

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

С. Є. Мартинюк, С. І. Пільтяй, О. Ю. Сушко

АНТЕННІ СИСТЕМИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів,
які навчаються за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»*

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2019

Рецензент: *Могильний С. Б.*, к.т.н., доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського.

За редакцією укладачів

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 3 від 28.11.2019 р.)
за поданням Вченої ради радіотехнічного факультету (протокол № 11/2019 від 25.11.2019 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Мартинюк Сергій Євстафійович, к.т.н., доцент

Пільтяй Степан Іванович, к.т.н., доцент

Сушко Олександр Юрійович, к.т.н., доцент

АНТЕННІ СИСТЕМИ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Антенні системи: Лабораторний практикум [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / С. Є. Мартинюк, С. І. Пільтяй, О. Ю. Сушко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. — Електронні текстові дані (1 файл 1,83 Мбайт). — Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. — 30 с.

Посібник містить методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із кредитного модуля «Антенні системи» та має на меті надати студентам необхідний теоретичний матеріал та ознайомити з послідовністю виконання робіт.

Посібник буде корисним студентам і викладачам при вивченні, експериментальному дослідженні та вимірюванні характеристик різноманітних антенних систем.

© С. Є. Мартинюк, С. І. Пільтяй, О. Ю. Сушко, 2019

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019

ЗМІСТ

1. Лабораторна робота 1. Дослідження антени з лінзою Люнеберга.....	4
2. Лабораторна робота 2. Дослідження антени з косекансною діаграмою спрямованості...7	
3. Лабораторна робота 3. Дослідження антени із частотним скануванням.....	15
4. Лабораторна робота 4. Дослідження смужкових антен.....	23

Лабораторна робота № 1

Дослідження антени з лінзою Люнеберга

Мета роботи: ознайомитись із конструкцією антени з лінзою Люнеберга та способами опромінювання антени.

Теоретичні відомості

У діапазоні надвисоких частот для формування вузьких діаграм спрямованості широко використовують лінзові антени. Вони складаються з випромінювача та лінзи. Призначення цих антен — перетворювати сферичний фронт хвилі випромінювача в плоский.

Однією з таких лінз, які використовуються в антенах надвисоких частот, є лінза Люнеберга. Лінза Люнеберга — це куля радіусом a , яка виготовлена з високоякісного неоднорідного діелектрика.

Конструкція антени з лінзою Люнеберга показана на рис. 1. Вона складається з діелектричної кулі та випромінювача 1, який розміщений на її поверхні.

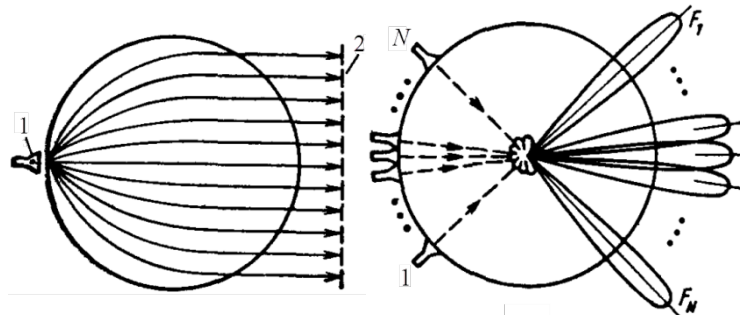


Рис. 1.1

Рис. 1.2.

Доведено, що для того, щоб лінза перетворювала сферичний фронт хвилі випромінювача 1 у плоский фронт 2 (рис. 1.1), коефіцієнт заломлення всередині кулі повинен змінюватись за законом:

$$n(r) = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{a}\right)^2},$$

де r — відстань від точки всередині кулі до її центру. Із цієї формули видно, що на поверхні сфери, при $r = a$, $n = 1$. Це означає, що лінза Люнеберга є узгодженою з оточуючим простором.

Ширина діаграми спрямованості апертурних антен, до яких відноситься антена з лінзою Люнеберга, залежить від площі випромінюючої поверхні антени та амплітудно-фазового розподілу хвилі на поверхні розкриву. У випадку лінзи Люнеберга площиною розкриву є круг з радіусом, який дорівнює радіусу кулі a .

Антена з лінзою Люнеберга має ряд переваг над іншими лінзовими антенами.

Переміщуючи випромінювач (наприклад відкритий кінець хвилеводу або рупор) по поверхні лінзи, можна переміщувати промінь антени за всіма напрямками зі збереженням форми діаграми спрямованості. Інколи разом із лінзою Люнеберга використовують одночасно декілька випромінювачів $1, 2, \dots, N$, кожному з яких відповідає своя діаграма спрямованості F_1, F_2, \dots, F_N (рис.1.2). У цьому випадку утворюється багатопроменева антенна система, за допомогою якої можна обслуговувати одночасно декілька передавачів і приймачів. При цьому опромінювачі можна розміщувати не в одній площині.

Антену з лінзою Люнеберга легко зробити сканувальною. Якщо випромінювач переміщувати по поверхні кулі, то можна здійснювати неперервний радіолокаційний контроль простору в широкому секторі кутів.

При конструюванні лінзи Люнеберга необхідно мати діелектричний матеріал, який допускає неперервну зміну коефіцієнта заломлення за законом, вказаним вище. Оскільки таку умову виконати важко, то використовують наближені способи. Зокрема, лінза Люнеберга може бути виготовлена з однорідних концентричних шарів радіочастотної кераміки. Густина шарів повинна зменшуватись від центру до поверхні кулі. Для виготовлення лінзи Люнеберга можна використати штучний діелектрик, який утворюється шляхом зважування алюмінієвих часток у пінистому полістиролі низької щільності.

Крім сферичних існують також циліндричні лінзи Люнеберга, за допомогою яких можна переміщувати промінь антени лише в одній площині.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити теоретичні відомості.
2. Ознайомитись із конструкцією антени з лінзою Люнеберга.
3. Зняти діаграми спрямованості антени з лінзою Люнеберга, вмикаючи по черзі кожен із випромінювачів.
4. Знаючи діаметр лінзи та ширини головної пелюстки діаграми спрямованості за рівнем -3 дБ, розрахувати коефіцієнт використання поверхні (КВП) антени.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Теоретичні відомості про лінзу Люнеберга, її властивості та застосування.
3. Схема вимірювання діаграм спрямованості.
4. Характеристики приладів, які використані при виконанні лабораторної роботи.
5. Експериментально зняті діаграми спрямованості і розраховані КВП антени.
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. Які різновиди лінзових антен Вам відомі? Які їх конструкції і принцип дії?
2. Опишіть конструкцію антени з лінзою Люнеберга і її властивості.
3. Яку конструкцію має опромінювач лінзи Люнеберга? Якою має бути його діаграма спрямованості?
4. Де в радіотехніці доцільно використовувати лінзи Люнеберга?

Список рекомендованої літератури

1. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д. И. Воскресенского. Издание 2-е, дополненное и переработанное. — М.: Радиотехника, 2006. — 376 с.
2. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнических специальностей вузов. — М.: Высшая школа, 1988. — 432 с.
3. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны: Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1975. — 528 с.
4. Зелкин Е. Г., Петрова Р. А. Линзовые антенны. — М.: Сов. радио, 1974. — 280 с.

Лабораторна робота № 2

Дослідження антени з косекансною діаграмою спрямованості

Мета роботи: ознайомитись із конструкцією антени з косекансною діаграмою спрямованості та способами її формування.

Теоретичні відомості

В антенах наземних радіолокаційних станцій (РЛС), призначених для виявлення та місцезнаходження цілей, а також літакових РЛС необхідно мати діаграму спрямованості (ДС) спеціальної форми. У горизонтальній площині ДС повинна бути дуже вузькою (декілька градусів), щоб точно визначити азимутальне положення цілі. У той же час у вертикальній площині ДС має бути такою, щоб можна було виявити ціль у широкому діапазоні висот.

Рівномірне опромінення цілей, які знаходяться на однаковій висоті, забезпечує косекансна ДС: $F(\theta) = 1/\sin(\theta) = \operatorname{cosec}(\theta)$. При зміні кута місця від 90° до 0° функція $\operatorname{cosec}(\theta)$ змінюється від 1 до ∞ . Оскільки неможливо забезпечити нескінченно велику дальність дії РЛС, то косекансну ДС можна отримати лише в деякому секторі кута місця $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$. Величина цього сектору огляду залежить від необхідної дальності дії РЛС та висот цілей. На практиці граничні кути мають такі значення: $\theta_{\min} = 3-10^\circ$, $\theta_{\max} = 70-80^\circ$. Таким чином, косекансну ДС формує антена, поле на апертурі якої є синфазним у горизонтальній площині і має спеціальний розподіл у вертикальній площині. Такий розподіл забезпечують циліндричні дзеркальні антени, дзеркало яких є широким у горизонтальній площині та має спеціальну форму у вертикальній площині або опромінюється в ній особливим чином.

