

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ МОНІТОРИНГУ
ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ Шутко В.М.
« ____ » _____ 2021 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВРА
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 171 «ЕЛЕКТРОНІКА»
ОПП «ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ»

Тема: « Порівняльний аналіз властивостей класичних та інвертованих спіральних конусних антен »

Виконавець
студент групи ЕС-404Б _____ Тсієнза Сміт Стівен

Керівник
д.т.н., професор _____ Іванов Володимир Олександрович

Нормоконтролер _____ Сініцин Р.Б.

КИЇВ 2021

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки і телекомунікацій

Кафедра електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей

Напрямок (спеціальність) 171 «Електроніка»
(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Шутко В. М.

« _____ » _____ 2021р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломної роботи

Тсієнза Сміт Стівен

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема дипломної роботи: «Порівняльний аналіз властивостей класичних та інвертованих спіральних конусних антен» затверджена наказом ректора від «01» квітня 2021р. № 526/ст.
2. Термін виконання роботи : з «01» квітня 2021р. по «14» червня 2021р.
3. Вихідні дані до роботи: синтез спіральної антени з напівсферичною діаграмою спрямованості.
4. Зміст пояснювальної записки: віртуальна спіральних антен антена: частота випромінювання - 5 ГГц, ширина діаграми спрямованості – 180 градусів.
5. Перелік обов'язкового ілюстративного матеріалу: схематичне зображення будови спіральної антени, види спіралей та відповідні їм діаграми спрямованості; зображення діаграм спрямованості спіральних антен в полярній системі координат та 3D-виді.

6. Календарний план-графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1	Написання заяви на написання кваліфікаційної роботи	15.03.2021	
2	Ознайомлення та обґрунтування актуальності обраної теми	16.03.2021-01.04.2021	
3	Ознайомлення з загальними положеннями про дипломне проектування та оформлення	06.05.2021-07.05.2021	
4	Формулювання мети і завдання кваліфікаційної роботи	08.05.2021-09.05.2021	
5	Вступ та визначення структури дипломної роботи. Побудова змісту. Огляд літератури та пошук інформації.	10.05.2021	
6	Огляд параметрів, характеристик та будови спіральних антен.	11.05.2021-19.05.2021	
7	Моделювання спіральних антен з кулеподібною діаграмою спрямованості в програмному середовищі FEKO	20.05.2021-06.06.2021	
8	Оформлення роботи. Подання на кафедрі.	07.06.2021	

6. Консультація з окремого(мих) розділу(ів):

Назва розділу	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Теоретичний опис способу	д.т.н., професор, Іванов В.О.	15.05.2021	15.05.2021

7. Дата видачі завдання: « 01 » квітня 2021р.

Керівник дипломної роботи (проекту) _____ Іванов В.О.
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____ Тсієнза С. С.
(підпис випускника) (П.І.Б.)

ЗМІСТ

ВСТУП	2
РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СПІРАЛЬНИХ АНТЕН.....	5
1.1. Види спіральних антен (Частотні діапазони та галузі застосування).....	5
1.2. Конструктивні особливості , типи хвиль, режими роботи	14
1.3. Види металевих екранів та їх призначення	18
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄМНІ КОНІЧНІ СПІРАЛЬНІ АНТЕНИ.....	
22 2.1. Конічні антени, що звужуються «уверх»	
22	
2.2. Конічні антени, що розширюються «уверх»	24
2.3. Порівнювальний аналіз властивостей.....	26
РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ДІАГРАМ СПРЯМОВАНOSTІ СПІРАЛЬНИХ АНТЕН В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ FEKO.....	
27	
3.1. Циліндрична антена	27
3.2. Конічна антена, що звужується «уверх» (класична)	44
3.3. Конічна антена, що розширюються «уверх» (інвертована).....	44
3.4. Порівняльний аналіз отриманих результатів	46
ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ	47
ВИСНОВКИ	48

ВСТУП

Актуальність теми. Антени знаходять широке застосування в системах зв'язку, починаючи від стільникового телефону, телебачення, радіо, радіолокатора та багатьох інших програм. Антена призначена для запуску електромагнітного сигналу з бажаними характеристиками; це може бути напрямок випромінювання, площа покриття, сила випромінювання, ширина променя, рівні бічних пелюсток тощо. Будь-яка металева конструкція, що несе змінний в часі електричний струм, випромінюватиме електромагнітні хвилі, як це диктується добре встановленими рівняннями Максвелла. Однак антени цілеспрямовано розроблені для випромінювання з певними заданими характеристиками. Дизайнери антен завжди шукають шляхи вдосконалення існуючих конструкцій або впровадження нових конструкцій, щоб досягти бажаних радіаційних характеристик, зменшити розмір і вагу, а отже, зробити антени більш економічними. Осьове співвідношення, коефіцієнт підсилення та пропускна здатність є одними з важливих властивостей, на яких вони зосереджуються на поліпшенні. Будова та розмір антени - ще одне питання, що представляє значний інтерес. Менші розміри та вага можуть бути обов'язковою вимогою до антен, що використовуються в космічних апаратах, літаках та супутникових системах зв'язку.

У цій дисертації увага зосереджена на спіральних антен, які знаходять важливе застосування в системах зв'язку, насамперед через їх кругову поляризацію та широку смугу пропускання. Спіральна антена, вперше представлена Краусом у 1946 році, була предметом великих досліджень протягом останніх п'яти десятиліть.

Мета і завдання дослідження. У цій роботі, я збираюся досліджувати класичних та інвертованих спіральних конусних антен для вивчення основних електромагнітних шляхом математичного моделювання.

Метод дослідження. Всі теоретичні дослідження проводяться за допомогою програмного забезпечення система автоматизованого проектування антенних пристроїв (САПР) ФЕКО. Середою автоматизованого проектування Altair ФЕКО надає широкі можливості для електродинамічного моделювання різних систем і пристроїв. Відмінною рисою даного програмного забезпечення є потужне ядро тривимірного параметричного моделювання (solid modeling або modelling), що дозволяє ефективно створювати топології різної складності, реалізоване в простому і функціональному інтерфейсі.

Обчислювальний ядро ФЕКО забезпечує електродинамічний аналіз моделей усіма поширеними чисельними методами: метод моментів (method of moments - MoM), метод кінцевих елементів (finite elements method - FEM), метод кінцевих різниць по тимчасовій області (finite difference time domain method - FDTD), багаторівневий метод швидких мультиполів (multilevel fast multipole method - MLFMM), метод геометричної оптики (geometry optics method - GO), метод фізичної оптики (physical optics method - PO), метод узагальненої теорії дифракції (uniform theory of diffraction method - UTD). В рамках однієї моделі обчислювальний ядро САПР дозволяє застосовувати гібридні методи розрахунку, такі як FEM / MoM + GO / PO, з налаштованими умовами зшивання рішень. Відмінною особливістю реалізованого в ФЕКО решателя методом моментів є можливість створення об'ємної сітки за принципом еквівалентності VEP (volume equivalence principle), що дозволяє аналізувати діелектричні структури більш ефективно як з точки зору швидкості розрахунків, так і з позиції витраченого часу і обчислювальних ресурсів. Це пояснюється тим, що метод моментів в САПР реалізований в зв'язці з методом швидких мультиполів.

Архітектура програмного забезпечення ФЕКО багатомодульна. Це означає, що основні стадії моделювання - предпроцесінг і простпроцесінг - виконуються незалежними програмними модулями CADFEKO і POSTFEKO відповідно. Більш того, в комплекс ФЕКО входить цілий ряд інших модулів, що

забезпечує специфічний функціонал. Подібна організація дозволяє ефективно проводити розподілене моделювання в рамках програмних продуктів Altair (обмін даними за стандартизованим протоколом STEP, реалізований в FEKO, дозволяє також розподіляти завдання функціонального циклу і між системами автоматизованого проектування інших компаній). FEKO є тільки одним з САПР, підтримуваних Altair.

Об'єкт дослідження – діаграма спрямованості спіральної співвісної антени.

Предмет дослідження – вибір найоптимальніших характеристик висоти кожної антени у загальній конструкції, діаметру дротів окремої спіралі, розміру загального дископодібного екрану.

РОЗДІЛ 1. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СПІРАЛЬНИХ АНТЕН

1.1. Види спіральних антен (Частотні діапазони та галузі застосування)

Спіральна антена належить до класу антен з хвилею, що біжить. Її основний діапазон роботи - дециметровий і сантиметровий. Вона відноситься до класу поверхневих антен. Головним її елементом є спіраль, підключена до коаксіальної лінії. Спіраль створює діаграму спрямованості у вигляді двох пелюсток, випромінюваних вздовж її осі в різні боки.

Спіральна антена являє собою згорнутий в спіраль провід (1), який харчується через коаксіальний фідер (2) (рис. 1.1.1, а). Внутрішній провід фідера з'єднується зі спіраллю, а зовнішня оболонка фідера - з металевим диском (3). Останній служить рефлектором, а також перешкоджає проникненню струмів з внутрішньої на зовнішню поверхню оболонки фідера. Спіраль може бути не тільки циліндричної, як на рис. 1, а, а й конічної (рис. 1.1.1, в) та ін.

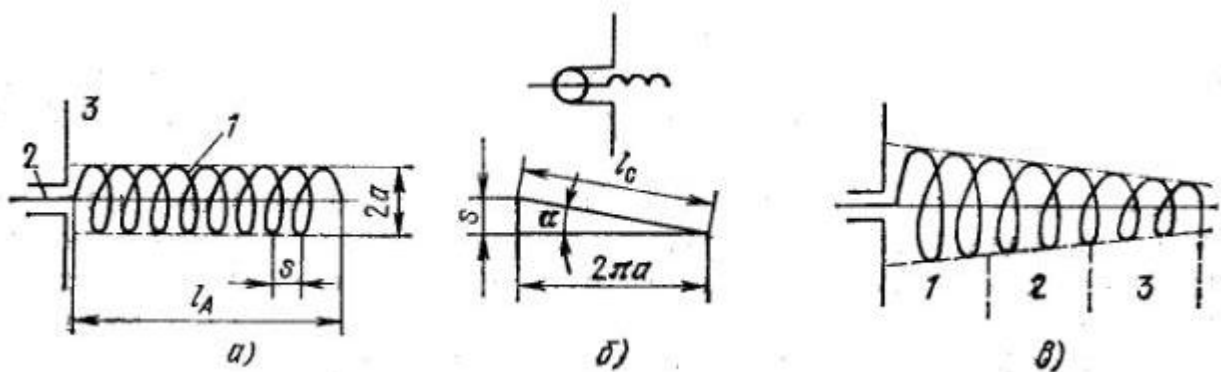


Рис.1. Спіральні антени:

а - циліндрична; б - розгорнутий виток; в - конічна.

Спіральні антени за особливостями конструктивного виконання можна розділити на групи:

- еліптичні;
- циліндричні;
- конічні;
- плоскі;
- виконані на конформній поверхні (наприклад - на півсфері);
- комбіновані структури;
- антени, виконані з провідника з постійним поперечним перерізом (дротова структура) або шириною (Полоскова структура);
- антени, виконані з провідника із змінним поперечним перерізом (дротова структура) або шириною (Полоскова структура).

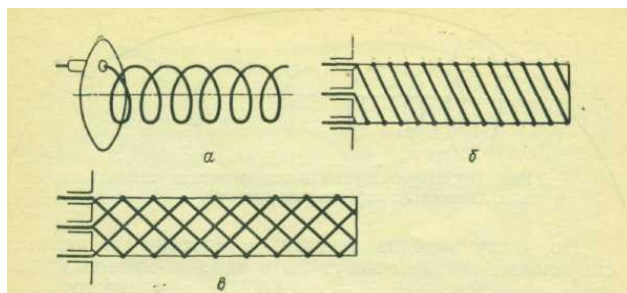


Рис. 1.1.1. Циліндричні регулярні спіральні антени:

а - однозахідна з одностороннім намотуванням;

б - многозахідна (чотирехзахідна) з одностороннім намотуванням;

в - многозахідна (чотирехзахідна) з двостороннім (зустрічній) намотуванням.

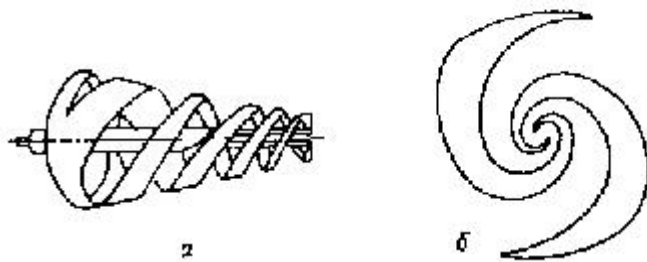


Рис. 1.1.2 Еквіугольні спіральні антени:

а - конічна;

б - плоска.

