

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Оптимізація процедури проектування параболічної антени для  
супутникового телебачення

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РРм-61  
спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Степанюк

(підпис)

Степанюк М.Ю.

(прізвище та ініціали)

Керівник

Дедів

(підпис)

Дедів І.Ю.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Хвостівська

(підпис)

Хвостівська Л.В.

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри

Донець

(підпис)

Донець В.Л.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Дозорський

(підпис)

Дозорський В.Г.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії  
(повна назва факультету)

Кафедра радіотехнічних систем  
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

  
(підпис)

Дунець В.Л.

(прізвище та ініціали)

« 1 » грудня 2023 р.

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

Спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

Студенту Степанюк Мар'яні Юріївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи Оптимізація процедури проектування параболічної антени для супутникового забезпечення

Виконавця роботи Дедів Ірина Юріївна, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 01 » грудня 2023 року № 4/7-1135

Термін подання студентом завершеної роботи 11 грудня 2023 року

Вихідні дані до роботи Технічне завдання, процедура проектування параболічної антени

Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналітична частина



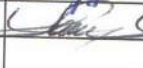

Основна частина

Науково-дослідна частина

Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

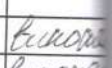
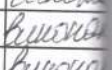
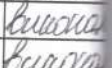
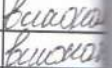
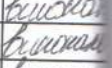
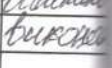
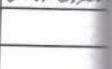
Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

6. Консультанти розділів роботи

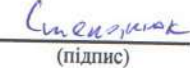
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	за п
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Стручок В.С., ст. викл. каф. ОХ		
	Клепчик В.М., ст. викл. каф. ОХ		

7. Дата видачі завдання 06 вересня 2023 року

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Прим
1	Аналіз завдання на кваліфікаційну роботу	06.09.2023	
2	Написання розділу 1	05.10.2023	
3	Написання розділу 2	21.10.2023	
4	Написання розділу 3	04.10.2023	
5	Написання розділу 4	18.11.2023	
6	Попередній захист	25.12.2023	
7	Захист	28.12.2023	

Студент

  
(підпис)

Степанюк Мар'яна Юріївна  
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

  
(підпис)

Дедів Ірина Юріївна  
(прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Оптимізація процедури проектування параболічної антени для супутникового телебачення // Кваліфікаційна робота магістра // Степанюк Мар'яна Юріївна // ТНТУ ім. І.Пулюя // Тернопіль, 2023 // с. - 77, рис. - 14, дод. - 1, бібл. - 12.

Ключові слова: АНТЕНА, ПАРАБОЛОЇД, СУПУТНИКОВЕ ТЕЛЕБАЧЕННЯ.

В роботі запропоновано спосіб оптимізації процедури проектування параболічної антени для супутникового телебачення. Проаналізовано типи антен для супутникового телебачення. Виділено для аналізу клас параболічних антен. Проведено аналіз методів розрахунку параметрів та характеристик елементів параболічної антени та встановлено, що їх недоліком є неврахування діелектричного покриття та пов'язаних з ним поверхневих хвиль. При цьому антени мають знижену ефективність внаслідок наявності теплових втрат в матеріалі провідника і діелектрика, а також збудження паразитних поверхневих хвиль. Застосовано модифікований резонансний метод визначення характеристик випромінювання антени. Використовуючи цей метод отримано залежності для оцінювання випромінювання поверхневих хвиль, втрат та ефективності антени.

## ANNOTATION

Optimization of the procedure for designing a parabolic antenna for satellite television // Master's qualification work // Stepaniuk M.Yu. // TNTU, FPT // Ternopil, 2023 // p. - 77, appl. - 14, bibl. - 12.

Keywords: ANTENNA, PARABOLOID, SATELLITE TELEVISION.