На рис. 2.1а показана косекансна ДС антен наземних РЛС (рис. 2.1а), на рис. 2.1б — ДС антен літакових РЛС. На тому ж рисунку показані перерізи ДС у прямокутній системі координат у вертикальній (рис. 2.1в) та в горизонтальній площинах (рис. 2.1г).

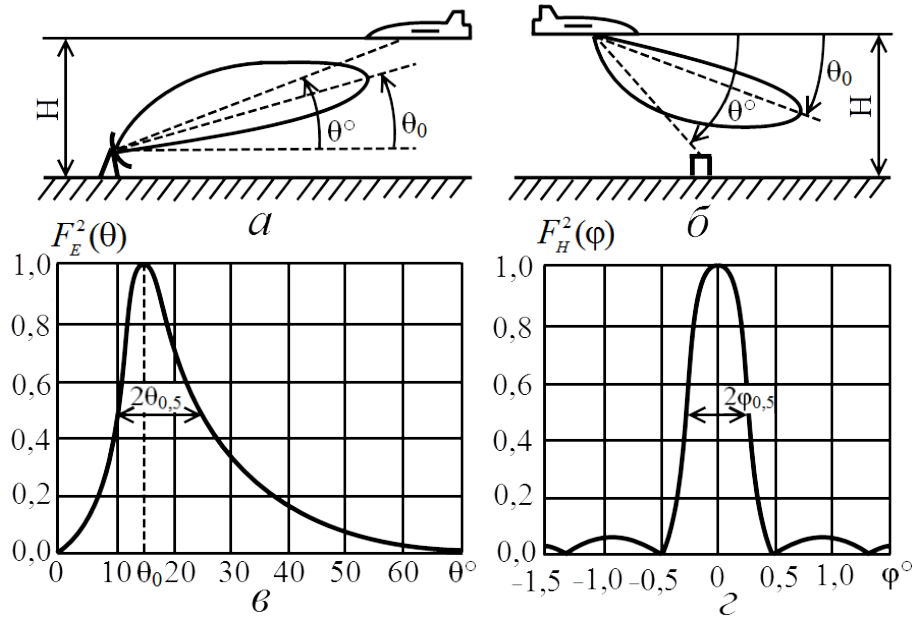


Рис. 2.1. Косекансна ДС.

Існує чотири методи формування косекансної ДС:

- 1) метод парціальних діаграм;
- 2) за допомогою металеві розсіювальної смужки, розміщеної перед дзеркалом;
- 3) застосовуючи розсіювальний виступ у параболічному дзеркалі;
- 4) за допомогою циліндричного дзеркала спеціальної форми.

Метод парціальних діаграм

При цьому методі косекансна ДС формується опроміненням параболічного дзеркала решіткою опромінювачів. Один із опромінювачів розміщений у фокусі параболоїда, а інші зміщені в напрямку, перпендикулярному до осі дзеркала (рис. 2.2). Кожен опромінювач разом із дзеркалом формує свою парціальну ДС. Загальна ДС антени отримується внаслідок додавання парціальних ДС, враховуючи фазові співвідношення їх полів.

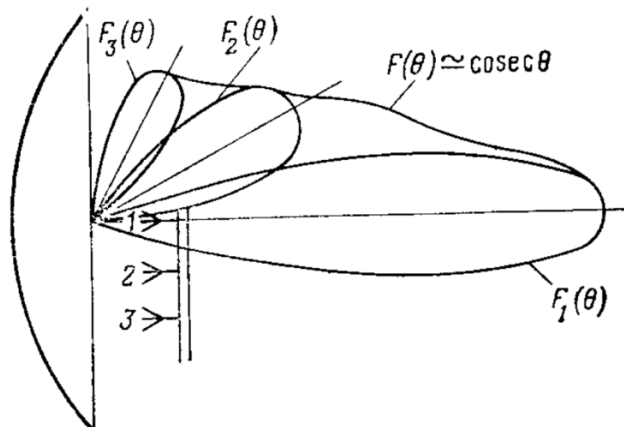


Рис. 2.2. Формування косекансної ДС методом парціальних діаграм.

Розміщений у фокусі дзеркала опромінювач формує основну частину косекансної ДС, яка відповідає області її максимуму. Зміщені з фокуса опромінювачі створюють парціальні ДС, які є відхиленими від осі параболічного дзеркала. При правильному виборі кількості та положення опромінювачів і їх належному збудженні формується результуюча ДС, яка є близькою до косекансної.

Перевагою методу парціальних діаграм є простота конструктивної реалізації, оскільки використовуються точкові опромінювачі замість лінійних. До недоліків цього методу формування косекансної ДС належить “порізаність” сумарної ДС у вертикальній площині. У ній виникають суттєві провали через інтерференційні явища. Другим недоліком методу є різна ширина парціальних променів у горизонтальній площині, оскільки зміщення опромінювачів із фокуса приводить до погіршення фазового розподілу в горизонтальній площині. Унаслідок цього результуюча ДС в косекансній частині буде ширшою, ніж в області максимуму.

Використання розсіювальної смужки перед дзеркалом

Наближено косекансну ДС можна представити як суму двох ДС. Одна з них є гострою із шириною головної пелюстки в декілька градусів. Інша ДС є тупою із шириною головної пелюстки в кілька десятків градусів. Напрямки максимумів цих ДС зміщені на деякий кут, а відповідні їм поля зсунуті за фазою на 90° (рис. 2.3).

Фазовий зсув на 90° потрібен для того, щоб поля двох ДС додавались у квадратурі. При цьому поля будуть додаватись незалежно від знаку фази пелюсток ДС, що значно спрощує створення результуючої ДС, форма якої близька до косекансної.

Представлення косекансної ДС у такій формі лежить у основі методу її отримання за допомогою параболічного дзеркала і розміщеної перед ним пластини. Структура антени показана на рис. 2.4. Дзеркалом антени може бути обрізаний параболоїд або параболічний циліндр. Перед дзеркалом

установлюється металева смужка невеликої ширини, розміщена таким чином, що фокальна вісь лежить на її поверхні. Гостру ДС формує дзеркало, а тупу — металева смужка.

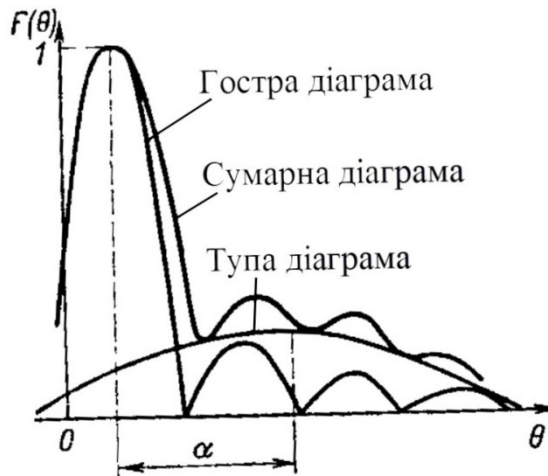


Рис. 2.3. Представлення косекансної ДС у вигляді суми гострої та тупої ДС.

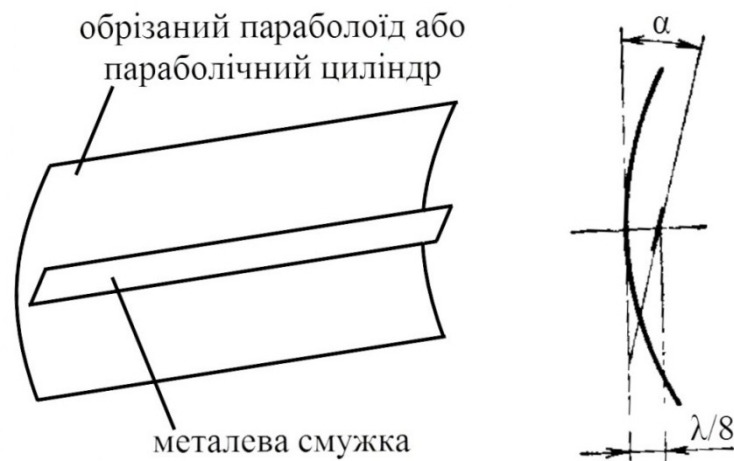


Рис. 2.4. Дзеркальна антена із розсіювальною смужкою для формування косекансної ДС.