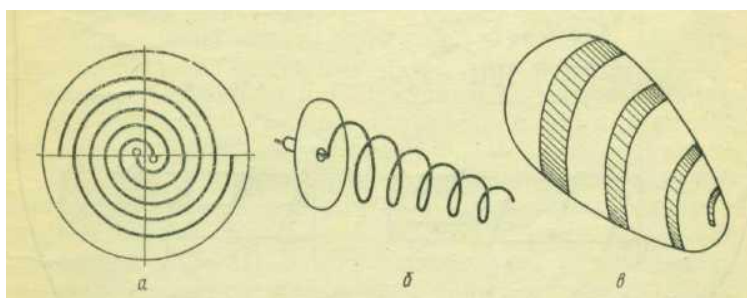


Рис. 1.1.3 Нерегулярні спіральні антени:

а - плоска з постійним кроком намотування (архимедова);

б - конічна з постійним кроком намотування;

в - на поверхні еліпсоїда обертання з постійним кутом намотування.

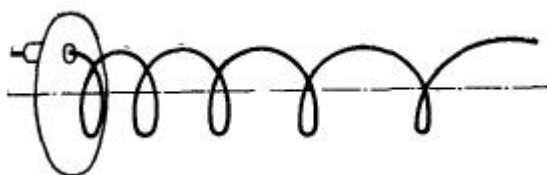


Рис. 1.1.4 Нерегулярне циліндрична спіральна антена (зі змінним кроком)

За кількістю заходів (гілок) і способу їх намотування спіральні антени можуть бути одно- і багатозахідні з односторонньою або двосторонньою (зустрічній) намотуванням.

Відсутність або наявність додаткового уповільнення фазової швидкості і спосіб його реалізації дозволяють розділити спіральні антени на наступні типи:

- з гладкого дроту в однорідному діелектрику (повітрі),
- з дроту, що володіє власним уповільненням (імпедансні спіральні антени),
- з дроту з власним уповільненням і з діелектриком (імпедансні спірально-діелектричні антени).

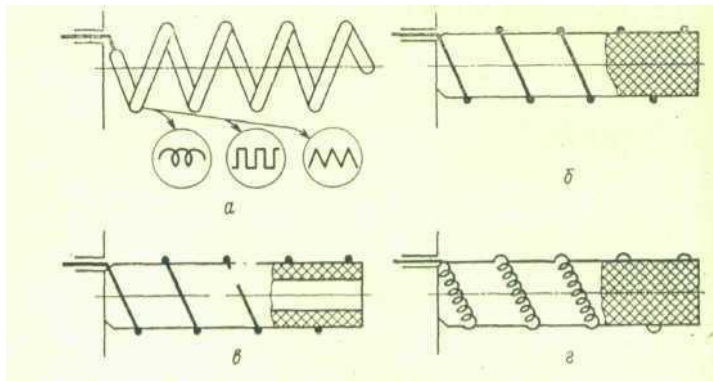


Рис. 1.1.5 Спіральні антени з додатковим уповільненням:

а - імпедансна;

б, в - спірально-діелектричні;

г - імпедансні спірально-діелектричні.

Одним з основних властивостей спіральних антен є їх здатність працювати в широкій смузі частот з коефіцієнтом перекриття від 1.5 до 10 і більше. Всі спіральні антени - це антени біжучої хвилі, але одна обставина саме по собі не зумовлює роботи спіральних антен в діапазоні частот з таким

коефіцієнтом перекриття.

Робота однозахідних регулярних циліндричних спіральних антен і їх модифікацій в діапазоні частот можлива завдяки їх дисперсійним властивостям, внаслідок яких в широкому діапазоні частот фазова швидкість поля уздовж осі спіралі близька до швидкості світла, відображення від вільного кінця спіралі мало, довжина хвилі в проводі спіралі приблизно дорівнює довжині витка.

У многозахідних циліндричних спіральних антенах робочий діапазон додатково розширюється внаслідок придушення в них найближчих нижчих і вищих типів хвиль, які деформують діаграму спрямованості основного типу.

Спіральні антени з односторонньою намоткою випромінюють поле з еліптичної, близькою до кругової, поляризацією. Напрямок обертання вектора поля відповідає напрямку намотування спіралі. Для отримання лінійної і керованої поляризації використовують спіральні антени з двостороннім (зустрічним) намотуванням.

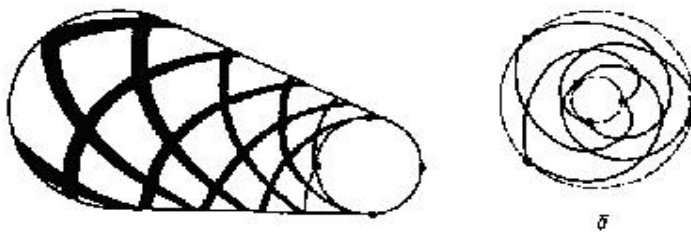


Рис.1.1.6. Еквіугольні спіральні антени з двосторонньою (зустрічною) намоткою: а - конічна чотирезахідна; б - плоска трьозахідна.

Форма частотно-незалежних (плоских і конічних еквіугольних) спіральних антен визначається тільки кутами. Кожній довжині хвилі в межах робочого діапазону відповідає випромінює ділянку незмінною форми і постійних електричних розмірів. Тому ширина діаграми спрямованості і вхідного опору наближено залишаються постійними в досить широких

діапазонах частот (10: 1 ... 20: 1).

Для отримання односпрямованого випромінювання з еліптичною поляризацією в менших діапазонах частот (2: 1 ... 4: 1) немає необхідності суворо витримувати форму антени відповідно до умови частотної незалежності. Якщо при переході від однієї довжини хвилі до іншої форма і електричні розміри випромінюючого елемента повторюються хоча б наближено, антена працює в діапазоні частот з меншою постійністю характеристик і параметрів. Слідуючи цьому, можна побудувати дуже широке, що не підкоряється точно принципу частотної незалежності сімейство антен у вигляді одно- або багатозахідних спіралей, навитих (за різними законами намотування) на різних поверхнях обертання. Іноді такі антени називають квазичастотно-незалежними.

Квазичастотно-незалежні спіральні антени для отримання керованої і лінійної поляризації також виконуються з двостороннім намотуванням. Для отримання керованої, лінійної і кругової поляризації можуть також застосовуватися різні (циліндричні, еквіугольні і ін.) Двозахідні спіральні антени.

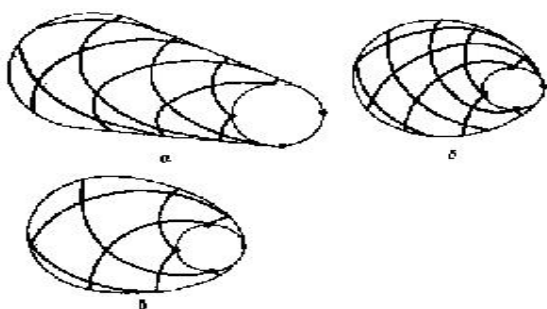


Рис. 1.1.7. Квазичастотно-незалежні спіральні антени з двостороннім (зустрічним) намотуванням і постійним кроком: а - конічна чотирезахідна; б - напівсферична чотирезахідна; в - еліпсоїдна чотирезахідна.

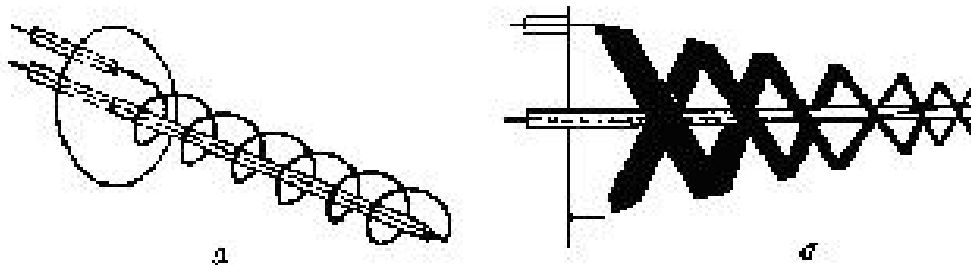


Рис. 1.1.8. Двозахідні спіральні антени:

а - циліндрична однозахідна; б - еквиугольна конічна двозахідна.

Спіральні антени дозволяють формувати односпрямовані діаграми спрямованості з шириною $2\theta_{0,5} \approx (25 \dots 180)^\circ$, тороїдальні з шириною $2\theta_{0,5} \approx (45 \dots 90)^\circ$ і Воронкова з шириною $2\theta_{0,5} \approx (40 \dots 60)^\circ$. Поляризація випромінювання може бути еліптичною, близькою до кругової, керованої, лінійної. У більшості випадків основними вимогами до спіральним антен є здатність працювати в широкому діапазоні частот з коефіцієнтом перекриття зазвичай від 1,5 до 10 і в окремих випадках більше, забезпечення еліптичності, близькою до кругової, або керованої поляризації, а не стабільність характеристик і параметрів. Тому часто допускаються вельми значні зміни характеристик і параметрів в діапазоні частот: зміни ширини діаграми спрямованості в півтора-два рази, збільшення коефіцієнта стоячої хвилі в окремих точках діапазону до 1,5 ... 2. Вимоги до рівня бічних пелюсток і стабільності напрямку головного максимуму також бувають не жорсткі. Дуже часто допускається рівень бічних пелюсток, що досягає 30% по полю, і зміна напрямку головного максимуму до 10% від $2\theta_{0,5}$.

Основним елементом всіх спіральних антен є дротяний або стрічковий виток довжиною, приблизно рівній λ (діаметр $\sim \lambda/\pi$), обтічний хвилею, що біжить струму. У переважній більшості випадків спіральні антени збуджуються коаксіальною лінією. Тому по частотному діапазону область їх застосування на довгих хвилях обмежена гранично допустимими габаритами, а на коротких -

досяжною точністю виготовлення і технологічністю конструкції, високочастотною межею робочого діапазону коаксіальних кабелів і можливістю конструктивної реалізації потрібної форми переходу від напруги коаксіального фідера до гілок спіральної структури.

Особливістю спіральних антен є те, що вони виготовляються з тонких провідників круглого перетину або тонких металевих стрічок. Концентрація поля на крайках провідних поверхонь виявляється значною, а зазори між сусідніми витками в тій частині антени, яка працює на високочастотному краю діапазону, невеликі. Середній периметр перетину коаксіального кабелю, що порушує спіральну антену, що працює на СВЧ, для виключення вищих типів хвиль повинен бути менше λ , тобто такі кабелі мають невисоку електричну міцність. Отже, в діапазоні СВЧ спіральні антени можуть працювати при малих і середніх рівнях потужності ($P \leq 100$ кВт).

Спіральна антена будь-якого типу (регулярна, еквіугольна, нерегулярна) може бути сконструйована для роботи в смузі частот з коефіцієнтом перекриття від 1,5 до 5 і більше. При цьому треба мати на увазі, що у конічних і плоских еквіугольних спіральних антен, частотно-незалежних в робочому діапазоні частот, верхня межа якого наближено визначається поперечними розмірами структури у вершині, а нижньо-поперечними розмірами структури біля основи, діаграми спрямованості і вхідний опір змінюються періодично як функція логарифма частоти, хоча і в невеликих межах.

Циліндричні, плоскі і конічні спіральні антени з постійним кроком, а також спіральні антени на поверхні різних тіл обертання (крім еквіугольних конічних) не є частотно-незалежними. Тому в робочому діапазоні частот їх діаграми спрямованості змінюються більш-менш монотонно. У циліндричних спіральних антен зі збільшенням частоти діаграма спрямованості звужується, а у плоских і конічних з постійним кроком - кілька розширюється. У квазічастотно-незалежних спіральних антен зміни характеристик і параметрів від частоти можуть бути різними в залежності від закону зміни кута

намотування по довжині антени і форми поверхні, на якій вона намотана.

З перерахованих типів антен більшу спрямованість мають циліндричні спіральні і звивисті антени ($2\theta_{0,5} \geq 30^\circ$, $\text{КНД} \leq 25$). Спрямованість частотно-незалежних і квазичастотно-незалежних антен менше ($2\theta_{0,5} \geq 50 \dots 80^\circ$; $\text{КНД} \approx 2 \dots 12$).

Різні типи спіральних антен відрізняються і за габаритами. Мінімальні поперечні габарити мають циліндричні спіральні антени, особливо імпедансні спірально-діелектричні ($2a < \lambda_{\text{ср}} / \pi$). Поздовжні електричні розміри таких антен визначаються необхідною спрямованістю. Мінімальні поздовжні габарити мають плоскі спіральні антени ($L \leq 0,25\lambda_{\text{макс}}$). Максимальні поперечні розміри цих антен становлять $2a \approx (0,35 \dots 0,6)\lambda_{\text{макс}}$.