The paper proposes a method of optimizing the design procedure of a parabolic antenna for satellite television. The types of antennas for satellite television are analyzed. The class of parabolic antennas is selected for analysis. An analysis of the methods of calculating the parameters and characteristics of parabolic antenna elements was carried out and it was established that their disadvantage is the failure to take into account the dielectric coating and the surface waves associated with it. At the same time, antennas have reduced efficiency due to the presence of heat losses in the material of the conductor and dielectric, as well as the excitation of parasitic surface waves. A modified resonance method for determining the characteristics of antenna radiation is applied. Using this method, dependences for evaluating surface wave radiation, losses, and antenna efficiency were obtained.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Типи та принцип роботи антен.....	10
1.2 Принцип роботи ПА.....	31
1.3 Переваги використання параболічної антени.....	32
1.4 Застосування параболічної антени в різних сферах.....	33
1.5 Типи та характеристики параболічних антен.....	34
1.6 Висновки до розділу 1.....	39
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	40
2.1 Аналіз роботи параболічної роботи.....	40
2.2 Аналіз прототипів.....	47
2.3 Висновки до розділу 2.....	48
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	49
3.1 Методика розрахунку елементів ПА.....	49
3.2 Дослідження характеристик випромінювання смужкової антени – випромінювача параболічної антени.....	54
3.3 Модифікований резонансний метод.....	54
3.4 Випромінювання просторових хвиль.....	57
3.5 Випромінювання поверхніх хвиль.....	59
3.6 Оцінювання втрат в СА та її ефективності.....	61
3.7 Діаграма направленості СА.....	63
3.8 Алгоритм розрахунку.....	64
3.9 Висновки до розділу 3.....	67
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	69
4.1 Охорона праці.....	69
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	71
4.3 Висновки до розділу 4.....	74

ВИСНОВКИ.....	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	77
ДОДАТКИ	



## ВСТУП

**Актуальність.** Невід'ємними складовими частинами сучасних радіотехнічних засобів є антенні системи та відповідні тракти НВЧ. Призначення передавальної антени полягає в перетворенні направлених електромагнітних хвиль, що поширюються від передавача по лініях передачі тракту. Приймальна антена, навпаки, перетворює вільні просторові хвилі, що падають на неї, в хвилі, що надходять у приймальний тракт.

До антен сучасних радіосистем пред'являють багато вимог, серед яких вирішальне значення мають дві. В першу чергу, це направленість, тобто розподіл електромагнітної потужності у просторі за певним законом. По друге, випромінювання чи радіоприйом повинні супроводжуватися мінімальними втратами електромагнітної потужності на нагрівання провідників та діелектриків антени, тобто антена повинна мати високий ККД.

З проаналізованих антен виділено тип параболічних антен, які відрізняються перевагами в порівнянні з іншими типами антен при роботі в системах супутникового телебачення, зокрема високу пропускну здатність, стійкість до дії завад, високу чутливість, характеристики направленості.

Розглянуто методи аналізу антен і встановлено, що їх спільним недоліком є непряме врахування впливу шару діелектрика. При цьому антени мають знижений ККД внаслідок наявності теплових втрат в матеріалі провідника і діелектрика, а також збудження паразитних поверхневих хвиль.

В роботі проводиться оптимізація процедури проектування параболічної антени з врахуванням впливів наявного шару діелектрика.

**Мета роботи.** оптимізація процедури проектування параболічної антени. **Задачі:**

- аналіз типів та конструкцій антен для супутникового телебачення;
- аналіз прототипів параболічної антени;



- аналіз методів розрахунку параметрів та характеристик елементів параболічної антени;

- розробка алгоритму розрахунку параметрів та характеристик елементів параболічної антени з врахуванням впливів наявного шару діелектрика.

*Об'єкт дослідження:* процес проектування параболічної антени.

*Предмет дослідження:* покращення методу розрахунку параметрів та характеристик елементів параболічної антени шляхом врахування впливів наявного шару діелектрика.

**Наукова новизна.** Метод розрахунку параметрів та характеристик елементів параболічної антени, що враховує впливи наявного шару діелектрика.