Для того, щоб поля, відбиті від дзеркала і від смужки, додавались у квадратурі, відстань між дзеркалом і смужкою повинна становити приблизно $\lambda/8$. Ширина смужки вибирається таким чином, щоб забезпечити потрібний рівень відбитого від неї поля. Необхідне зміщення максимумів випромінювання дзеркала і смужки забезпечується нахилом смужки на відповідний кут (рис. 2.4). Для ілюстрації на рис. 2.5 показані розрахована ДС антени такого типу та ідеальна косекансна ДС.

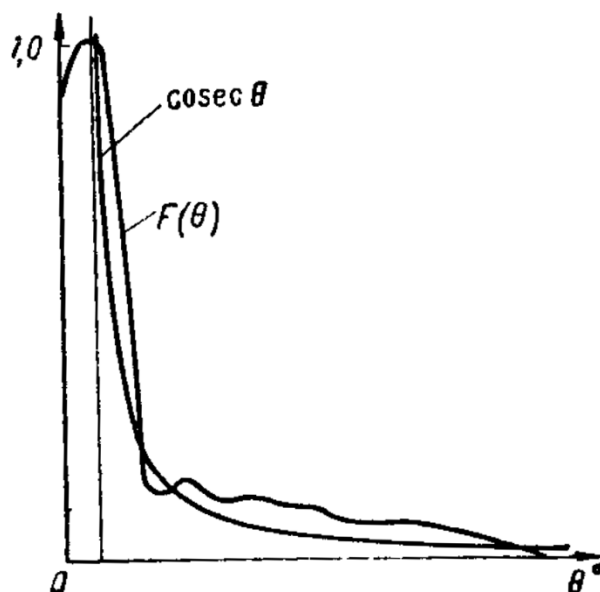


Рис. 2.5. Розрахована сумарна ДС дзеркала зі смужкою та ідеальна косекансна ДС.

Параболічне дзеркало з розсіювальним виступом

Дзеркало антени такого типу показано на рис. 2.6. У цій антені частина параболічного дзеркала замінена сферо-параболічною поверхнею. Вона отримується внаслідок обертання твірної параболоїди ABC навколо горизонтальної лінії, яка перпендикулярна оптичній вісі дзеркала і проходить через фокус параболоїди (рис. 2.6). Верхня частина дзеркала формує головну пелюстку ДС, а нижня частина (виступ) — її косекансну частину.

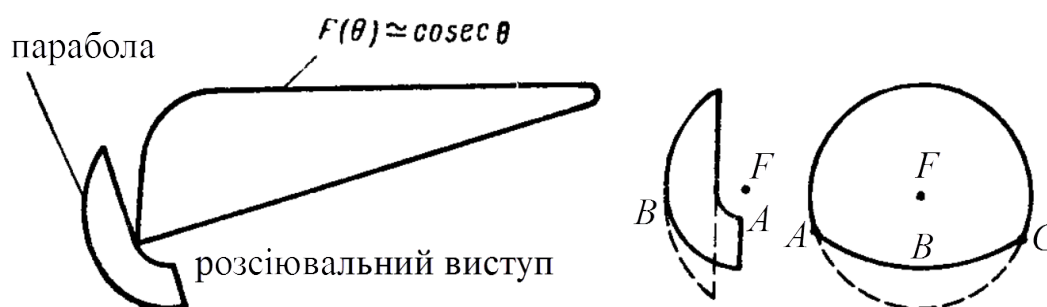


Рис. 2.6. Форма параболічного дзеркала з розсіювальним виступом і сформована ДС.

Розрахунок такої антени виконують методом послідовних наближень. Виходячи з необхідної ширини ДС у горизонтальній площині, визначають параметри параболоїди. Після цього нижню (або верхню) частину параболоїди

заміняють виступом і розраховують розподіл амплітуди і фази поля в розкриві антени. Потім апертурним методом розраховують ДС і порівнюють її з ідеальною косекансною ДС. Якщо відхилення між ДС перевищують допустимі, то розмір і форма виступу коригуються і розрахунки повторюються.

Циліндричне дзеркало спеціальної форми

Косекансну ДС можна отримати за допомогою циліндричного дзеркала, кривизна якого змінюється за спеціальним законом. Наближено форму кривої поперечного перерізу циліндричного дзеркала можна знайти методом геометричної оптики.

На рис. 2.7 показаний поперечний переріз дзеркала і лінійного опромінювача. Він орієнтується таким чином, щоб найбільш інтенсивно опромінювати нижню частину дзеркала, оскільки саме вона формує головну частину результуючої косекансної ДС. Через це максимум ДС опромінювача спрямований вниз під кутом $15\text{--}25^\circ$. Позначимо як F точку в розкриві опромінювача, а як ρ — радіус-вектор, проведений із точки F до будь-якої точки кривої. Тоді рівняння кривої поперечного перерізу дзеркала має вид:

$$\rho(\psi) = \rho_0 \cdot \exp \left[\int_0^\psi \operatorname{tg} \frac{\psi - \theta(\psi)}{2} d\psi \right].$$

$$\text{Функція } \theta(\psi) \text{ задається виразом } \theta(\psi) = \operatorname{arccctg} \left[\operatorname{ctg} \theta_1 + \frac{\operatorname{ctg} \theta_2 - \operatorname{ctg} \theta_1}{\int_{\psi_1}^{\psi_2} F^2(\psi) d\psi} \int_{\psi_1}^{\psi} F^2(\psi) d\psi \right], \text{ де}$$

$F(\psi)$ — ДС опромінювача. Інші позначення показані на рис. 8. Додатний напрямок відліку кутів відповідає обертанню за годинниковою стрілкою. Вертикальний розмір розкриву дзеркала $L \geq (15\text{--}20) \cdot \lambda$.

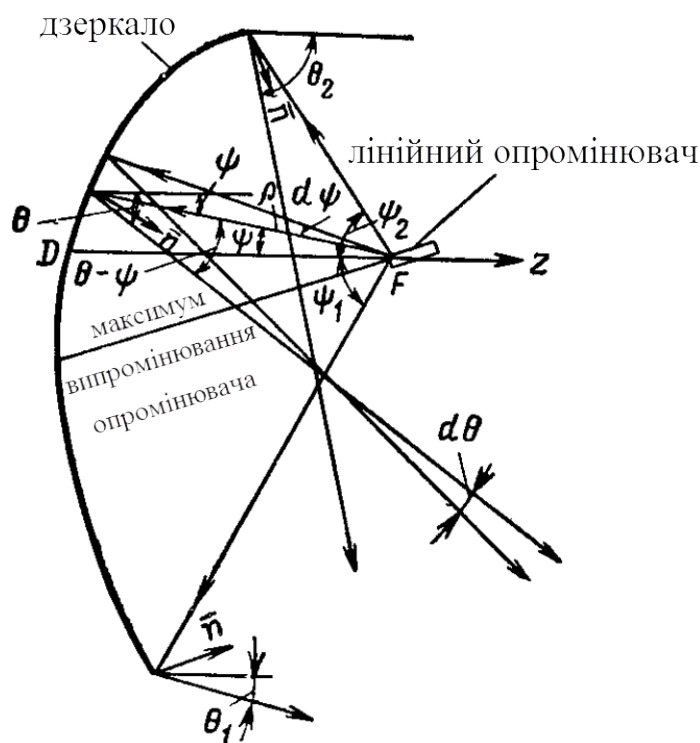


Рис. 2.7. Поперечний переріз циліндричного дзеркала, яке формує косекансну ДС.

Форма нижньої частини твірної дзеркала є близькою до параболи з фокусом у точці F і віссю, паралельною до променя, відбитого в напрямі θ_1 (рис. 2.7). Ця частина дзеркала збирає пучок променів, які розходяться від опромінювача, в паралельний пучок, який формує максимум результуючої ДС. Верхня частина дзеркала є розсіювальною, вона створює косекансну частину ДС. Вузька ДС в горизонтальній площині формується лінійним опромінювачем, горизонтальний розмір якого визначає ширину ДС за азимутом. Як лінійний опромінювач використовують сегментно-параболічну антену або металево-пластинчасті лінзи.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити теоретичні відомості.
2. Ознайомитись із конструкцією антени, яка досліджується експериментально.
3. Зняти діаграми спрямованості антени в горизонтальній та вертикальній площинах.
4. Знаючи розміри розкриву антени та ширини головної пелюстки ДС за рівнем -3 дБ, розрахувати коефіцієнт використання поверхні антени з косекансною ДС.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Теоретичні відомості про антени з косекансною ДС і методи її формування.
3. Схема вимірювання діаграми спрямованості.
4. Характеристики приладів, які використані при виконанні лабораторної роботи.
5. Експериментально зняті діаграми спрямованості і розрахований КВП антени.
6. Висновки.