Конічні еквиугольні спіральні антени, особливо багатозахідні з розширюючих стрічок, характеризуються найбільшою стабільністю характеристик у робочому діапазоні частот, але і при найбільших габаритах: найбільший поперечний розмір $2a \approx 0,4\lambda_{\text{макс}}$; поздовжній розмір в залежності від необхідного коефіцієнта перекриття діапазону і спрямованості лежить в межах $L \approx (1 \dots 4)\lambda_{\text{макс}}$.

1.2. Конструктивні особливості , типи хвиль, режими роботи

В діапазонах сантиметрових, дециметрових і метрових хвиль застосовують спіральні антени (рис. 1.2.1, *a*). Конструктивно такі антени мають вигляд спіралі, один кінець якої вільний, а другий приєднується до центрального провідника коаксіального кабелю. Зовнішня оболонка кабелю приєднується до диска, який служить противагою антени. Крім того, диск виконує функцію рефлектора, зменшуючи випромінювання в задній півпростір. Циліндрична спіральна антена характеризується довжиною витка L , діаметром витка $2a$, кроком обмотки спіралі S і числом витків n . Довжина антени $l = nS$.

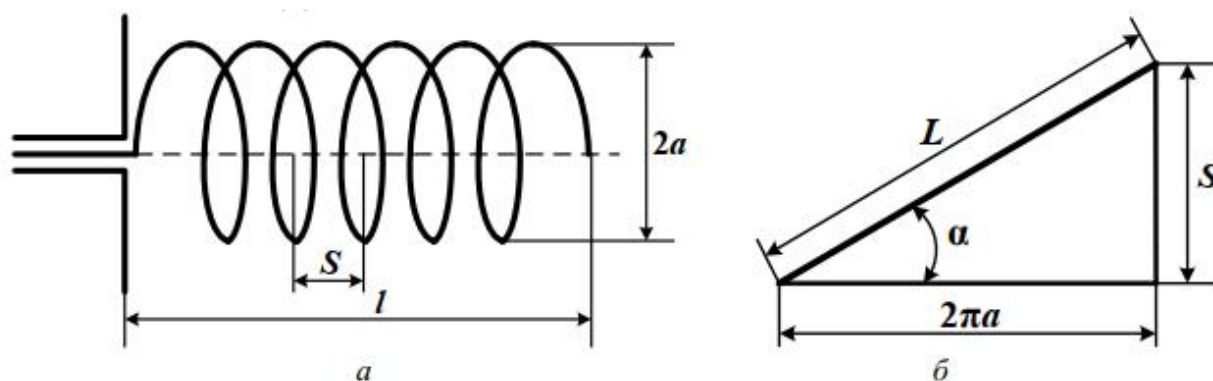


Рис.1.2.1. Креслення спіральної антени (*a*) і розгортка витка (*б*)

При збудженні антени в спіралі виникають хвилі різних типів. Хвилі в спіралі позначають символом T_q , де q – кількість довжин хвиль, які вміщуються на одному витку. Хвиля T_0 поширюється з фазовою швидкістю, що дорівнює швидкості світла c , і існує в спіралі з малою довжиною витка, яка задовольняє умову

$$\frac{L}{\lambda} < \frac{L}{\lambda \min}, \quad (1.2.1)$$

Де $\frac{L}{\lambda \sin \alpha} = \frac{\cos \alpha}{1 - \sin \alpha}$; α – кут піднесення спіралі.

$$\alpha = \arctg \frac{S}{2\pi a} .$$

Хвиля T_0 відбивається від кінця спіралі і поширюється в зворотному напрямі з тією ж фазовою швидкістю. Коли задовольняється умова (1.2.1), коефіцієнт згасання цієї хвилі малий і її амплітуда вздовж спіралі майже не змінюється, що викликає появу стоячих хвиль. При цьому характер випромінювання антени такий, як випромінювання несиметричного вібратора, або рамки (рис. 1.2.2, а).

Тому таку спіральну антену називають антеною з ненапрямленим випромінюванням.

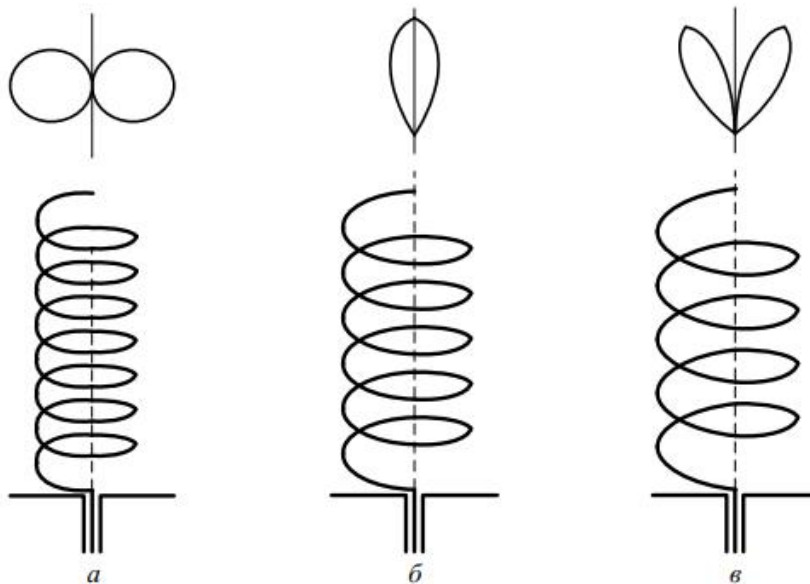


Рис. 1.2.2. Діаграми спрямованості спіральних антен в залежності від відношення L/λ

Поряд з хвилею T_0 поширюється хвиля T_1 , фазова швидкість якої менша швидкості світла і залежить від відношення L/λ . Відбита хвиля T_1 має дуже малу амплітуду, тому в спіралі встановлюється біжуча хвиля струму. Хвиля T_0 при цьому дуже швидко загасає і характер випромінювання має вигляд, зображений на рис. 1.2.2, б. Це режим осевого випромінювання. В цьому режимі $L/\lambda \approx 1$.

При зростанні частоти коливань ($L/\lambda > 1$) в спіралі виникають вищі типи хвиль T_2 , T_3 тощо. Такий режим живлення спіралі супроводжується конічним випромінюванням (рис. 1.2.2, в), який практично не використовується.

Найбільше значення має режим осьового випромінювання, який існує за умови, що

$$0,25\lambda \leq 2a \leq 0,45\lambda.$$

Спіральна антена в режимі осьового випромінювання може розглядатися як сукупність n витків, які розташовані на одній осі і по яким протікає біжуча хвиля струму. При збудженні кільцевої антени біжучою хвилею струму і виконанні умови $L/\lambda = 1$, електромагнітні хвилі найбільш інтенсивно випромінюються в напрямі осі.

Кільцеву антену можемо розглядати як систему двох кільцевих випромінювачів, збуджуваних стоячими хвилями $I_0 \cos \beta \zeta$ та $i I_0 \sin \beta \zeta$, де I_0 - амплітуда струму; β - коефіцієнт фази хвилі в кільці; ζ - відстань по кільцю, яка відраховується від осі z .

Характеристика спрямованості кільця, яке обтікається біжучою хвилею струму і має відносну довжину $L/\lambda = 1$, визначається як: $F_{\theta}^k(\theta) = 2ctg\theta J_1(\sin[\theta])$

$$F_{\varphi}^k(\theta) = J_0(\sin[\theta]) - J_2(\sin[\theta])$$

$J_0(u), J_1(u), J_2(u)$ - функції Бесселя нульового, першого та другого порядків.

ХС спіральної антени можна згідно з теоремою перемноження отримати у вигляді добутків

$$f_{\theta}(\theta) = F_{\theta}^k(\theta) f_c(\theta); \quad f_{\varphi}(\theta) = F_{\varphi}^k(\theta) f_c(\theta);$$

Де $f_c(\theta)$ - множник системи.

Спіральну антену можна розглядати як антенну решітку осьового випромінювання, елементами якої є витки спіралі.

Фазовий зсув ψ струмів двох суміжних витків визначається як

$$\Psi = \beta L = \frac{2\pi}{\Lambda} L = K\xi L,$$

де Λ – довжина хвилі в спіралі та ξ – коефіцієнт сповільнення. Множник системи для спіральної антени

$$f_c(\theta) = \frac{\sin \left[\frac{nk\ell}{2} (\xi - \sin \alpha \cos \theta) \right]}{\sin \left[\frac{k\ell}{2} (\xi - \sin \alpha \cos \theta) \right]}$$

Умова осьового випромінювання

$$L = \frac{S + \lambda}{\xi}$$

Ця умова задовольняється в широкій смузі частот в зв'язку з тим, що при зростанні довжини хвилі λ збільшується і коефіцієнт сповільнення ξ . Для спіральних антен з кутом піднесення $\alpha = 12^\circ \dots 16^\circ$, які найчастіше використовуються, в результаті експериментальних досліджень знайдені такі співвідношення:

ширина ДС

коефіцієнт спрямованої дії

$$D = 15 \left(\frac{L}{\lambda} \right)^2 \frac{nS}{\lambda}$$

вхідний опір антени

$$R_A = 140 \frac{L}{\lambda}$$

Спиральна антена працює в смузі частот біля 30 %.

1.3. Види металевих екранів та їх призначення

Типові наземні площини повинні мати діаметр щонайменше $\frac{\lambda}{2}$ і зазвичай приймаються як квадрати, так і кола, без великої різниці в коефіцієнті посилення між двома геометриями. Запропоновано чотири різні конфігурації площини землі, які показані нижче. Це: (а) нескінченна площина землі (б) квадратна площина землі (с) циліндрична чашка та (d) оптимальний усічений конус.

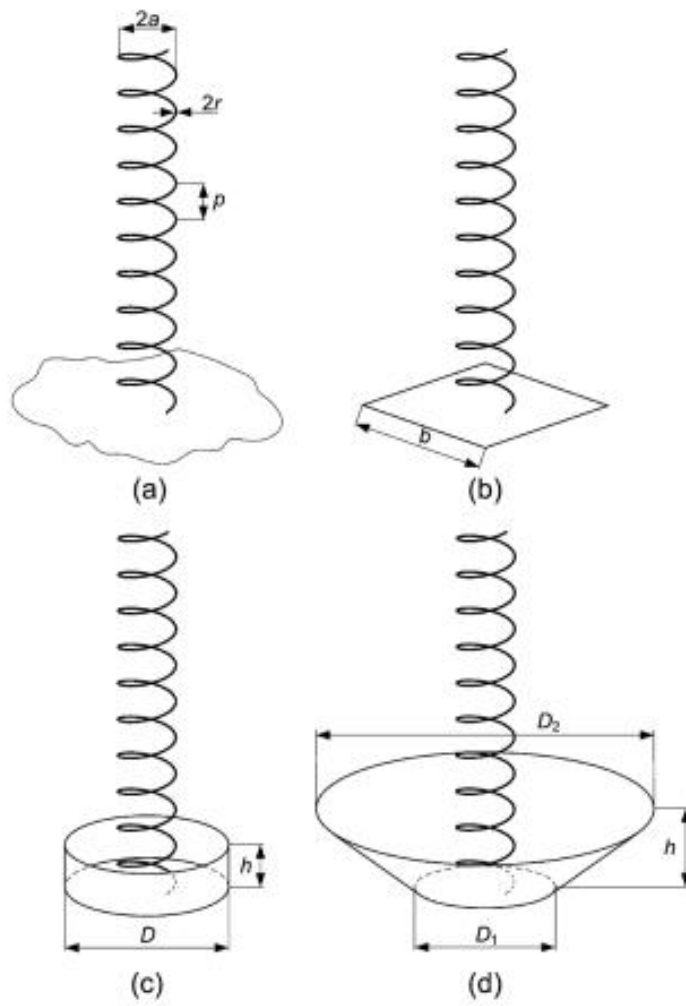


Рисунок 1.3.1: Спіральна антена над (а) нескінченною площиною землі, (b) квадратним провідником, (c) циліндричною чашкою і (d) усіченим конусом