**Практичне значення отриманих результатів.** Використання для проектування ефективних антен параболічного типу.

## РОЗДІЛ 1

### АНТЕНИ В СИСТЕМАХ ОБМІНУ ДАНИМИ

#### 1.1 Типи та принцип роботи антен

Антенa - це електричний пристрій, який перетворює електроенергію в радіохвилі і навпаки. При передачі антенa концентрує енергію радіолокаційного передавача і утворює промінь, спрямований у правильному напрямку. Під час отримання антенa збирає енергію, що повертається на радіолокатор, та яка містить корисні сигнали, і передає їх до приймача. Антени часто відрізняються за виглядом променя та ефективністю.

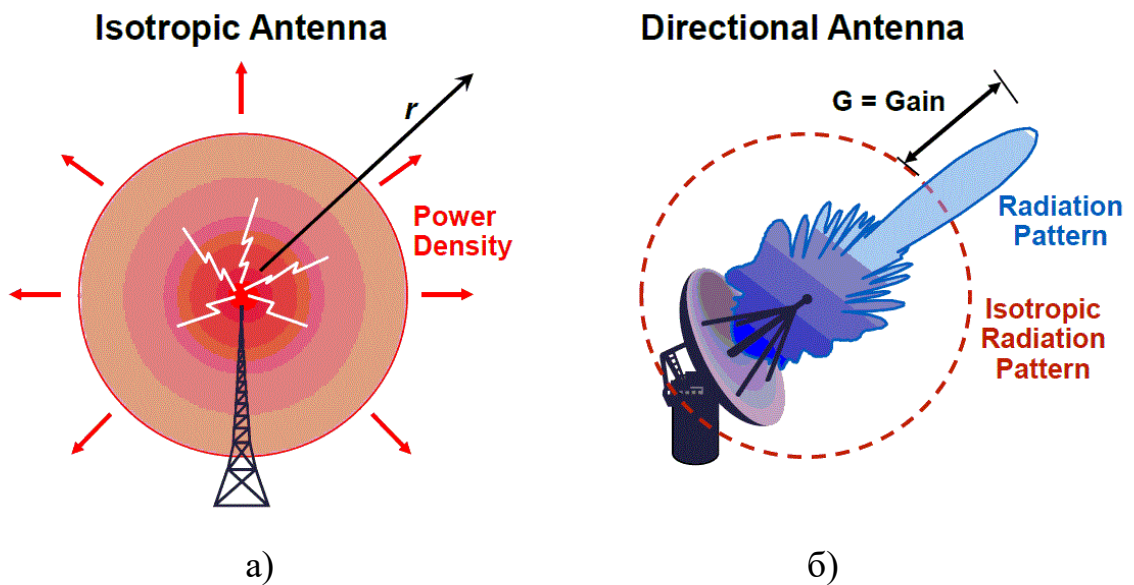


Рис. 1.1. Типи антен: а) - ізо­тропна антенa, б) – на­прав­лена антенa

Дипольна антенa

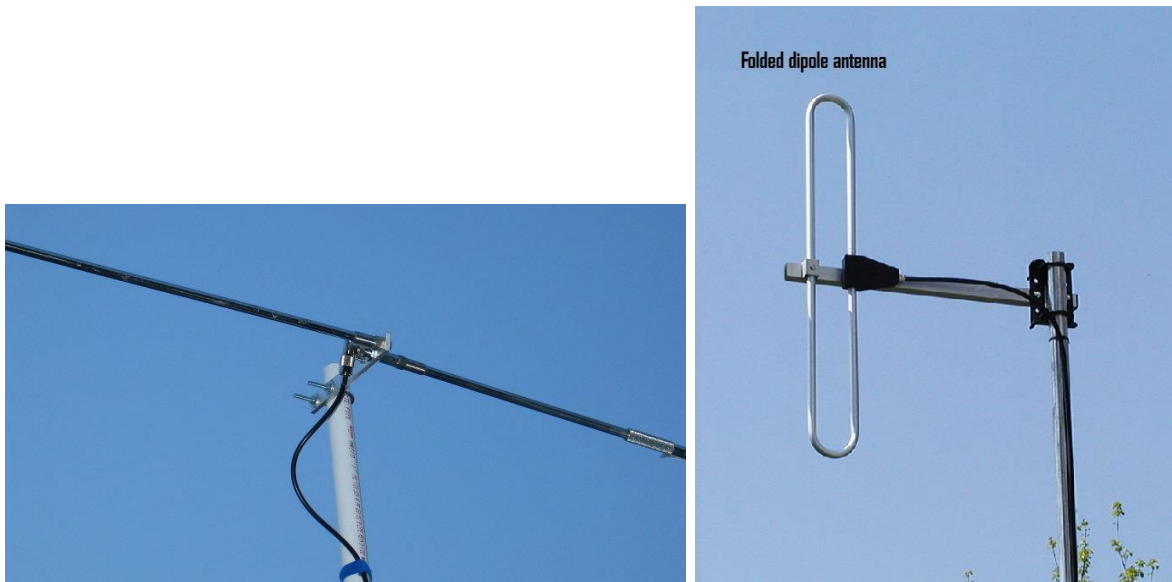


Рис. 1.2. Зовнішній вигляд дипольної антени