Контрольні запитання

1. Яка ДС називається косекансною? Яка її перевага над ДС інших форм?
2. Які існують методи формування косекансної ДС? Які їх переваги та недоліки?
3. Які дзеркала застосовують для формування косекансних діаграм спрямованості?
4. Які конструкції опромінювачів антен із косекансною ДС? Якими є їх власні ДС?
5. Де застосовуються антени із косекансною діаграмою спрямованості?

Список рекомендованої літератури

1. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. Издание 2-е, доп. и переработ. — М.: Советское радио, 1974. — 536 с.
2. Бова Н. Т., Резников Г. Б. Антенны и устройства СВЧ. 2-е изд., перераб. и доп. — К.: Вища школа. Головноеизд-во, 1982. — 278 с.
3. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д. И. Воскресенского. Издание 2-е, дополненное и переработанное. — М.: Радиотехника, 2006. — 376 с.

Лабораторна робота № 3

Дослідження антени із частотним скануванням

Мета роботи: вивчити принципи побудови хвилевідно-щілинних антенних решіток із частотним скануванням, експериментально дослідити характеристики діаграми спрямованості та узгодження лінійної хвилевідно-щілинної антенної решітки з частотним скануванням.

Теоретичні відомості

Частотне сканування — це спосіб керування напрямком головної пелюстки діаграми спрямованості лише за рахунок зміни робочої частоти збуджуючого генератора. Оскільки при цьому антена залишається суто пасивним пристроєм, такий безінерційний спосіб сканування променем є найбільш дешевим та надійним у порівнянні з іншими способами, наприклад такими, як фазування випромінювачів за допомогою фазообертачів. Антенні решітки із частотним скануванням широко використовують у радарній техніці сантиметрового та міліметрового діапазонів. Класичним прикладом антен з частотним скануванням є нерезонансні хвилевідно-щілинні антенні решітки (ХЩАР). До переваг ХЩАР відносять їх малий профіль, високий рівень допустимої вхідної потужності, малі втрати та можливість отримати низький рівень бічних пелюсток ≈ 30 дБ з а рахунок синтезу спадаючого від центру до країв апертури амплітудного розподілу поля.

Із електродинаміки відомо, що для того, щоб щілина, прорізана в металевій стінці прямокутного хвилеводу, випромінювала, вона повинна перетинати лінії поверхневого струму, який наводиться на стінках хвилеводу. На рис. 3.1а показані силові лінії поверхневого струму на внутрішній поверхні металевих стінок для випадку поширення основної хвилі типу H_{10} уздовж прямокутного хвилеводу у фіксований моменту часу. Різні типи випромінювальних щілин, які найчастіше використовуються на практиці при побудові ХЩАР, схематично зображені на рис. 3.1б.

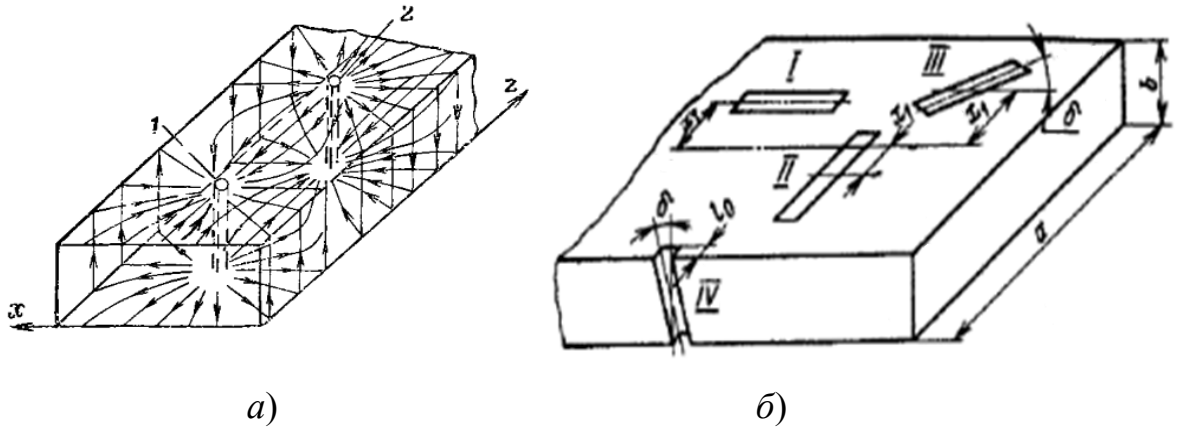


Рис. 3.1. Прямокутний хвилевід: а) поверхневий струм на стінках для хвилі H_{10} ; б) типи випромінювальних щілин (хвилевід розвернуто на 90°).

Розглянемо побудову ХЦАР на основі поздовжніх щілин на широкій стінці прямокутного хвилеводу (щілина типу I на рис. 3.1б). Випромінювана такою щілиною потужність зростає при збільшенні її зміщення хвiдносно середини хвилеводу в область, де поперечні струми більші. Крім того, ця потужність зростає, коли довжина щілини прямує до резонансного значення $\lambda_0/2$, де λ_0 — довжина хвилі у вільному просторі. Діаграма спрямованості збудженої щілини типу I є доволі широкою і подібною до діаграми спрямованості півхвильового вібратора (рис. 3.2). Ширина діаграми спрямованості за рівнем $0,707$ (-3 дБ) у площині, перпендикулярній до осі хвилеводу (E -площині), дорівнює приблизно 140° , а в площині, утвореній віссю хвилеводу та нормаллю до широкої стінки (H -площині), — приблизно 70° .

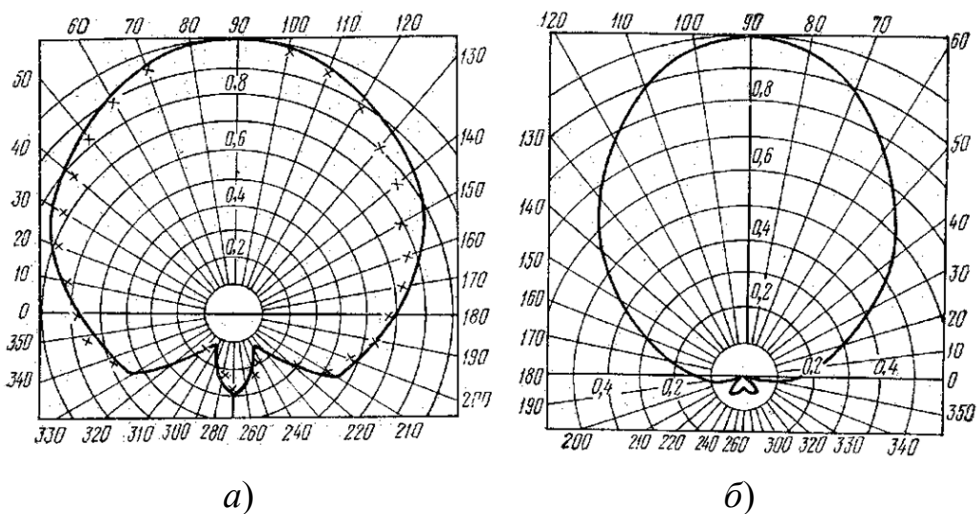


Рис. 3.2. Діаграма спрямованості щілини типу I (див. рис. 3.1б): а) в E -площині; б) в H -площині.

Для збільшення коефіцієнта спрямованої дії створюють багатощілинні лінійні або двовимірні ХЩАР. Лінійна ХЩАР, у якій наявний ефект частотного сканування, схематично зображена на рис. 3.3. Конструктивно ця ХЩАР є секцією прямокутного хвилеводу, в якому на певній відстані прорізани поздовжні щілини. Вони розташовані в шаховому порядку відносно середини широкої стінки хвилеводу, що дозволяє розташувати їх на відстанях менших λ_0 із метою уникнення появи вторинного максимуму діаграми спрямованості ХЩАР. На кінці хвилеводу розташовують поглинач або узгоджене навантаження для забезпечення режиму біжної хвилі. Зміщення щілин від центру x підбирають таким чином, щоб вони випромінювали приблизно однакову потужність. Часто умисно формують певний амплітудний розподіл уздовж ХЩАР (наприклад, типу \cos^2 або гаусовий) із метою зниження рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості.