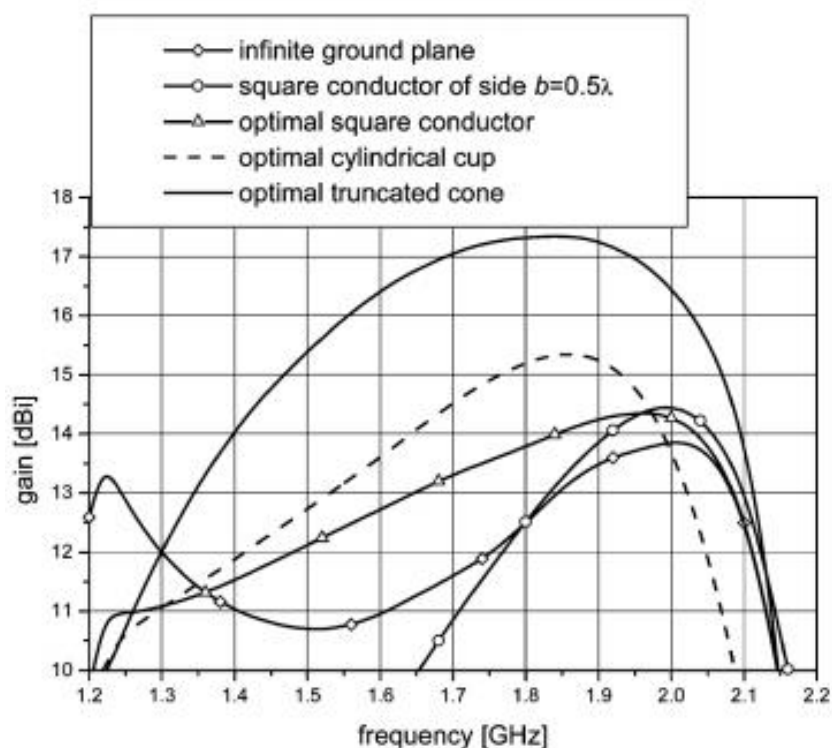


Рисунок 1.3.2: Коефіцієнт посилення для різних форм заземлюючих провідників, показаний на рисунку 1.3.1

На рисунку 1.3.2 зображено коефіцієнти посилення для однієї спіральної антени з декількома типами заземлених площин, розміри яких оптимізовані для максимального посилення за допомогою комп'ютерних кодів. Незавжди помітити, що усічена конструкція конуса дає найбільший вигреш. Це пов'язано з тим, що конічний заземлюючий провідник покращує осьове співвідношення і мінімізує величину бічних пелюсток у порівнянні з гвинтовою антеною з квадратною площиною заземлення. Це специфічне посилення спричинене тим, що сам конус діє не тільки як відбиваюча пластинка, але й як рогова антена, яка

має свою власну діаграму випромінювання, яка конструктивно доповнює природну картину випромінювання спіралі. Найновіші дослідження дають значення $D1 = 0,75\lambda$, $D2 = 2,5\lambda$ і $h = 0,5\lambda$ для оптимальних розмірів зрізаної конусної заземлювальної плити, геометрія якої наведена на рисунку 1.3.1 (d).

ВИСНОВОК

Спіральні антени отримали велику популярність у багатьох областях радіоелектронних комунікацій. Завдяки їм здійснюється стільниковий зв'язок. Також їх застосовують в телебаченні і навіть в далекого космічного радіозв'язку. Однією з перспективних розробок щодо зменшення габаритів антени стало застосування конусного рефлектора, що дозволяє збільшити довжину приймаючої хвилі, в порівнянні зі звичайним відбивачем. Однак є і недолік, виражений в зменшенні спектра робочої частоти. Також цікавим зразком є «двухзаходная» конічна спіральна антена, що дозволяє працювати в широкому спектрі частот, завдяки формуванню ізотропної діафрагми спрямованості. Це відбувається тому, що лінія харчування у вигляді двухпроводного кабелю забезпечує плавну зміну хвильового опору.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄМНІ КОНІЧНІ СПІРАЛЬНІ АНТЕНИ

2.1. Конічні антени, що звужуються «уверх»

Застосування конічних спіральних антен дозволяє збільшити робочий діапазон частот в порівнянні з застосуванням циліндричних. Конічні спіральні антени розглядаються як циліндричні з плавно змінюються діаметром.

Конічні спіральні антени більш широкосмугові, ніж циліндричні, але мають менший КСД. Існує багато різновидів конічних спіральних антен, що відрізняються формою конуса й проводів, числом пліч (заходів) спіралі, способом збудження і т.д. Розглянемо найпоширеніші конічні дротові спіралі, навинені на прямому конусі (рис. 2.1.1):

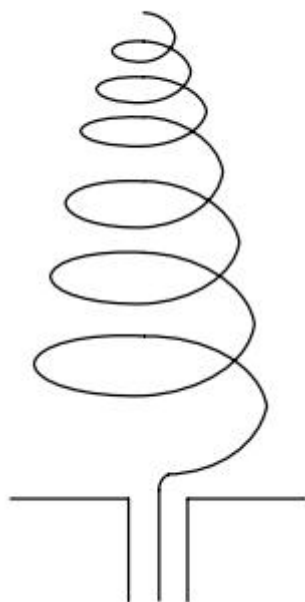


Рис. 2.1.1: Конічні антени, що розширюються «уверх»

У конічної спіралі (рис. 2.1.1) довжина витка й відстань між витками є змінними. Її параметри: L - осьова довжина; a_{\min} - мінімальний радіус спіралі; a_{\max} - максимальний радіус спіралі; N - кількість витків; α - кут намотування; β - половина кута при вершині конуса.

Геометричні розміри конічної спіралі визначаються по формулах

$$a_{\min} = \frac{0.75 \lambda_{\min} \operatorname{tg} \alpha \sin \beta}{\exp(2\pi N \operatorname{tg} \alpha \sin \beta) - 1}$$

$$a_{\max} = a_{\min} e^{2\pi N \operatorname{tg} \alpha \sin \beta}$$

де λ_{\min} - нижня довжина хвилі робочого діапазону антени.

Конічні спіральні антени більш широкосмугові, але мають менший КСД через зменшення кількості витків, для яких виконується умова режиму осьового випромінювання при

$$(2\theta_{0,5})_{\theta} \cong 85 \sqrt{\frac{\lambda}{L \cos \beta}}, \quad (2\theta_{0,5})_{\varphi} \cong 108 \sqrt{\frac{\lambda}{L \cos \beta}}.$$

У режимі осьового випромінювання ЦСА при оптимальному значенні КСД у напрямку максимуму випромінювання

$$D_0 \approx 15 \left(\frac{l_{1\text{cep}}}{\lambda} \right)^2 \frac{L \cos \beta}{\lambda}$$

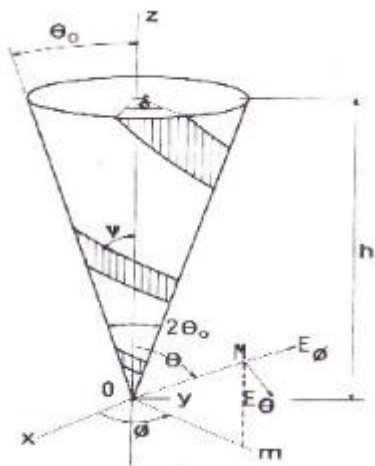
де

$$l_{1\text{cep}} = \pi (a_{\max} + a_{\min})$$

$$l = \lambda$$

Для оцінки ширини ДС (у градусах) можна користуватися виразами

2.2. Конічні антени, що розширюються «уверх»



Похідна від спіральних антен, вона має односпрямоване випромінювання, максимум поля спрямований на вісь конуса у напрямку до його вершини.

Він визначається такими виразами:

$$\rho = \rho_1 e^{t \left(\frac{\sin \theta_0}{\tan \alpha} \right)}$$

$$h = \frac{\rho_2}{\tan \alpha}$$

$$t = \frac{\ln \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} \right) \tan \alpha}{2\pi \sin \theta_0}$$

Де α - кут намотування, t кількість витків, h висота та θ_0 кут напівконуса; ρ_1 , ρ_2 відповідно складають радіус верху і основи.

Структура випромінювання не показує будь-яких нерівностей на задній частині променя для сильного кута α та слабкого кута θ_0 .

Це відповідає швидкості розширення між $0,023 < a < 0,15$ та кутом намотування, що відповідає $60^\circ < \alpha < 80^\circ$. Чим слабше θ_0 , тим більше воно не залежить від α та a . Отримана оптимальна схема для наведених нижче характеристик:

ρ_1	ρ_2	θ_0	α
0,01 m	0,1 m	5°	85°

Висока і низька граничні частоти визначаються відповідно радіусами

ρ_1 , . Умова записана:

Отримується велика смуга пропускання з малим радіусом ρ_1 і великим радіусом ρ_2 . Збудження забезпечується вершиною конуса за допомогою коаксіальної лінії. Смугу зростаючої ширини можна також замінити двома вкладеними коаксіальними лініями, одна з ліній зазвичай подається, а її серцевина з'єднана з оболонкою іншої лінії, яка залишається у розімкнутому контурі на іншому кінці; таким чином антена становить власний балун. Дві лінії намотані на дві однакові логарифмічні спіралі.

Досвід показує, що вхідний опір має кращу регулярність, ніж плоска спіральна антена. Поляризація поля є круговою на більшій частині діаграми для кута напівконуса менше 60° , за межами цього поляризація стає еліптичною.

Недоліком є те, що фазовий центр антени рухається по осі Oz конуса, зверху до основи при зменшенні частоти. Отже, не вдається досягти дуже хороших показників коефіцієнта посилення та рівня бічних пелюсток, але бувають випадки, коли робоча смуга пропускання є основною вимогою.

Висновок

Застосування конічних спіральних антен дозволяє збільшити робочий діапазон частот в порівнянні з застосуванням циліндричних. Конічні спіральні антени розглядаються як циліндричні з плавно змінюються діаметром.

Для даного типу антен характерно те, що діаграма спрямованості в основному формується групою з трьох витків, які називаються активною областю. Для даної групи витків виконується умова осьового випромінювання. При зміні частоти активна зона переміщається уздовж осі спіралі, тобто умова осьового випромінювання виконується вже для іншої групи витків.

При порівнянні конічних спіральних антен з циліндричними можна відзначити, що основних їх перевагою є велика широкополосність. При цьому вони мають менший коефіцієнттом спрямованої дії в результаті того, що у формуванні діаграми спрямованості бере участь не вся спіраль, а тільки окрема її частина.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНКИ ДІАГРАМ СПРЯМОВАНOSTІ СПІРАЛЬНИХ АНТЕН В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ FEKO

3.1. Циліндрична антена

Якщо довжина витка спіралі $L < 0,65\lambda$ (при цьому довжина хвилі $\lambda > 5D$), то в ній переважає хвиля T_0 , яка характеризується зміною фази струму в межах 360° протягом декількох витків. Хвиля має по довжині спіралі постійну амплітуду і фазову швидкість $V_{\phi 0} = c$. Відображення хвилі T_0 від кінця спіралі призводить до утворення стоячих хвиль, які і формують ДН антени. Максимальне випромінювання для цього випадку створюється в площині, перпендикулярній до осі спіралі (рис. 3.1), і в цій площині воно ненаправлено.

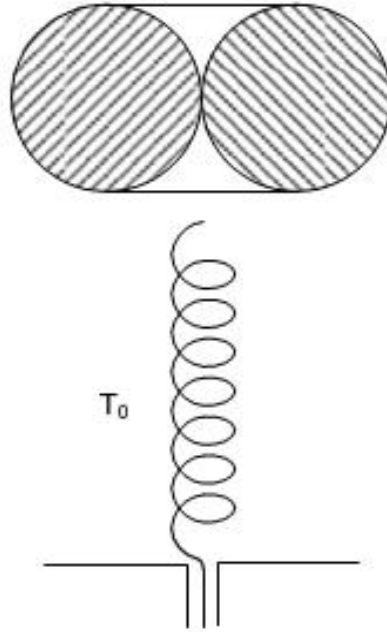


Рис. 3.1.1 Зображення спіральної антени та її діаграми спрямованості з хвилею T_0

Кут намотки спіралі вибираємо $\alpha = 14^\circ$. Кількість витків $n = 6$. Згідно з $\lambda > 5D$, визначимо максимальне значення D , як $\lambda = 5D$. Так як $L = c/F$ звідси $L = 3e8/5e9 = 6$ см. Звідки $D = 6/5 = 1.2$ см, тобто радіус $R \leq 0.6$ см.

З даними параметрами створюємо спіральну антену у програмі CADFEKO. Спочатку вибираємо радіус $R = 0.4$ см, $d = 0.05$ см.

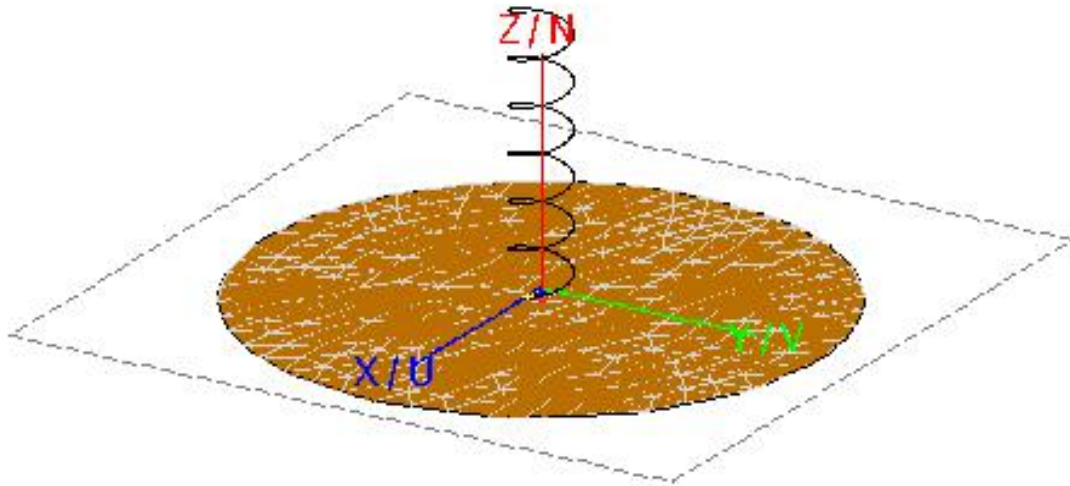


Рис. 3.1.2 Модель спіральної антени з радіусом $R = 0.4$ см у програмі CADFEKO

Отримуємо діаграму спрямованості повздовжньої форми у 3D (Рис. 3.1.3) та у полярній системі координат (Рис. 3.1.4).