В дипольній антені обидві сторони фідера передавача або приймача з'єднані з одним з провідників. Диполі – резонуючі антени, тобто їх елементи є резонаторами, в яких стоячі хвилі переходять від одного кінця до іншого. Отже, довжина елементів диполя визначається довжиною радіохвилі.

Диполі – це ненаправлені антени. Тому їх часто використовують у системах зв'язку.

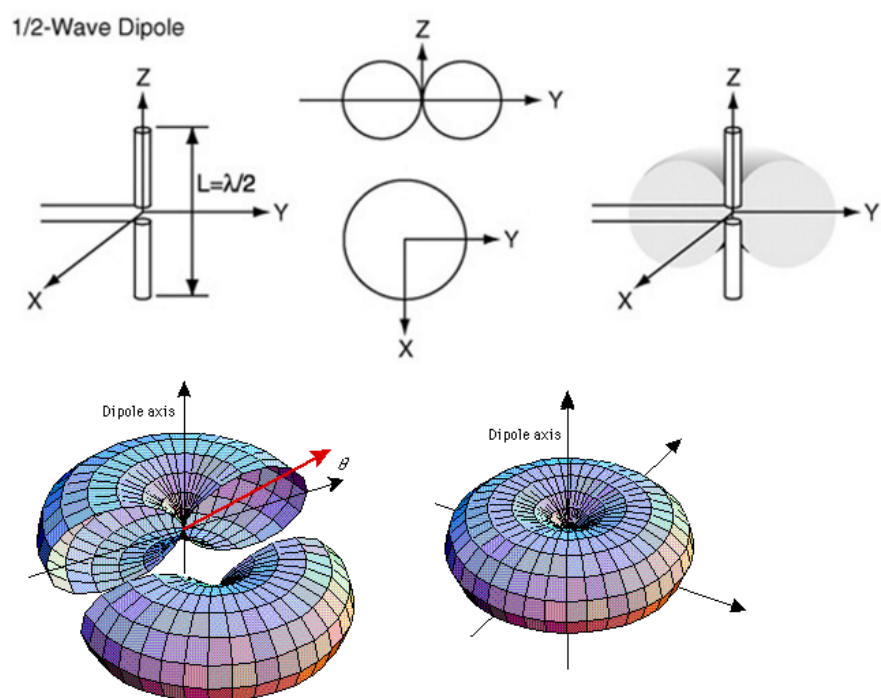


Рис. 1.3. Діаграма направленості дипольної антени

## Антенa у вигляді несиметричного вібратора (монопольна)



Рис. 1.4. Зовнішній вигляд монопольної антени

Несиметрична антена є половиною дипольної, і монтується перпендикулярно провідній відбиваючій поверхні. Коефіцієнт направленої дії монопольної антени вдвічі більше, ніж у дипольної антени подвосної довжини, оскільки під горизонтальним відбиваючим елементом, немає ніякого випромінювання. Тому КНД такої антени вдвічі вище, і вона здатна передавати хвилі далі, використовуючи ту саму потужність передачі.