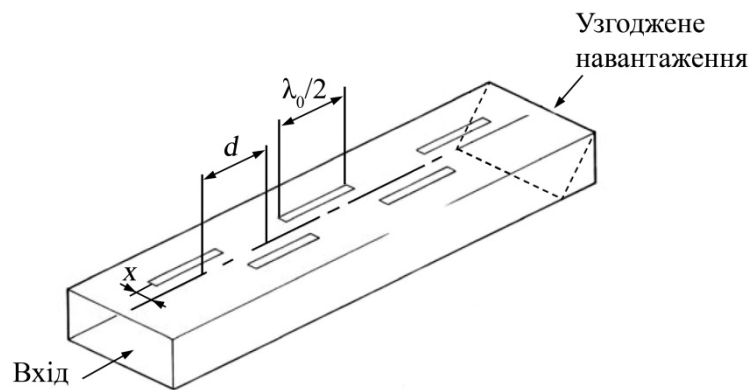


Рис. 3.3. Лінійна ХЩАР із поздовжніми щілинами на широкій стінці хвилеводу.

У першому наближенні для аналізу ХЩАР застосовують теорію лінійних еквідистантних рівноамплітудних антенних решіток, тобто нехтують взаємним впливом між щілинами, а діаграму спрямованості ХЩАР в H -площині описують відомою формулою:

$$F(\theta) = F_0(\theta) \cdot F_p(\theta) = F_0(\theta) \cdot \frac{\sin\left[\frac{N}{2}(kd \sin \theta - \Delta\psi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(kd \sin \theta - \Delta\psi)\right]}, \quad (3.1)$$

де $F_0(\theta)$ — діаграма спрямованості щілини в площині решітки (H -площині), $F_p(\theta)$ — множник решітки, N — кількість щілин, $k = 2\pi/\lambda_0$ — хвильове число у вільному просторі, d — відстань між щілинами, $\Delta\Psi$ — зсув фаз між сусідніми щілинами.

Орієнтація головної пелюстки діаграми спрямованості ХЩАР (рис. 3.3) як функція частоти чи довжини хвилі визначається за формулою:

$$\sin \theta_{\text{гол}} = \frac{\Delta\Psi}{kd} = \frac{\beta_{\text{хв}}d - \pi}{kd} = \frac{\beta_{\text{хв}}}{k} - \frac{\lambda_0}{2d}, \quad (3.2)$$

де $\beta_{\text{хв}} = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{хв}}}$ — стала поширення хвилі у хвилеводі, $\lambda_{\text{хв}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}}$ — довжина

хвилі у хвилеводі із розміром широкої стінки a . Відмітимо, що в чисельнику формули (3.2) різниця фаз між сусідніми щілинами містить частотно-залежну складову $\beta_{\text{хв}}d$ і постійну $-\pi$ внаслідок шахового розташування, тобто змінно-фазового живлення сусідніх щілин. Зміна фаз між сусідніми елементами згідно (3.2) приводить до частотно-залежного відхилення головного променя, тобто до частотного сканування. Якщо виконується умова: $d < \frac{\lambda_0}{1 + |\sin \theta_{\text{гол}}|}$, то в діаграмі спрямованості решітки відсутні побічні максимуми.

Куточастотною чутливістю антени називають швидкість зміни положення головного променя антени в просторі при зміні частоти $A = \frac{\partial\theta}{\partial\lambda/\lambda}$. Вона вимірюється в одиницях $\text{°}/\%$. Для простих лінійних ХЩАР (рис. 3.3) куточастотна чутливість визначається формулою:

$$A = \frac{0,573}{\cos \theta_{\text{гол}}} (-\gamma_{\text{гр}} + \sin \theta_{\text{гол}}). \quad (3.3)$$

Сповільнення групової швидкості в прямокутному хвилеводі $\gamma_{\text{гр}} = c/v_{\text{гр}} = 1/\sqrt{1 - (\lambda_0/2a)^2}$ на практиці становить 1,15...2,8. Тому A не перевищує значень 0,5...1,5 $\text{°}/\%$ зміни частоти. У свою чергу робоча смуга частот ХЩАР обмежується вузькою робочою смугою частот щілинного випромінювача, яка в кращому випадку не перевищує 10%. Як наслідок, якісне частотне сканування в простих лінійних ХЩАР може бути отримане в секторі кутів до 15° .

Способи підвищення куточастотної чутливості ХЩАР

У радарних системах бажано мати кутовий сектор частотного сканування, не менший за $\pm 30^\circ$. Для досягнення таких широких секторів сканування часто використовують змієподібні живлячі хвилеводи або синусоїдні фідери (рис. 3.4). Випромінювачі приєднуються до такого фідера за допомогою спрямованих відгалужувачів. Чим більше відношення s/d у змієподібному хвилеводі, тим більше змінюється зсув фаз $\Delta\psi$ між сусідніми випромінювальними елементами і, відповідно, тим сильніше відхиляється промінь при зміні частоти. При цьому параметр A збільшується приблизно в s/d разів:

$$A = \frac{0,573}{\cos \theta_{\text{гол}}} \left(-\frac{s}{d} \gamma_{\text{гр}} + \sin \theta_{\text{гол}} \right). \quad (3.4)$$

Відхилення променя в площині розташування змієподібного хвилеводу визначається за формулою:

$$\sin \theta_{\text{гол}} = \frac{s}{d} \gamma_{\phi} - \frac{p\lambda_0}{d}, \quad (3.5)$$

де $\gamma_{\phi} = c/v_{\phi}$ — сповільнення фазової швидкості у змієподібному хвилеводі, $p = n - \phi/2\pi$, ϕ — постійний зсув фаз між сусідніми елементами, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ — номер променя. При розрахунках номер променя n підбирають таким чином, щоб він знаходився в області дійсних кутів, тобто $|\sin \theta_{\text{гол}}| \leq 1$. Із виразів (3.4), (3.5) можна отримати вирази (3.2), (3.3), якщо прийняти $s/d = 1$, $\phi = -\pi$, $n = 0$ для випадку ХЩАР на основі прямолінійного хвилеводу (рис. 3.3).

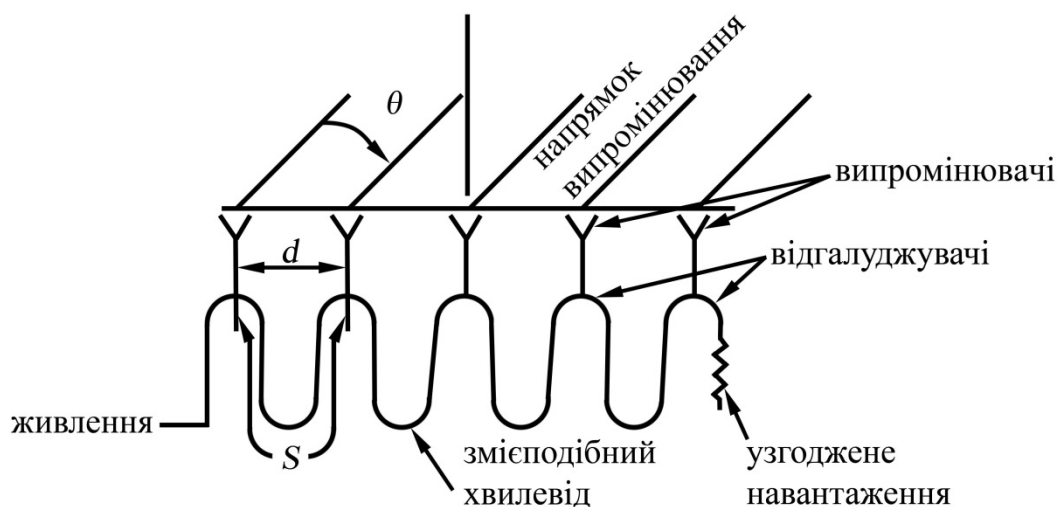


Рис. 3.4. Живлення випромінювачів за допомогою змієподібних хвилеводів.

Варто зазначити, що до недоліків змієподібних хвилеводів слід віднести їх значно більші габаритні розміри та вагу, складність виготовлення та більші омичні втрати. Часто сам по собі змієподібний хвилевід живить не окремий випромінювач, а лінійну підрешітку для отримання плоскої антенної решітки із високим коефіцієнтом підсилення та частотне сканування в одній площині. На рис. 3.5 представлено зовнішній вигляд фідерної системи з підвищеною кутчастотною чутливістю на основі змієподібного хвилеводу для живлення лінійних антенних підрешіток.