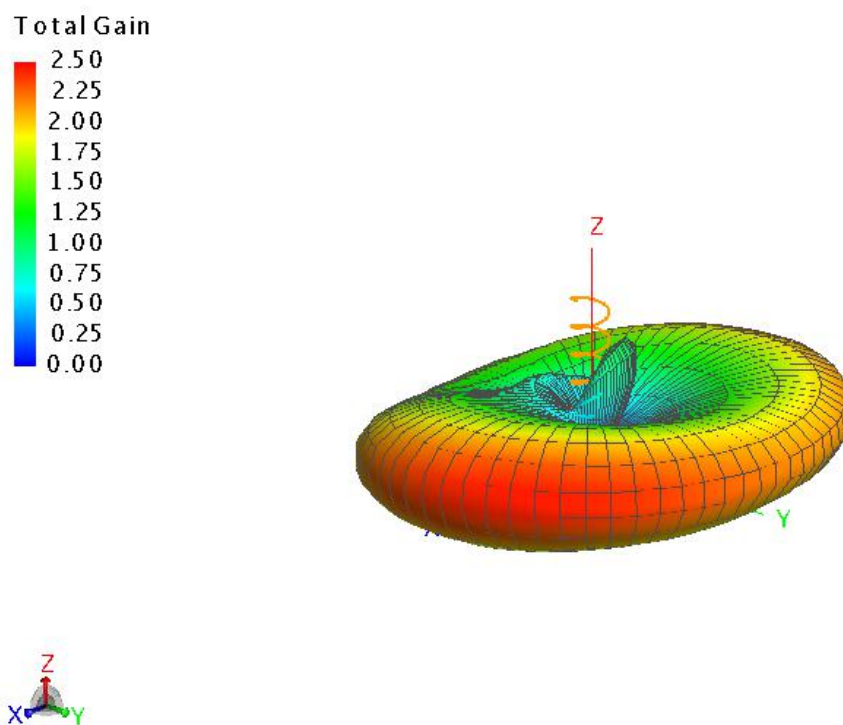


Рис. 3.1.3 Діаграма спрямованості у 3D

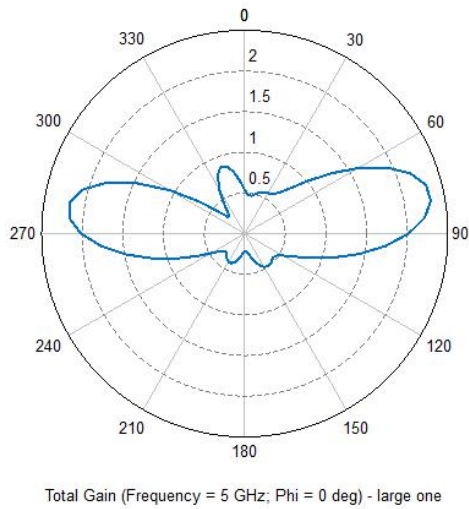


Рис. 3.1.4 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Пробуємо варіювати параметри, змінюємо $R = 0.4$ см на $R = 0.6$ см. Отримуємо діаграму спрямованості у 3D (Рис. 3.1.5) та у полярній системі координат (Рис. 3.1.6).

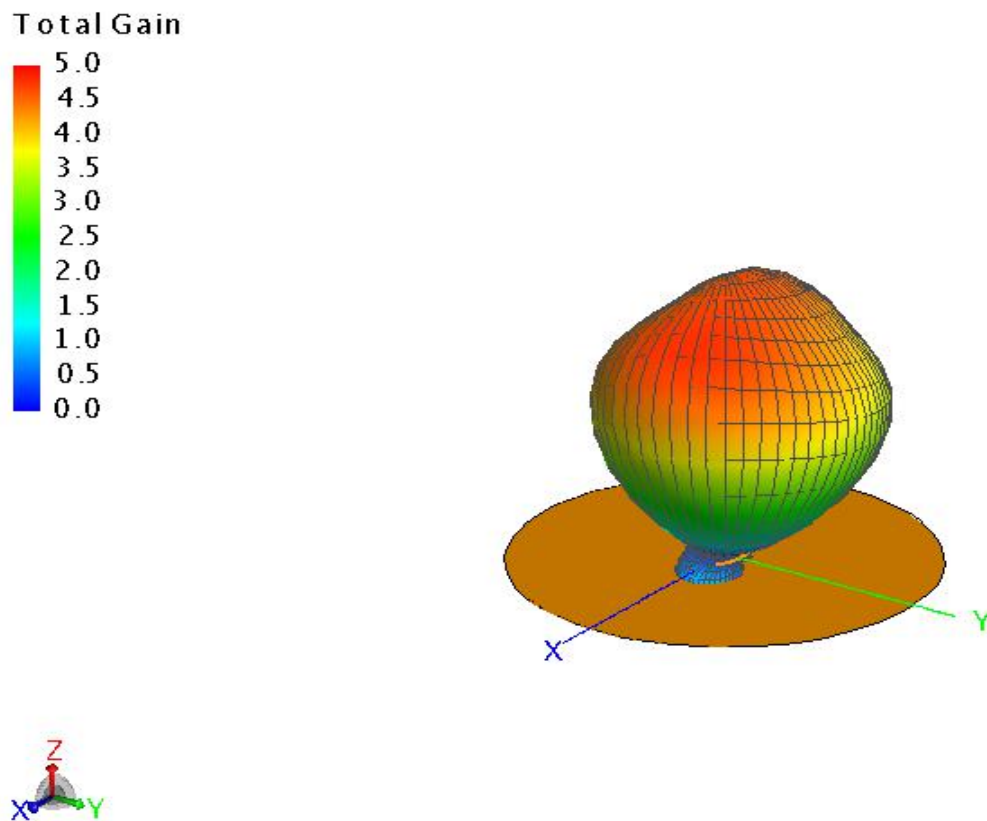


Рис. 3.1.5 Діаграма спрямованості у 3D

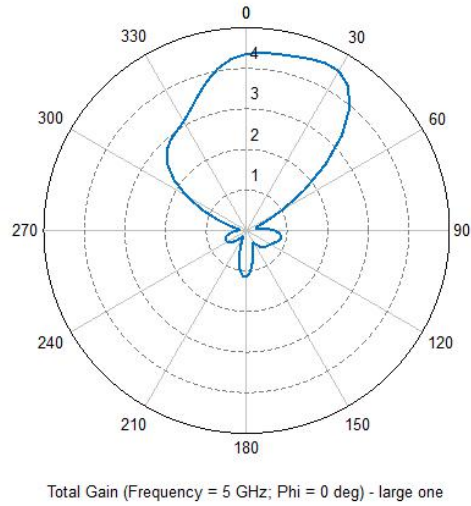


Рис. 3.1.6 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

На діаграмі спрямованості можемо спостерігати переважання осьового випромінювання над поперечним. Далі змінюємо радіус $R = 0.6$ см на $R = 0.3$ см.

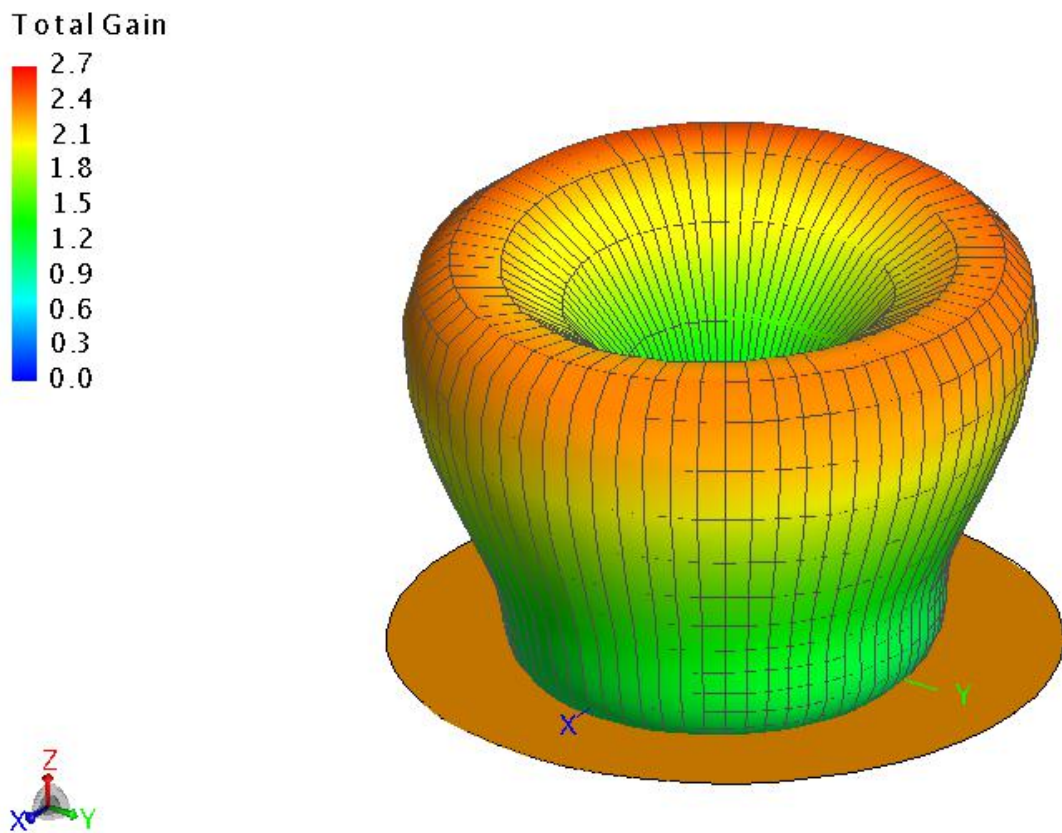


Рис. 3.1.7 Діаграма спрямованості у 3D

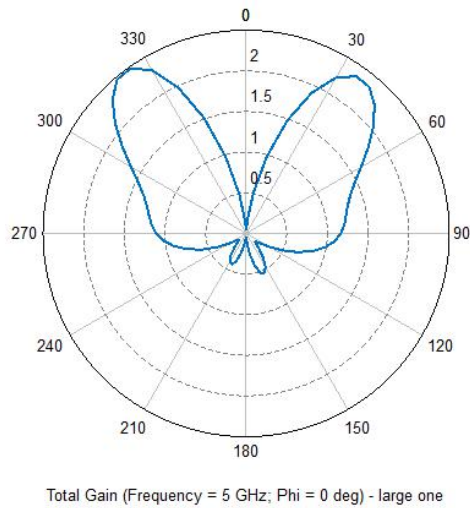


Рис. 3.1.8 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Отримуємо конусну діаграму спрямованості (Рис. 3.1.7 та Рис. 3.1.8). Тому повертаємось до першого значення радіусу $R = 0.4$ см, з даним радіусом ми отримуємо необхідну діаграму спрямованості з переважаючим поперечним випромінюванням.

Далі змінюємо кількість витків $n=6$ на $n=7$.