Тип антени, що часто використовується на УКХ та УВЧ-передавачах. Складається з опромінювача (це може бути диполь), що закріплений перед двома плоскими прямокутними відбиваючими екранами, що з'єднані під кутом, зазвичай в  $90^\circ$ . Як відбивач може виступати лист металу або решітка, що зменшує вагу і зменшує опір вітру. У кутникових антен широкий діапазон, а підсилення становить близько 10-15 дБ.

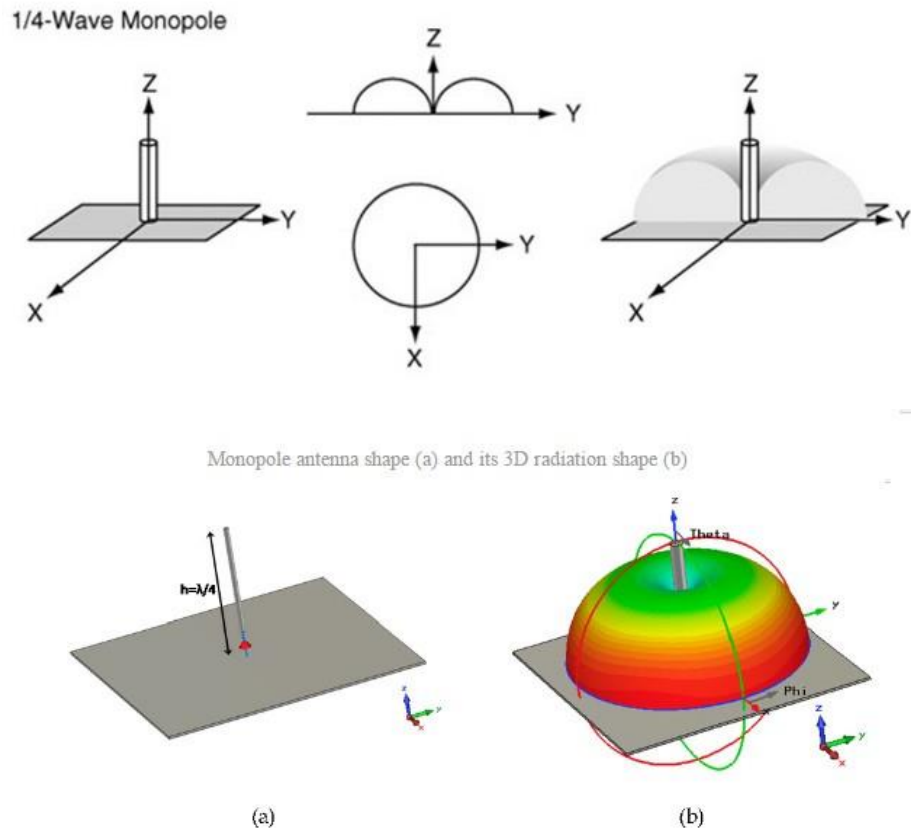


Рис. 1.5. ДН монопольної антени

## Кутникова антена



Рис. 1.6. Зовнішній вигляд кутникової антени

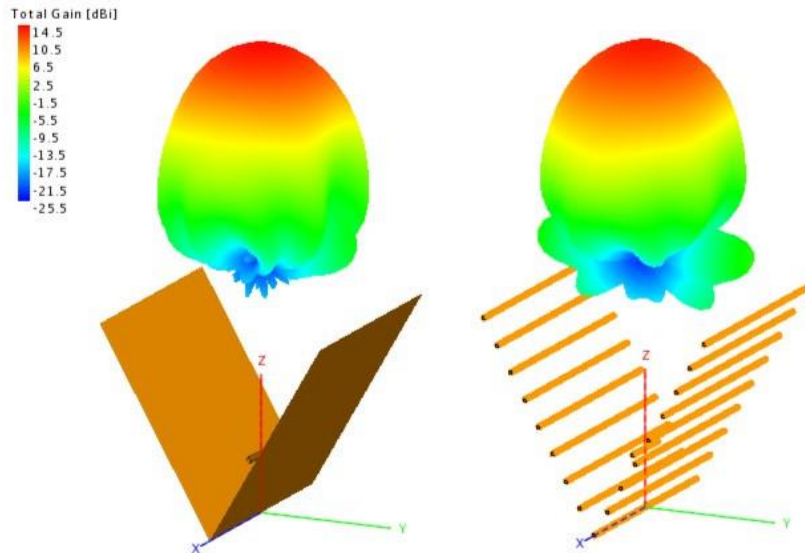


Рис. 1.7. ДН кутникової антени

Вібраторна логоперіодична (логарифмічна періодична) антена, або логоперіодична решітка із симетричних вібраторів

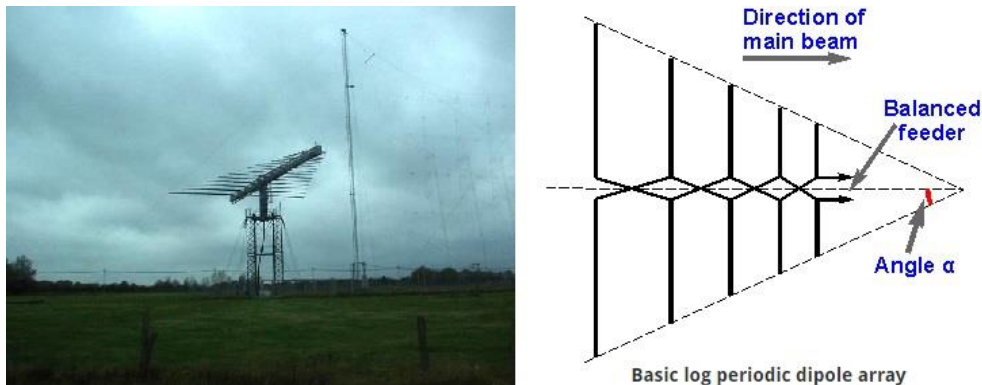


Рис. 1.8. Зовнішній вигляд вібраторної логоперіодичної антени