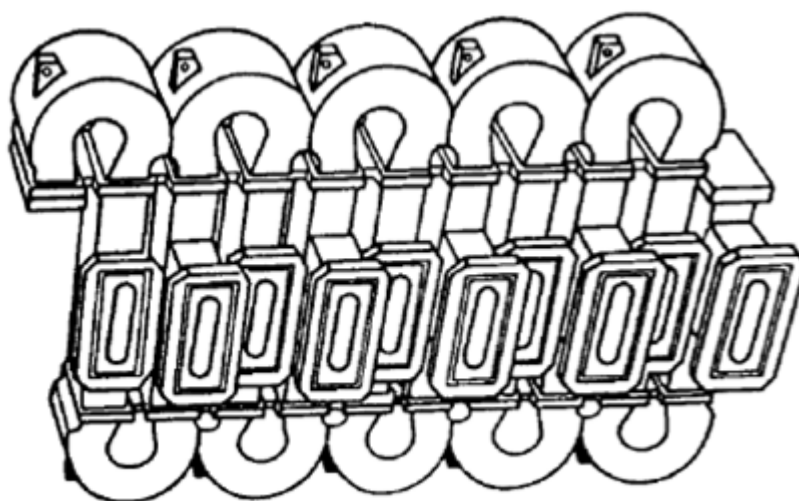


Рис. 3.5. Змієподібний хвилевід із підвищеною кутчастотною чутливістю.

Із виразу (3.4) випливає, що збільшити кутчастотну чутливість також можливо, якщо обрати прямолінійний хвилевід ($s/d = 1$) та використати в головному тракті сповільнювальну систему з великим коефіцієнтом сповільнення групової швидкості, наприклад $c/v_{гр} > 5$. Утім, виявляється, що при будь-якому способі збільшення кутчастотної чутливості збільшуються омичні втрати потужності в головному тракті.

Антенна, що досліджується в лабораторії, — це ХЦАР зі змінно-фазованими щілинами (рис. 3.3), які прорізані в широкій стінці прямокутного хвилеводу. Вони збуджуються поздовжньою складовою магнітного поля хвилі H_{10} . Для одержання режиму біжної хвилі вкінці хвилеводу встановлене узгоджене навантаження.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити теоретичні відомості.
2. Ознайомитись із приладами, що використовуються в лабораторній роботі.
3. Вивчити конструкцію антени, яка досліджується в лабораторній роботі. Схематично замалювати її в протокол виконання роботи, позначивши її розміри в міліметрах: поперечний переріз хвилеводу, довжину та ширину випромінювальних щілин, відстань між ними. Замалювати в протокол пристрій збудження ХЩАР.
4. Знаючи розміри ХЩАР, розрахувати напрямок головної пелюстки діаграми спрямованості на частотах 9 ГГц, 9,5 ГГц, 10 ГГц, 10,5 ГГц, 11 ГГц.
5. Зняти діаграму спрямованості ХЩАР, використовуючи лабораторний стенд, на тих самих частотах, що в п.4. На отриманих діаграмах позначити частоту, напрямок головної пелюстки діаграми спрямованості з точністю 1° , ширину головної пелюстки за рівнем 3 дБ. Порівняти експериментальні результати з теоретичними.
6. Замалювати схему вимірювання діаграм спрямованості ХЩАР у протокол.
7. Виміряти та побудувати графік залежності КСХН антени від частоти в діапазоні частот 8...12 ГГц.
8. Замалювати схему вимірювання частотної залежності КСХН ХЩАР у протокол.
9. Зробити висновки та записати їх у протокол.

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. Теоретичні відомості про антенні решітки із частотним скануванням.
3. Конструкція і розміри ХЩАР, яка досліджується в лабораторній роботі.
4. Схеми вимірювання діаграм спрямованості та частотної залежності КСХН.
5. Характеристики приладів, які використані при виконанні роботи.
6. Експериментально зняті діаграми спрямованості та частотна залежність КСХН.
7. Висновки.

Контрольні запитання

1. Дайте визначення частотного сканування. Де воно використовується?
2. Зобразіть випромінювальні та невипромінювальні щілини у прямокутному хвилеводі. Якою є діаграма спрямованості випромінювальної щілини?
3. Які є види хвилевідно-щілинних антенних решіток? Зобразіть їх конструкції.
4. Від чого залежить орієнтація головної пелюстки діаграми спрямованості прямолінійної системи випромінювачів?
5. Поясніть принцип роботи ХЦАР з частотним скануванням.
6. Чому в досліджуваній хвилевідно-щілинній антенній решітці сусідні щілини, які розміщені по обидва боки від середини хвилеводу, зміщені на відстань $\lambda_{\text{хв}}/2$?
7. Що називають куточастотною чутливістю антени? Які існують способи підвищення куточастотної чутливості?

Список рекомендованої літератури

1. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны: Учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1975. — 528 с.
2. Бова Н. Т., Резников Г. Б. Антенны и устройства СВЧ. 2-е издание, перераб. и доп. — К.: Вища школа. Головное изд-во, 1982. — 278 с.
3. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнических специальностей вузов. — М.: Высшая школа, 1988. — 432 с.
4. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д. И. Воскресенского. Издание 2-е, дополненное и переработанное. — М.: Радиотехника, 2006. — 376 с.
5. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учебное пособие для вузов / под ред. Д. И. Воскресенского. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Радиотехника, 2012. — 744 с.
6. Расчет и измерение характеристик устройств СВЧ и антенн: Учебное пособие / Ю.Е. Мительман, Р.Р. Абдуллин, С.Г. Сычугов, С.Н. Шабунин. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 140 с.

Лабораторна робота № 4

Дослідження смужкових антен

Мета роботи: ознайомитись із принципами побудови смужкових випромінювачів та антенних решіток на їх основі.

Теоретичні відомості

Важливою перевагою смужкових (мікросмужкових) антен є легкість і компактність конструкції, а також добре розвинена друкована технологія їх виготовлення. Випромінювальним елементом смужкової антени є відкритий смужковий резонатор (рис. 4.1). Він складається з металевої смужки, яка розташована на екранованій діелектричній підкладці товщиною h із діелектричною проникністю. У найпростішому випадку такий резонатор збуджують за допомогою несиметричної мікросмужкової лінії. При цьому в резонаторі встановлюється режим стійних хвиль, коли вздовж його довжини L уміщується одна варіація поля (рис. 4.1, 4.2). На рис. 4.1 стрілками показані вектори електричного поля на протилежних випромінювальних краях резонатора. При резонансі ці вектори є співнапрямленими і синфазними. Краї резонатора можуть бути представлені у вигляді двох щілинних випромінювачів, розташованих на відстані L , у яких збуджується магнітний струм. Коефіцієнт підсилення такої антени знаходиться в межах 5–7 дБ. При цьому ширина діаграми спрямованості в E - та H -площині складає приблизно 90° . Недоліком смужкових антен є вузька робоча смуга частот (не ширша кількох відсотків). Робоча смуга частот смужкового резонатора може бути розширена, якщо збільшити товщину підкладки або зменшити її діелектричну проникність, але при цьому збільшується паразитне випромінювання живлячих смужкових ліній.

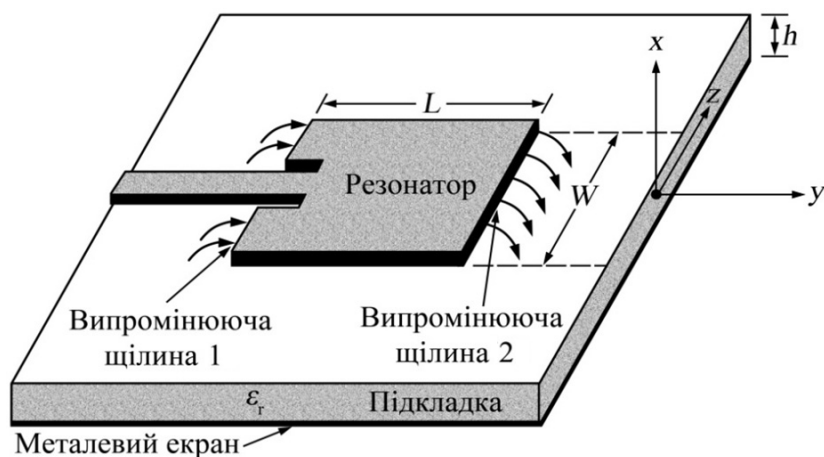


Рис. 4.1. Смушковий випромінювальний резонатор.

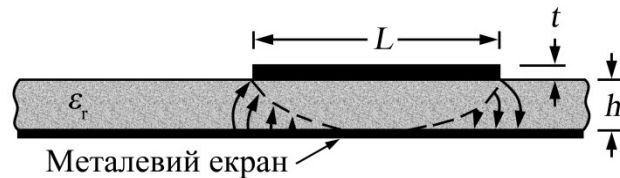


Рис. 4.2. Структура електричного поля у смужковому резонаторі (вид збоку).

