:

- положення щодо забезпечення місць для куріння;
- положення користування приладами;
- положення щодо руху людей та транспортних засобів;
- положення відключення електронних пристроїв від живлення

Електричні прилади можуть використовуватися в зонах пожежної небезпеки, тільки якщо вони мають достатній відповідний захист. Проводи та кабелі повинні бути ізольовані аби не було короткого замикання або невдалого випадку. [28]

Згідно з ДСТУ 3675-98 приміщення об’єктів різного призначення мають бути укомплектовані сертифікованими вогнегасниками (переносними або пересувними). [29] Вони повинні розміщуватися відповідно до ГОСТ 12.04.009-83. [30]

Висновки

Згідно з вищенаписаним, можна зробити висновок, що при дотриманні цих положень та умов — робота та її результат значно покращаться, збільшиться продуктивність та зменшиться негативний вплив на здоров’я людей.

					<i>РС-з61.758744.001 -1</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		69

Висновок

У дипломному проекті описано фундаментальні теми та положення, які пов'язані з реалізацією ультраширококутної фазованої антенної решітки.

У роботі над дипломним проектом була реалізована модель ультраширококутної фазованої антенної решітки на основі модифікованої антени Вівальді. Конструювання проводилося в програмі CST Microwave Studio.

Розрахунки показали, що при збільшенні довжини елемента антенної решітки — її властивості покращуються, проте погіршуються масогабаритні характеристики. При зменшенні довжини та збільшенні висоти — властивості антени погіршуються.

Як ми зауважили раніше, головним мінусом решітки SNA є її габарити, однак маємо кращі крос-поляризаційні властивості. Серед плюсів слід зазначити змогу сканувати від -60° до 60° .

Під час виконання дипломного проекту — закріпив знання, щодо антенних решіток та навчився працювати в програмі CST Microwave Studio.

					PC-261.758744.001 -1	Арк.
						70
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Список літератури

1. Сазонов Д.М. Устройства СВЧ / Д.М. Сазонов, М: Высш. школа, 1981, 432 ст.
2. Воскресенський Д.І. Проектування фазованих антенних решіток / Д.І. Воскресенський, Москва: Радіотехніка, 2003, 144 с.
3. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Уч. пособие для вузов /Под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радіотехніка, 2003. – 632с.
4. Гостюхин В.Л. Активные фазированные антенные решетки / В.Л. Гостюхин, М: Радіотехніка, 2011, 304 ст.
5. Бова Н.Т. Антенны и устройства СВЧ / Н.Т. Бова, М.: Высшая школа, 1982, 280 ст.
6. Сверхширокополосные антенны. /Под ред. Л.С. Бененсона. - М.: Мир, 1964, с. 6, 250
7. Григорьев Л.Н. Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках / Л.Н. Григорьев, М: Радіотехніка, 2010, 142 ст.
8. Григоров И.Н. Все об антеннах / И.Н. Григоров, М.: ДМК Пресс, 2009, 350 ст.
9. Ільницький Л.Я., Савченко О.Я., Сібрук Л. В. Антени та пристрої надвисоких частот. - К.: Укртелеком, 2003. - 496 с.
10. Марков Г.Т., Сазанов Д.М., Антенны. - М.: Энергия, 1975. - 528 с.
11. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терёшин О.Н. Антенны УКВ.4.2. - М.:Связь, 1977.-288 с.
12. Ільницький Л.Я., Савченко О.Я., Сібрук Л. В. Антени та пристрої надвисоких частот. - К.: Укртелеком, 2003. - 496 с.

					РС-з61.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

13. Белоцерковский Г.Б. Основы радиотехники и антенны / Г.Б. Белоцерковский, М.: Советское радио, 1969, 328

14. Журнал "Теле-Спутник" 6 (32) червня 1998 стор. 68.

15. Матеріали XV міжнародного молодіжного форуму "Радіоелектроніка та молодь XXI" – Харків – 2011 – с. 18 – 19.

16. Planar Ultra Wideband Monopole Antenna with Tri-Notch Band Characteristics / S. K. Venkata, M. Rana, P. S. Bakariya, S. Dwari, M. Sarkar // Progress in Electro.

17. A Compact CPW-Fed Antenna with Dual Band- Notched Characteristics for UWB Applications / X. Wang, L. Wang, H. Zhou, W. Lu / Microw. Opt. Technol. Lett. 2014. Vol. 56. P. 1047-104.

18. Чернышев, С.Л. Разработка и исследование модифицированной антенны Вивальди в составе плоской широкополосной антенной решетки X-диапазона / Чернышев С.Л., Виленский А.Р., Сю С., Люй С., Лю Ю // Наука и образование (электронный журнал), 2011. - № 11.

19. D. H. Schaubert, S. Kasturi, A. O. Boryssenko, and W. M. Elsallal, "Vivaldi antenna arrays for wide bandwidth and electronic scanning," in *The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Nov. 2007, pp. 1–6.

20. P. J. Gibson, "The Vivaldi aerial," in *Proc. 9th Eur. Microw. Conf.*, Sept. 1979, pp. 101–105.

21. R. Kindt and D. Taylor, "Polarization correction in dual- polarized phased arrays of flared notches," in *Proc. IEEE Int. Symp. Antennas Propag. Soc.*, July 2011, pp. 1961– 1964.

					PC-261.758744.001 -1	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

22. ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

23. ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин». №382/3675, 1998р.

24. ДБН В. 2. 5–28–2018 «Природне і штучне освітлення».

25. ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» - К.: МОЗ.

26. ДСН 3.3.6.037-99. “Державні санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку”.-К.: МОЗ України, 2000.

27. ДСН 3.3.6.037-99. “Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку”

28. НАПБ А.01.001-2014. “Правила пожежної безпеки в Україні”.

29. ДСТУ 3675-98. «Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань»

30. ГОСТ 12.04.009-83. «Система стандартів безпеки труда (ССБТ). Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды.»

					<i>РС-з61.758744.001 -1</i>	Арк.
Зм..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73