Логоперіодична антена (ЛПА) складається з декількох напівхвильових дипольних випромінювачів з довжиною, що поступово збільшується. Кожен складається з кількох металевих стержнів. Диполі кріпляться близько, один за одним, і підключаються до фідера паралельно, з протилежними фазами. Її головна перевага перед іншими антенами – надзвичайно широкий діапазон робочих частот. Довжини елементів антени відносяться один до одного за логарифмічним законом. Довжина найдовшого з елементів становить  $1/2$  від



довжини хвилі найнижчої із частот, а найкоротшого –  $1/2$  від довжини хвилі найвищої частоти.

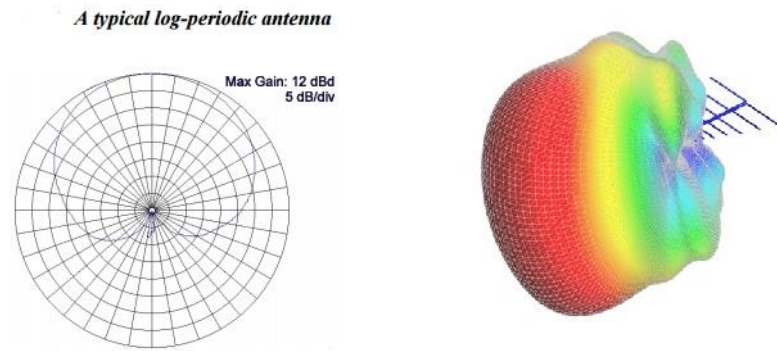


Рис. 1.9. ДН вібраторної логоперіодичної антени



Рис. 1.10. Зовнішній вигляд спіральної антени

Спіральна антена складається із провідника, закрученого у вигляді спіралі. Зазвичай ці антени монтуються над горизонтальним відбиваючим елементом. Фідер з'єднується з нижньою частиною спіралі та горизонтальною площиною. Вони можуть працювати у двох режимах – нормальному та осьовому.