Проектування смужкових антен відносять до складних багатоваріантних інженерних задач, які в наш час вирішуються шляхом застосування програмних пакетів для електродинамічного аналізу планарних структур (HFSS або CST Microwave Studio).

Наближено оцінити оптимальні розміри смужкової антени, конфігурація якої показана на рис. 1, можна за наступною методикою. Спочатку розраховують ширину W мікросмужкового резонатора, користуючись емпіричною формулою:

$$W = \frac{\lambda_0}{2} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon + 1}}, \quad (4.1)$$

де λ_0 — довжина хвилі у вільному просторі на резонансній частоті, ε — відносна діелектрична проникність матеріалу підкладки.

Використовуючи (4.1), знаходять ефективне значення діелектричної проникності смужкового резонатора:

$$\varepsilon_{\text{еф}} = \frac{\varepsilon + 1}{2} + \frac{\varepsilon - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}. \quad (4.2)$$

Викривлення електричної компоненти поля в області випромінювальних щілин спричиняє ефект укорочення поздовжнього резонансного розміру L смужкового резонатора на величину $2\Delta L$ відносно півхвильового розміру:

$$\Delta L = 0,412 \cdot h \cdot \frac{(\varepsilon_{\text{еф}} + 0,3) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,264 \right)}{(\varepsilon_{\text{еф}} - 0,258) \cdot \left(\frac{W}{h} + 0,8 \right)}. \quad (4.3)$$

Тоді скоректоване значення довжини резонатора дорівнює:

$$L = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\varepsilon_{\text{еф}}}} - 2\Delta L. \quad (4.4)$$

Із метою зменшення випромінювання фідерних мікросмужкових ліній застосовують інші способи живлення:

1) Живлення за допомогою коаксіального зонда (рис. 4.3). У цьому випадку коаксіальна фідерна система відокремлена від мікросмужкового випромінювача за допомогою провідної площини. Це дозволяє зменшити випромінювання фідерних ліній. Недоліком такого живлення є необхідність виготовлення зонда (не дуже технологічна операція). Окрім цього, коаксіальний зонд вносить додаткову індуктивність, опір якої зростає зі зростанням частоти.

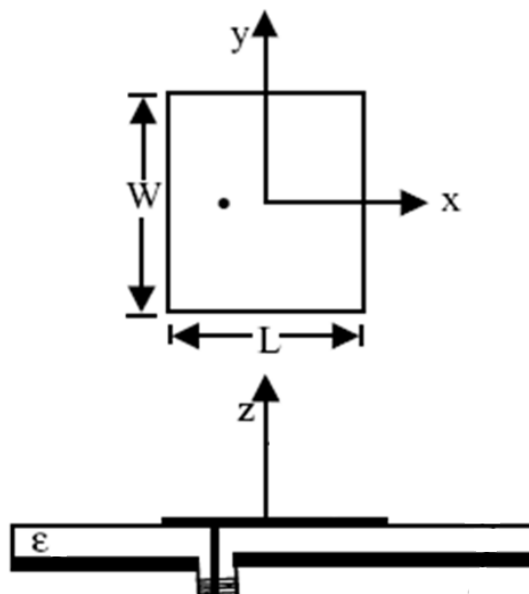


Рис. 4.3. Живлення мікросмужкового резонатора за допомогою зонда.

2) Живлення за допомогою щілинної апертури (рис. 4.4.). При такому живленні використовують дві підкладки: одну — для мікросмужкової лінії, повернутої у просторі, другу — для мікросмужкового резонатора. Підкладки розділені провідною площиною, в якій витравлено щілинну апертуру для зв'язку мікросмужкової лінії та резонатора. виготовлення такої антени дещо простіше порівняно із попередньою. При цьому зберігається можливість незалежного підбору параметрів підкладки для мікросмужкової лінії і для випромінювального смужкового резонатора. Варто зазначити, що щілинна апертура випромінює частину сигналу вниз (під антену), що дещо знижує коефіцієнт підсилення мікросмужкової антени із таким живленням.

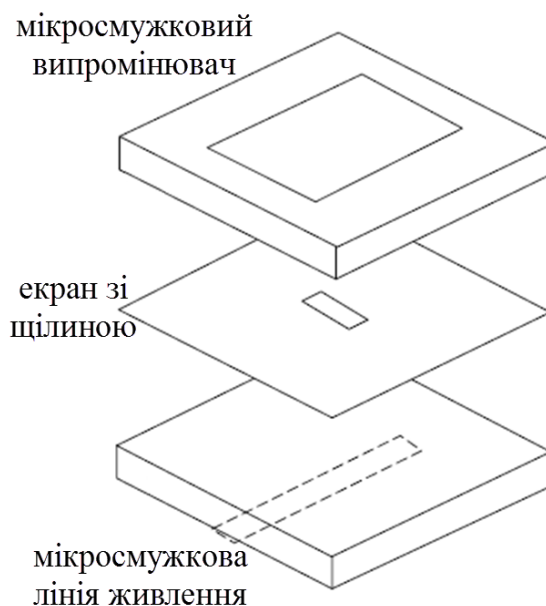


Рис. 4.4. Живлення мікросмужкового резонатора за допомогою щілинної апертури.

3) Живлення за допомогою ємнісного зв'язку мікросмушкової лінії та резонатора показано на рис. 4.5. У цьому випадку мікросмушкова лінія та резонатор знаходяться на різній відстані від екрану, що дозволяє збільшити робочу смугу частот резонатора, не збільшуючи при цьому паразитне випромінювання мікросмушкової лінії.

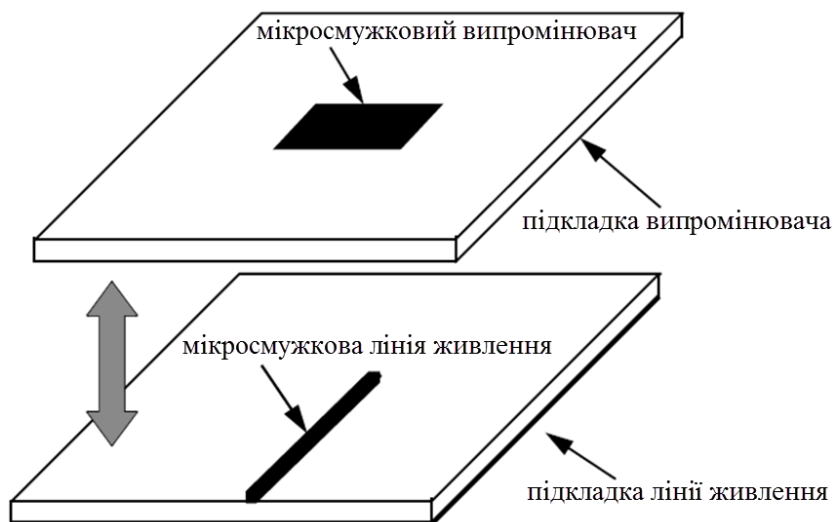


Рис. 4.5. Живлення мікросмушкового випромінювача за допомогою ємнісного зв'язку.

4) Найбільш радикальним методом розширення робочої смуги частот є застосування дворезонаторних смужкових випромінювачів, у яких смужки різної довжини розташовані одна над іншою. Нижній смужковий резонатор має меншу резонансну частоту, ніж верхній. Це призводить до створення зв'язаної дворезонансної системи, яка загалом має більш широку смугу частот. Приклади таких антен із робочою смугою частот до 30% з живленням за допомогою копланарної лінії та щілинної апертури показані на рис. 4.6 і 4.7, відповідно.

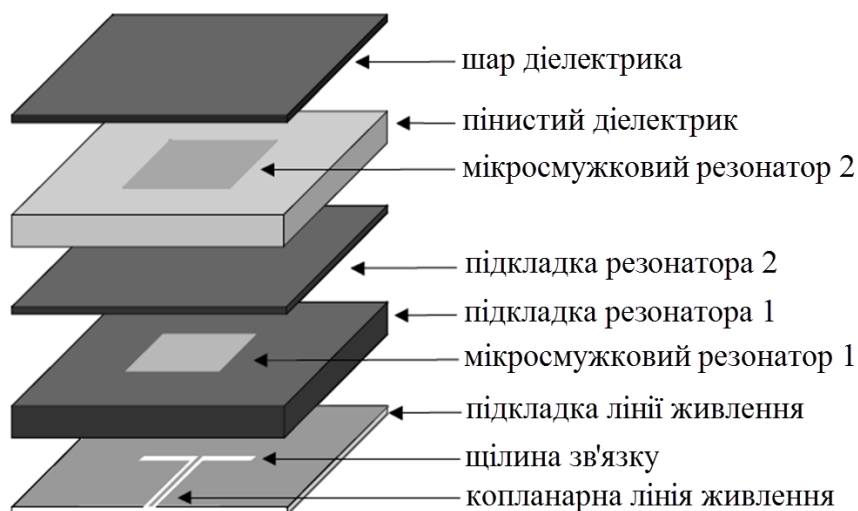


Рис. 4.6. Широкопasmовий дворезонаторний смужковий випромінювач із живленням за допомогою копланарної лінії.