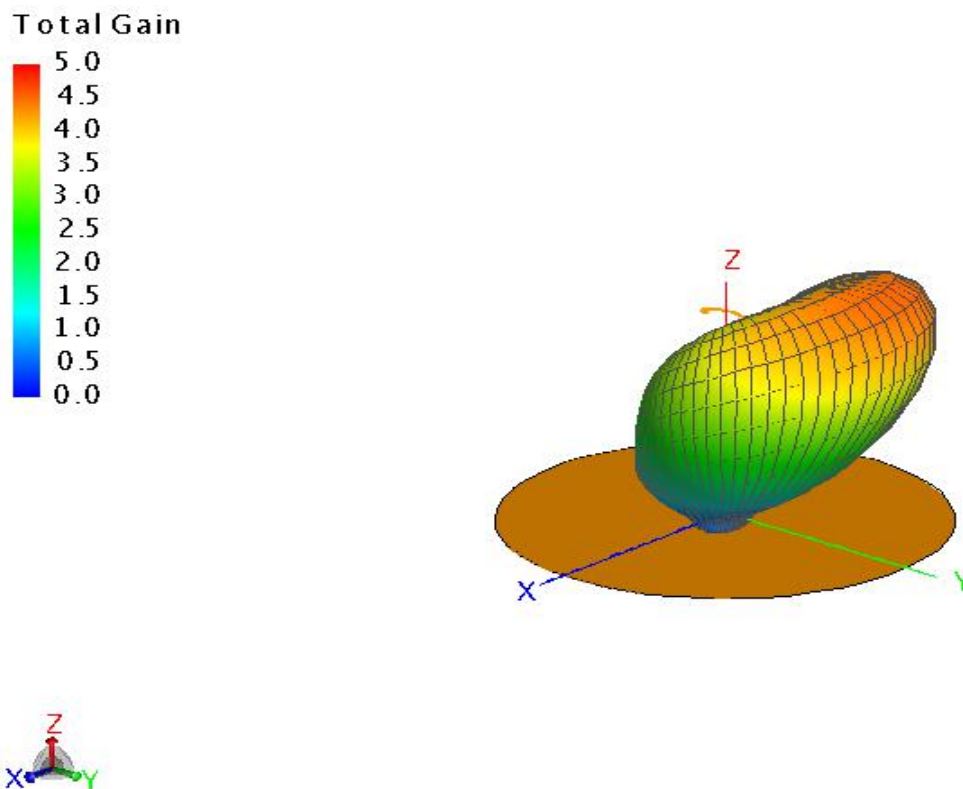


Рис. 3.1.9 Діаграма спрямованості у 3D

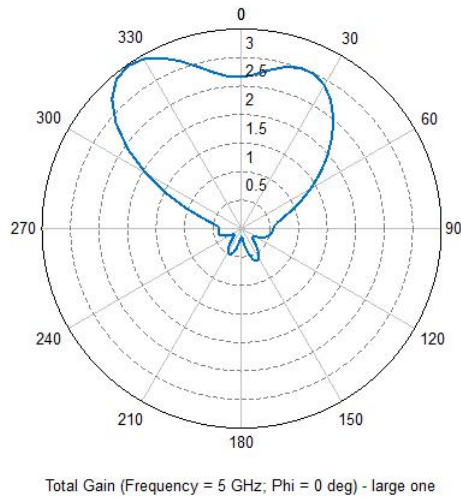


Рис. 3.1.10 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Діаграма кардинально змінюється (Рис. 3.1.9 та Рис. 3.1.10). Далі збільшуємо товщину дроту до значення $d=0.1$ см. Опускаємо екран на значення -1.5 , для попередження зливання дроту спіралі з екраном.

Total Gain

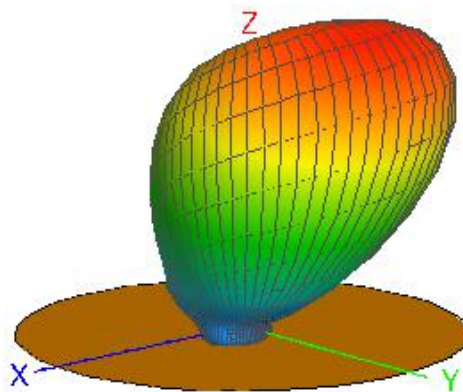


Рис. 3.1.11 Діаграма спрямованості у 3D

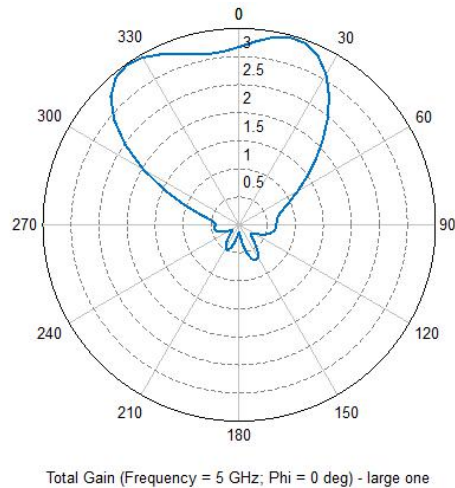


Рис. 3.1.12 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Дана діаграма спрямованості (Рис. 3.1.11 та Рис. 3.1.10) не відповідає вимогам, тому зупиняємося на значеннях $d=0.1$ см, $n=6$, $R = 0.4$ см.

2. Якщо довжина витка лежить в межах $0,75\lambda \leq L \leq 1,3\lambda$ (довжина хвилі відповідно буде $\lambda = 4D \dots 2,2D$), то в ній переважає хвиля T_1 , фазова швидкість якої менше швидкості світла ($V_{\Phi 1} \approx 0,8c$). Хвиля T_1 інтенсивно випромінюється усіма витками, і тому в спіралі встановлюється хвиля, що біжить струму, яка формує максимум випромінювання вздовж осі спіралі (рис. 5.1.1.б). Наявна також на спіралі хвиля T_0 швидко згасає по довжині спіралі і її внесок в ДН невеликий.

Режим осьового випромінювання є основним, найбільш використовуваним режимом для роботи спіральних антен, тому хвиля T_1 , що є переважаючою, коли довжина проводу витка спіралі приблизно дорівнює робочій довжині хвилі, називається основною.

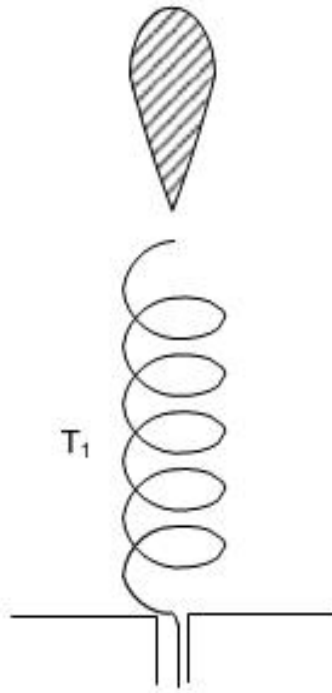


Рис. 2.2.12. Зображення спіральної антени та її діаграми спрямованості з хвилею T_1

Зберігаємо початковий кут намотки $\alpha = 14^\circ$ та кількість витків $n=6$. Згідно співвідношення $\lambda = 4D \dots 2,2D$ знаходимо, що $0,75 \leq D \leq 1,4$. Встановлюємо товщину дроту $d=0,05$ та $R = 0,75$ см

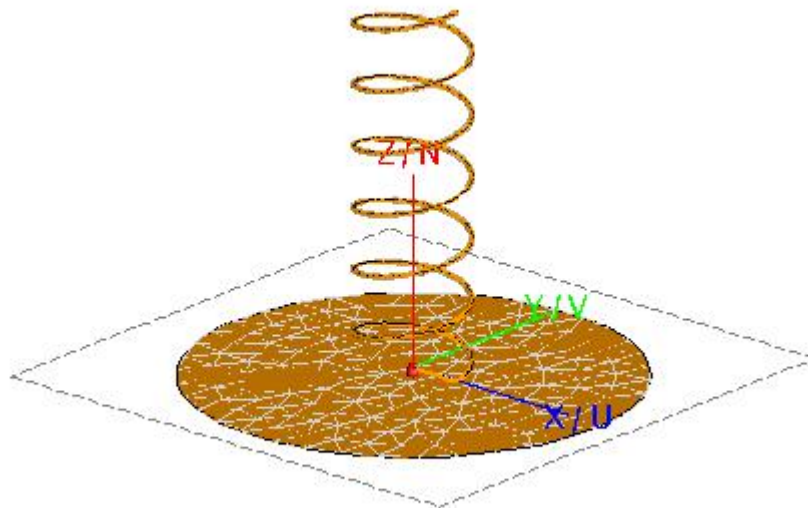


Рис. 2.2.13 Модель спіральної антени з радіусом $R = 0,75$ см у програмі CADFEKO

Отримуємо діаграму спрямованості з осьовим випромінюванням у 3D (Рис. 2.2.14) та у полярній системі координат (Рис. 2.2.15).

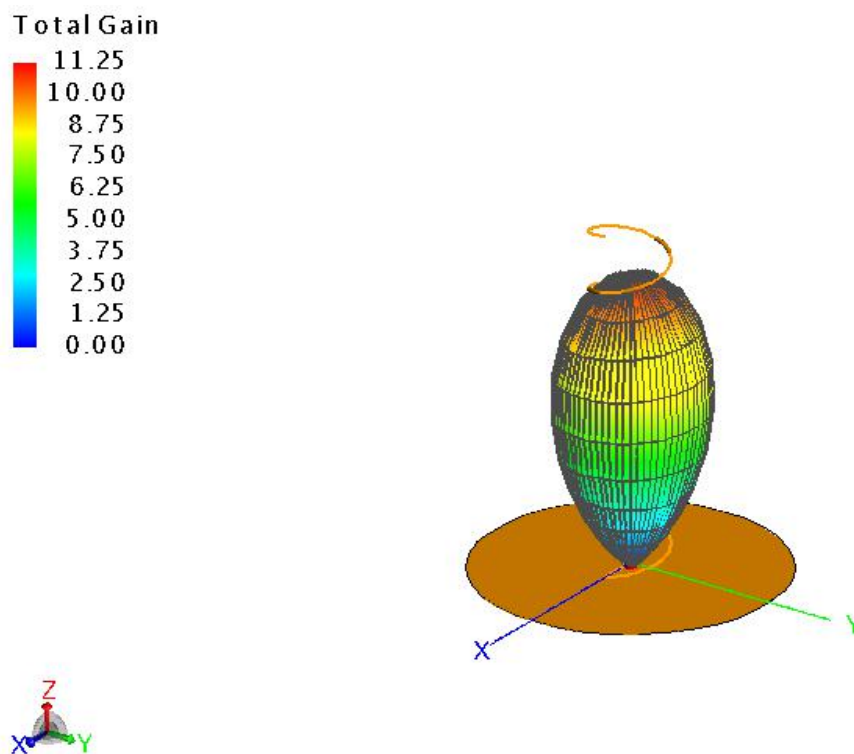


Рис. 2.2.14 Діаграма спрямованості у 3D

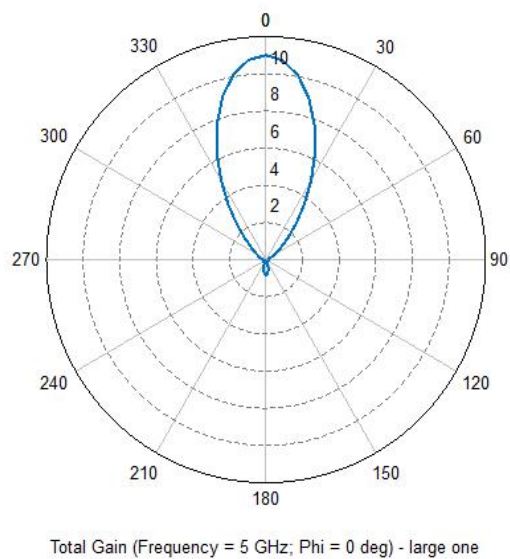


Рис. 2.2.15 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Отримуємо діаграму спрямованості (Рис. 2.2.14 та Рис. 2.2.15). Отримуємо значення підсилення $G=11.61$. Задля зменшення підсилення осьового випромінювання пробуємо змінити кут намотки.

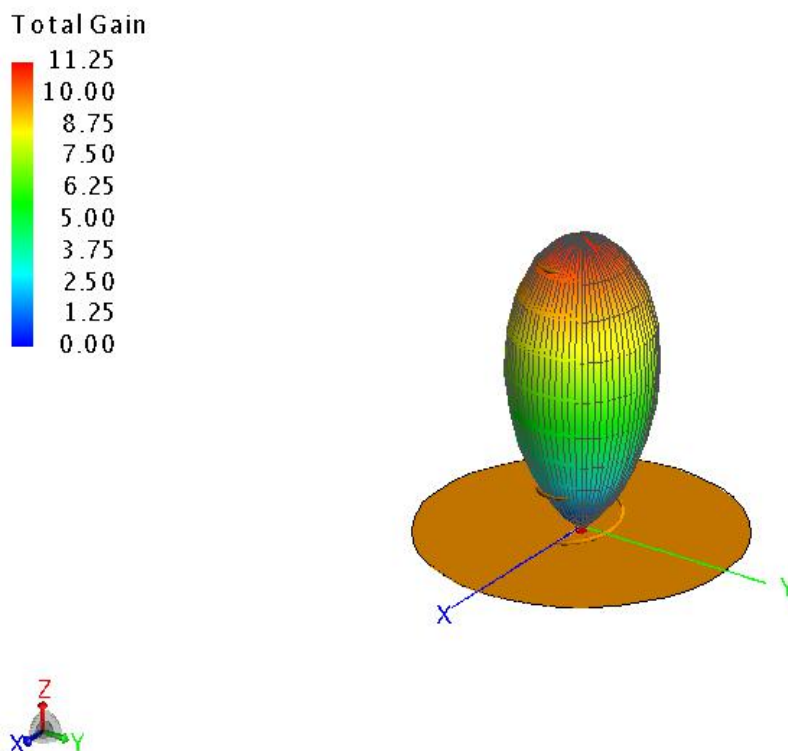


Рис. 2.2.16 Діаграма спрямованості у 3D

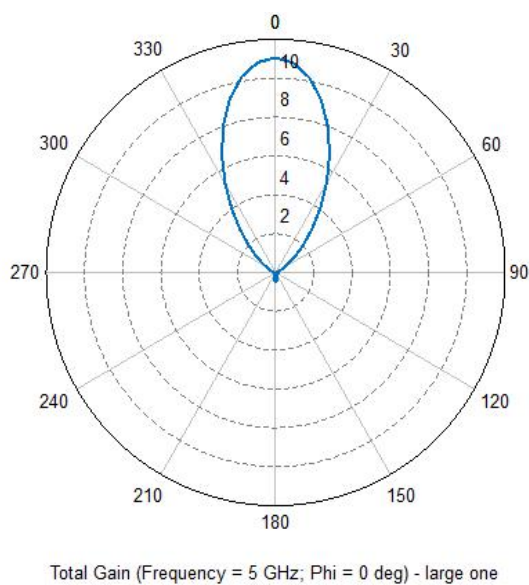


Рис. 2.2.17 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Отримуємо діаграму спрямованості (Рис. 2.2.16 та Рис. 2.2.17). Задля зменшення підсилення осьового випромінювання пробуємо зменшити кількість витків до $n=3$.

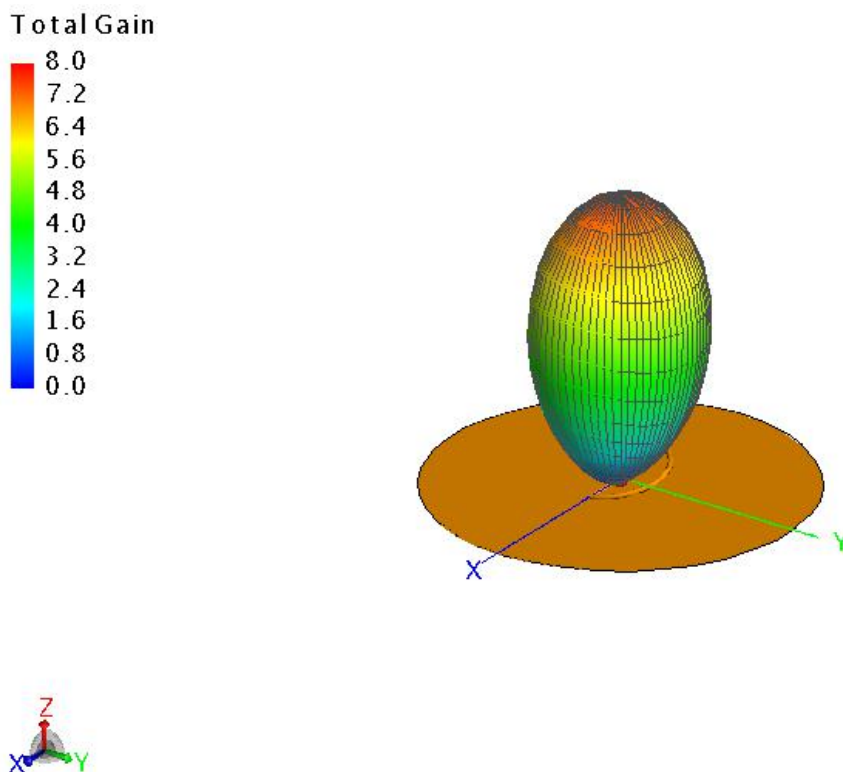


Рис. 2.2.18 Діаграма спрямованості у 3D

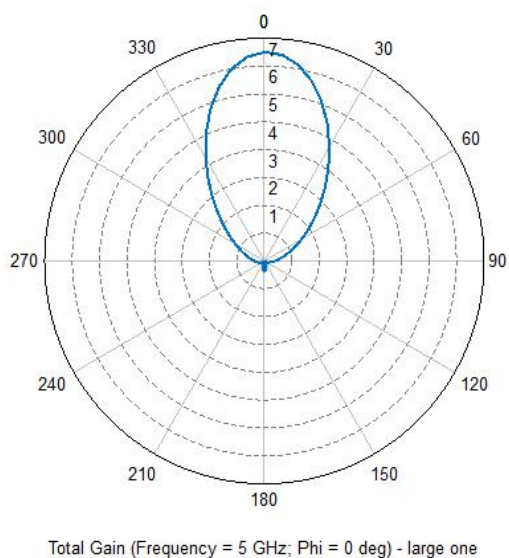


Рис. 2.2.19 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Отримуємо діаграму спрямованості (Рис. 2.2.18 та Рис. 2.2.19). Отримуємо δ^u

підсилення $G=8$. Зменшуємо значення α до $\alpha=$.

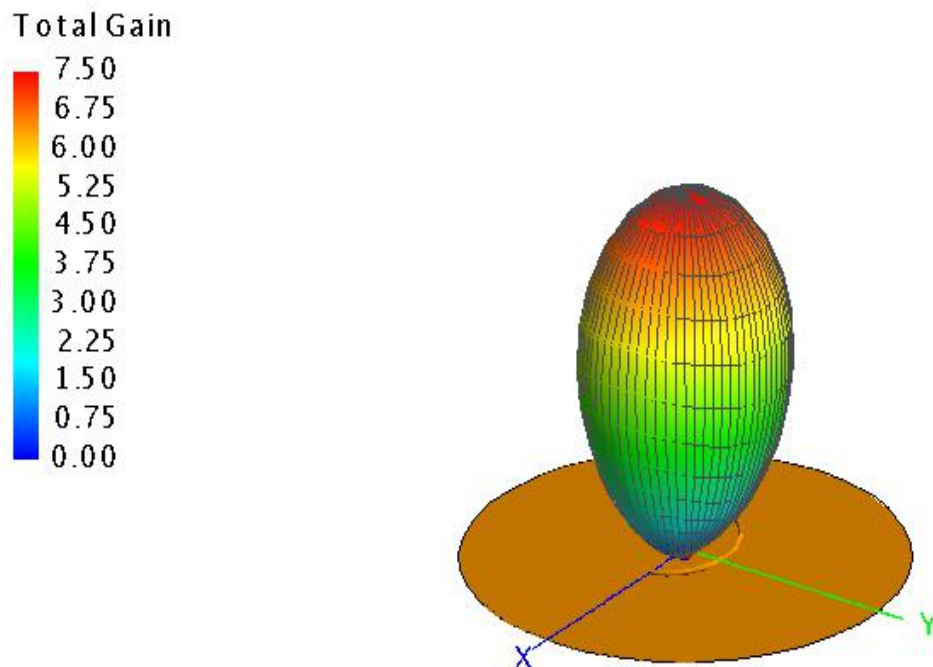


Рис. 2.2.20 Діаграма спрямованості у 3D

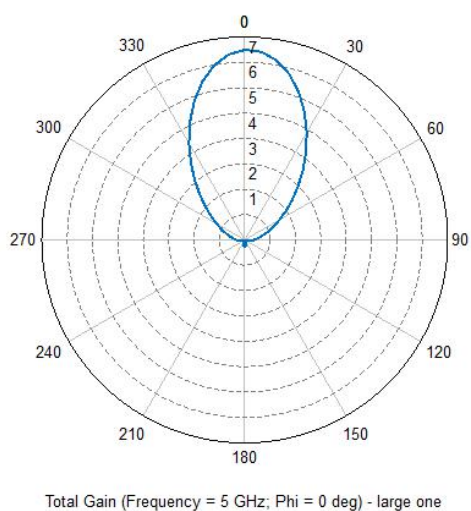


Рис. 2.2.21 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Отримуємо діаграму спрямованості (Рис. 2.2.20 та Рис. 2.2.21). Робимо спробу
зменшити підсилення ще зменшивши кут, до $\alpha = 6^\circ$.

понижити підсилення ще зменшивши кут, до $\alpha = \dots$.

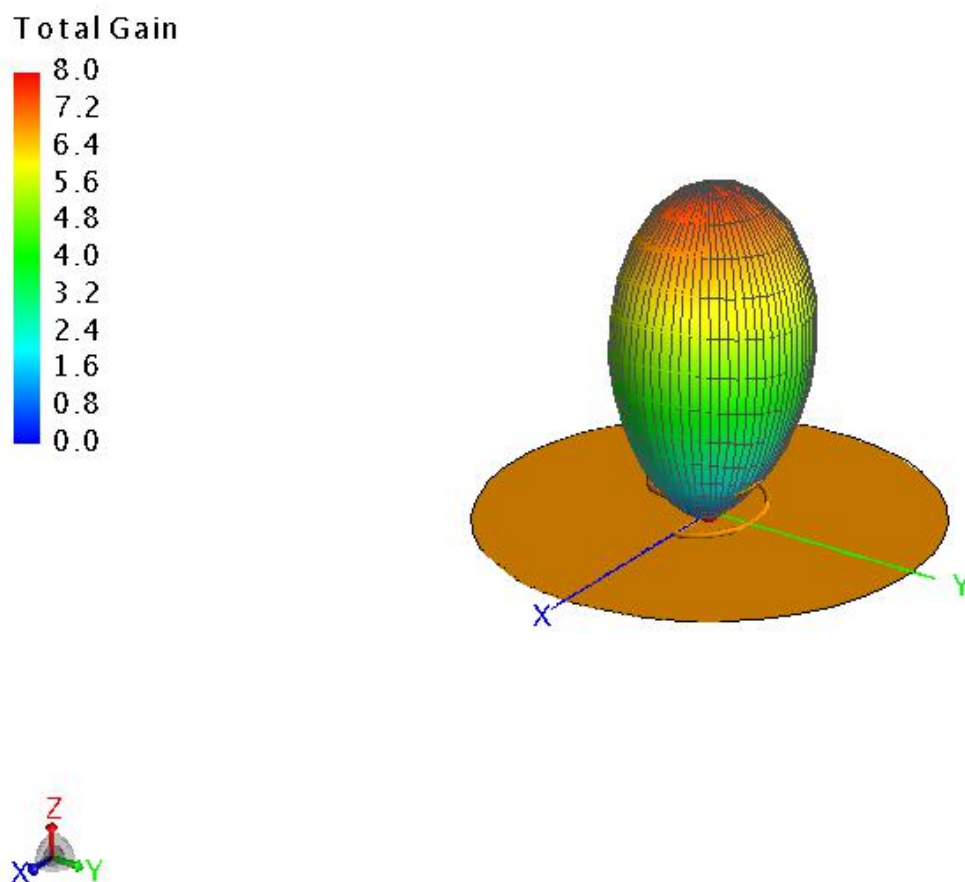
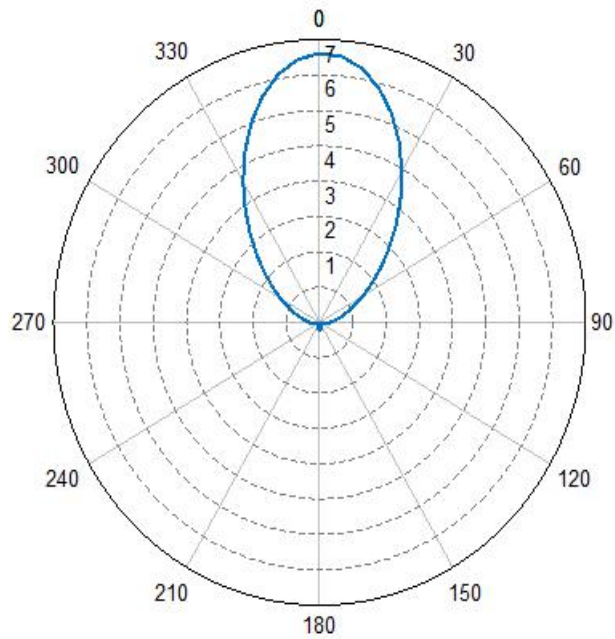


Рис. 2.2.22 Діаграма спрямованості у 3D



Total Gain (Frequency = 5 GHz; Phi = 0 deg) - large one

Рис. 2.2.23 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Отримуємо діаграму спрямованості (Рис. 2.2.22 та Рис. 2.2.23). Для зменшення підсилення G , зменшуємо радіус намотки до $R = 0.65$ см.