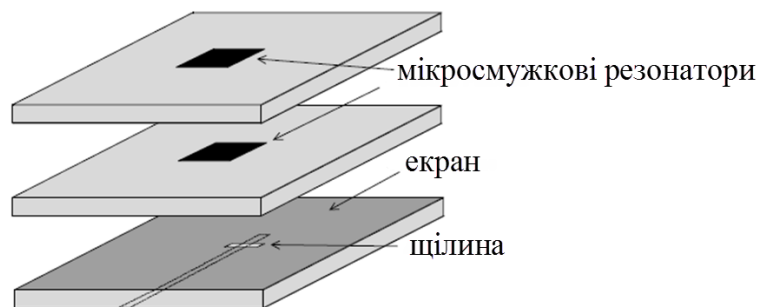


Рис. 4.7. Широкопasmовий дворезонаторний смужковий випромінювач із живленням за допомогою щілинної апертури.

Для отримання більш високого коефіцієнта підсилення мікросмушкові випромінювачі об'єднують, використовуючи паралельну схему (рис. 4.8). При цьому слід застосовувати мікросмушкові реактивні подільники потужності на основі чвертьхвильових трансформаторів. На рис. 4.9 показано геометрію чотириелементної смужкової антенної решітки на основі дворезонаторних смужкових випромінювачів, яка досліджується експериментально в даній роботі.

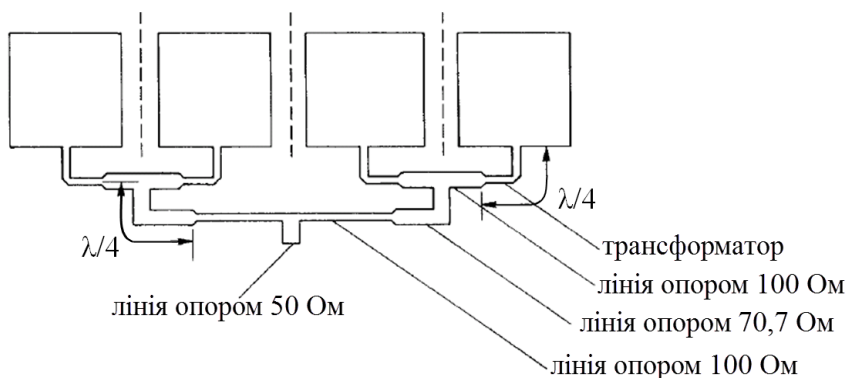


Рис. 4.8. Паралельний тип живлення антенної решітки на основі смужкових резонаторів.

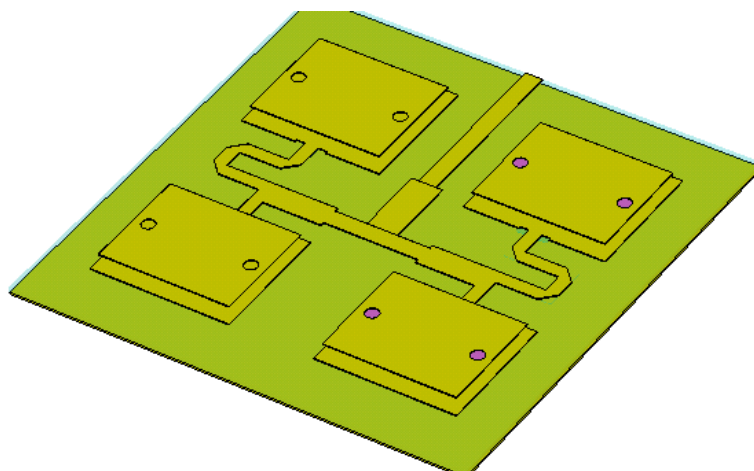


Рис. 4.9. Геометрія чотириелементної (2×2) антенної решітки із паралельним живленням на основі дворезонаторних смужкових випромінювачів.

У лабораторній роботі досліджуються характеристики трьох смужкових антен: мікросмужкової антени на діелектричній підкладці; дворезонаторної смужкової антени із повітряним заповненням; чотириелементної смужкової антенної решітки, яка також не містить діелектричної підкладки. Усі досліджувані антени розроблені для роботи в діапазоні частот 2,4–2,5 ГГц і можуть бути використані в мережах Wi-Fi.

Порядок виконання роботи

1. Вивчити теоретичні відомості.
2. Ознайомитись із приладами, що використовуються в лабораторній роботі.
3. Вивчити конструкції зразків смужкових випромінювачів та антенної решітки.
4. Розрахувати розміри L та W мікросмужкового резонатора, використовуючи формули (4.1)–(4.4) із наступними вихідними даними: резонансна частота $f_0 = 2,45$ ГГц; діелектрична проникність підкладки $\epsilon = 4$; товщина діелектричної підкладки $h = 2$ мм.
5. Використовуючи панорамний вимірювач коефіцієнтів відбиття, зняти та побудувати частотні залежності КСХН трьох досліджуваних зразків смужкових антен у діапазоні частот 2,2–2,8 ГГц. На кривих КСХН позначити смуги частот за рівнем КСХН ≤ 2 .
6. Зняти в децибелах діаграми спрямованості в E - та H -площинах дворезонаторного смужкового випромінювача, виконаного в повітрі, на частоті 2,45 ГГц. Побудувати графіки діаграм спрямованості та позначити на них ширину головної пелюстки за рівнем -3 дБ. Дискрет вимірювання діаграми спрямованості 10° . Діапазон кутів $-90^\circ \dots +90^\circ$.
7. Аналогічно пункту 6 виміряти діаграми спрямованості в E - та H -площинах чотириелементної смужкової антенної решітки.
8. Виміряти в децибелах коефіцієнт підсилення чотириелементної смужкової антенної решітки відносно одного дворезонаторного смужкового випромінювача на одній частоті.
9. Зробити висновки та записати їх у протокол.

Зміст звіту

1. Мета роботи
2. Теоретичні відомості про смужкові випромінювачі та антенні решітки на їх основі.
3. Конструкції досліджуваних смужкових антен і їх розраховані розміри.
4. Схеми вимірювання діаграм спрямованості та частотних залежностей КСХН.
5. Характеристики приладів, які використані при виконанні лабораторної роботи.
6. Експериментально зняті діаграми спрямованості і частотні залежності КСХН.
7. Висновки.

Контрольні запитання

1. Якою є конструкція смужкового (мікросмужкового) випромінювального резонатора?
2. Які характеристики випромінювання має смужковий резонатор? Від чого залежить його робоча смуга частот?
3. Які є способи живлення смужкових випромінювачів? Які їх переваги та недоліки?
4. Які існують методи розширення робочої смуги частот смужкових антен?
5. Якими способами можна об'єднати смужкові випромінювачі в антенну решітку?

Список рекомендованої літератури

1. Бова Н. Т., Резников Г. Б. Антенны и устройства СВЧ. 2-е изд., перераб. и доп. — К.: Вища школа. Головное изд-во, 1982. — 278 с.
2. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ: Учебник для радиотехнических специальностей вузов. — М.: Высшая школа, 1988. — 432 с.

3. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д. И. Воскресенского. Издание 2-е, дополненное и переработанное. — М.: Радиотехника, 2006. — 376 с.
4. Нефедов Е. И. Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. 2-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2008. — 320 с.
5. Дубровка Ф. Ф., Мартинюк С. Е. Полосковая антенная решетка с воздушным заполнением // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. — 2009. — Вип. 38. — С. 61–64.
6. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток: Учеб. пособие для вузов / под ред. Д. И. Воскресенского. Изд. 4-е, перераб. и доп. — М.: Радиотехника, 2012. — 744 с.
7. Расчет и измерение характеристик устройств СВЧ и антенн: Учебное пособие / Ю. Е. Мительман, Р. Р. Абдуллин, С. Г. Сычугов, С. Н. Шабунин. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. — 140 с.