Total Gain

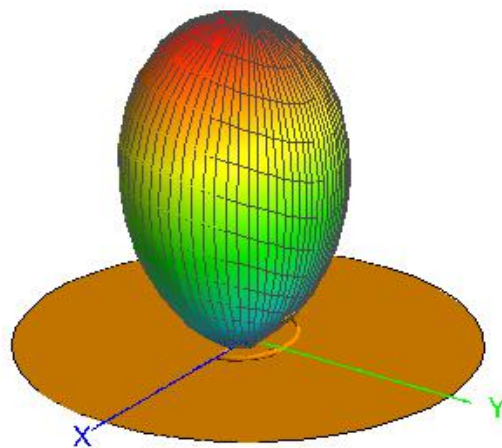


Рис. 2.2.24 Діаграма спрямованості у 3D

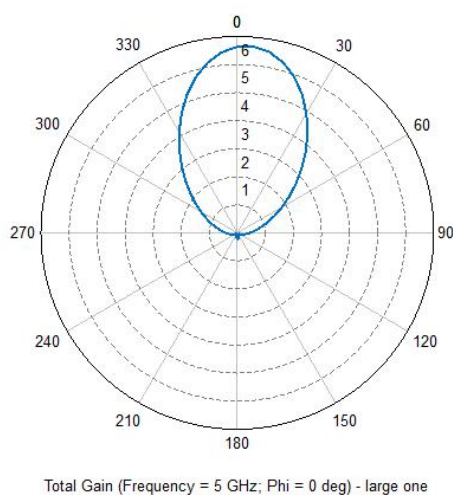


Рис. 2.2.25 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Отримуємо діаграму спрямованості (Рис. 2.2.24 та Рис. 2.2.25). Отримуємо підсилення $G=6.75$. Зменшуємо радіус намотки до $R = 0.55$ см.

Total Gain

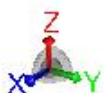
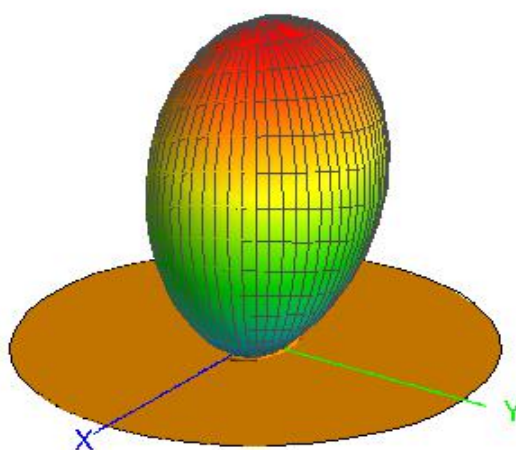
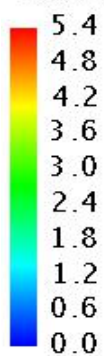


Рис. 2.2.26 Діаграма спрямованості у 3D

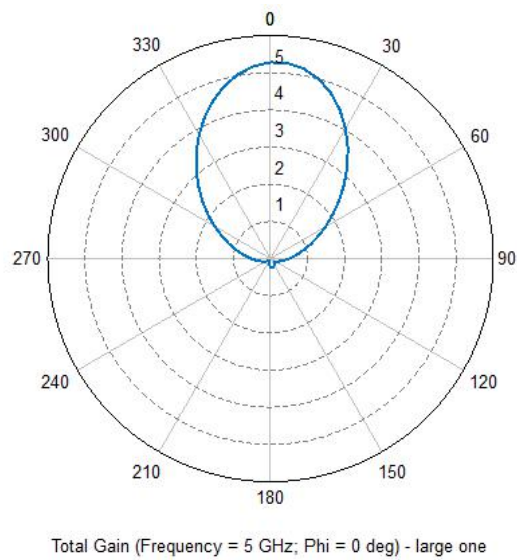


Рис. 2.2.27 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

Отримуємо діаграму спрямованості (Рис. 2.2.26 та Рис. 2.2.27). Отримали підсилення 5.4. Зменшуємо значення R до $R = 0.5$ см.

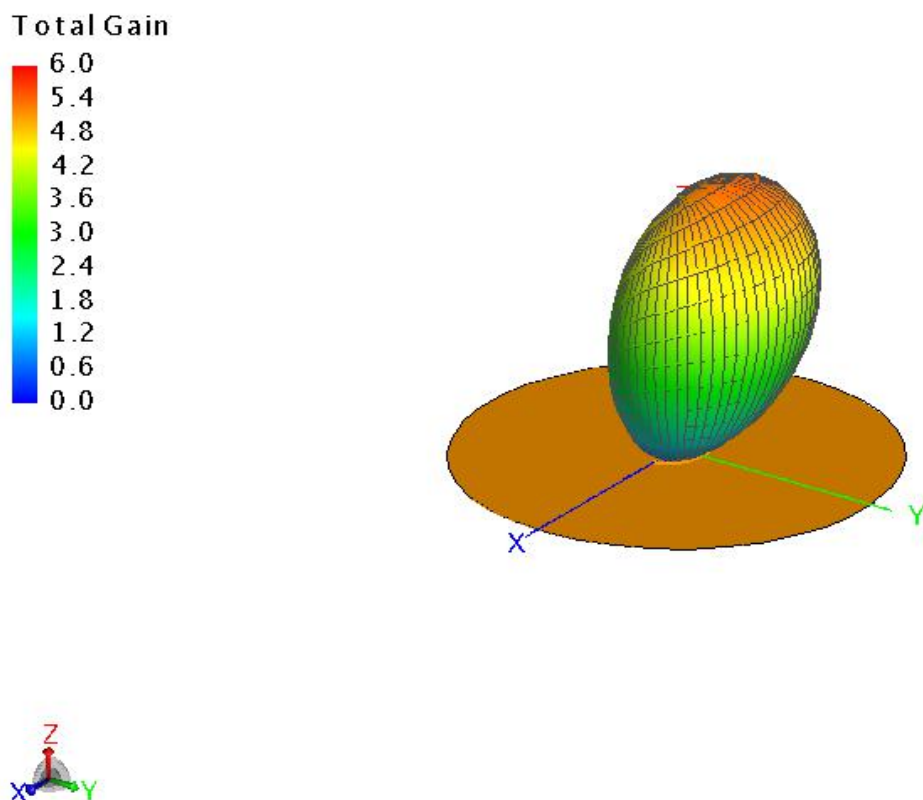


Рис. 2.2.28 Діаграма спрямованості у 3D

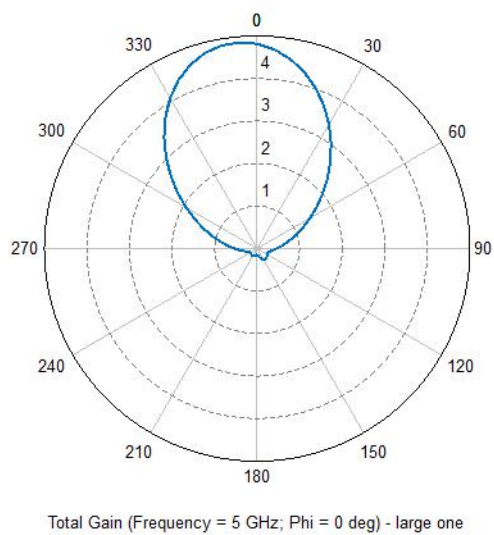


Рис. 2.2.29 Діаграма спрямованості у полярній системі координат.

3.2. Конічна антена, що звужується «уверх» (класична)

Для проектування спіральної антени слід врахувати декілька вимірювань, перше - це зовнішній діаметр, друге - внутрішній діаметр антени і третє - кут нахилу, який варіює висоту пружини та відстань між ними повороти; додатковим параметром, який слід враховувати, є кількість витків.

Конструкція звичайної спіральної антени досить проста, оскільки діаметр (D) і відстань між витками (S) залежать від частоти (f), як це видно з наступних рівнянь.

$$\lambda = \frac{c}{f} 12,5 \text{ cm}; \quad D = \frac{\lambda}{\pi} 3,13 \text{ cm}; \quad S = \frac{\lambda}{4} = 3,125 \text{ cm}$$

Враховуючи той факт, що в конічній спіральній антені кожен поворот має різний розмір діаметра, деякі повороти резонують на частотах нижче, а деякі на частотах, що перевищують бажану центральну частоту. Це забезпечує антену з більш широкою смугою пропускання, одночасно зменшуючи спрямованість, оскільки менше поворотів резонує на певній частоті.

Першим підходом був вибір матеріалу. Матеріал антени повинен мати незначні втрати, щоб досягти гарних характеристик випромінювання. Для того, щоб визначити матеріал, одну і ту ж антену змоделивали з різними матеріалами, порівняння коефіцієнта підсилення з використанням різних матеріалів можна побачити в таблиці 1, антена встановлена з позолоченим покриттям, оскільки саме цей матеріал працює найкраще і робить не іржавіти.

<i>Material</i>	<i>Gain (dB)</i>
Steel	8
Nickel	6
Copper	10,33
Gold	10,5

Підсилення антени з різних матеріалів

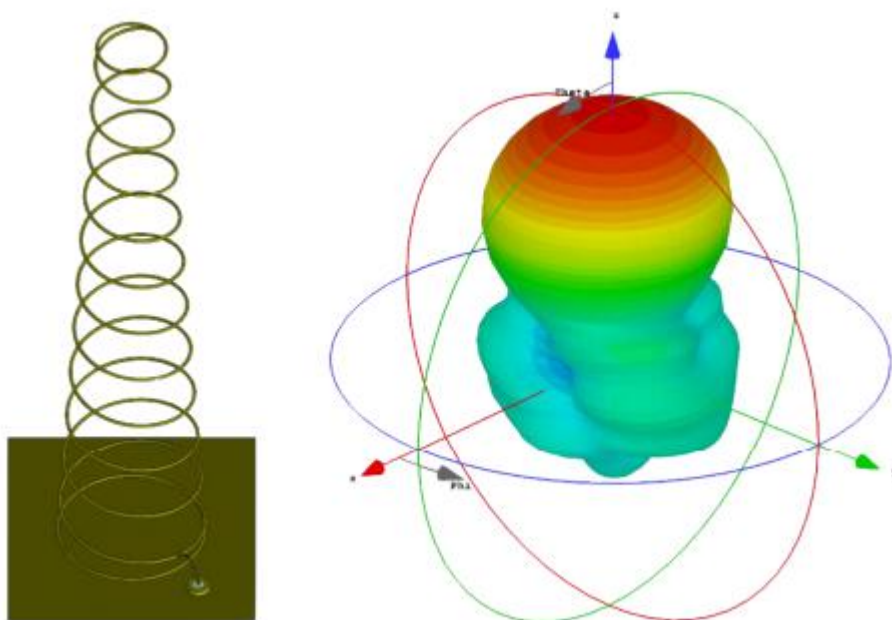
Ділянка матеріалу повинна бути якомога тоншою, щоб забезпечити компактність антени. Початковий підхід повинен був мати переріз у півміліметра, але через неможливість виготовити пружину з такими характеристиками діаметр повинен був становити 1 мм.

Перші моделювання проводились саме з урахуванням наземної площини з розміром наносупутника 98 мм на 98 мм.

$$\Phi_{int} = 25,4mm; \quad \Phi_{ext} = 54mm; \quad pitch = 7^\circ; \quad N = 11 \text{ turns}$$

Діаметр, який звичайна спіральна антена стоїть посередині отриманого зовнішнього та внутрішнього діаметрів, таким чином, отримує більшу кількість витків, які резонують приблизно на бажаній частоті.

Антенна із звичайною площиною заземлення має спрямованість 12,97 дБ.



Моделювання антени (ліворуч) та діаграма 3D-випромінювання (праворуч)

Висновок

Існує певна подібність між звичайною спіраллю та кінчною спіральною антеною. Було показано, що кінчна спіральна антена здатна забезпечувати односпрямоване випромінювання (одиначна пелюстка) у напрямку до вершини конуса з максимумом, що виникає вздовж осі. Підтримуються постійний імпеданс і кругова поляризація

через велику пропускну здатність, подібно до звичайної спіралі.

Унікальною особливістю кінчної спіральної антени є контроль смуги пропускання. Якщо кінчну спіраль встановити на площині землі, відбудеться зменшення смуги пропускання. Змінюючи кут конуса θ_0 та кут обмотки δ , можна також регулювати ширину променя.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Юрцев О.А., Рунов А.В., Казарин А.Н. Спиральные антенны. – М.: Сов. Радио, 1974.- 224 с.
2. ANTENN ENGINEERING HANDBOOK. Dr JOHN L. Volakis
3. <https://nptel.ac.in/content/storage2/courses/108101092/Week-9-Helical-Antenna-Final.pdf>
4. <http://masters.donntu.org/2013/frt/gryshko/diss/indexu.htm>
5. <https://intellect.icu/antenny-s-krugovoj-polyarizatsiej-polya-izlucheniya-tsilindricheskie-konicheskie-ploskie-spiralnye-printsipy-postroeniya-kharakteristiki-356>

Висновок

У цій роботі спіральні антени були проаналізовані як теоретично, так і експериментально. В процесі дослідження за допомогою програмного середовища FEKO було побудовану співвісну спіральні антени, з кутом поширення 180 градусів. Було з'ясовано, що кут намотки, кількість витків та розміри екрану впливають на діаграму спрямованості.