Нормальний (поперечний) режим: розміри спіралі (діаметр і нахил) малі в порівнянні з довжиною хвилі частоти, що передається. Антена працює так само, як закорочений диполь або монополь, з такою самою схемою випромінювання. Випромінювання лінійно поляризується паралельно осі



спіралі. Такий режим використовується в компактних антенах для портативних та мобільних рацій.

Осьовий режим: розміри спіралі можна порівняти з довжиною хвилі. Антена працює як направлена, передаючи промінь із кінця спіралі вздовж її осі. Випромінює радіохвилі кругової поляризації. Часто використовується для СЗ.

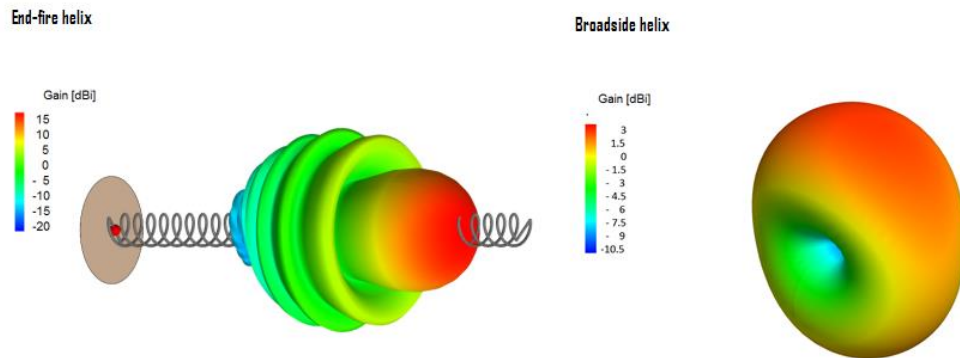


Рис. 1.11. ДН спіральної антени

### Ромбічна антена

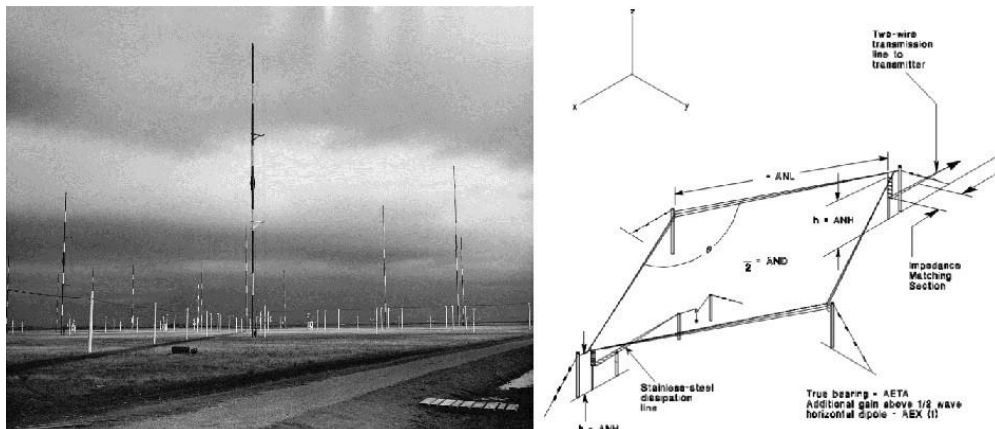


Рис. 1.12. Зовнішній вигляд ромбічної антени

Ромбічна антена – широкосмугова направлена антена, яка містить один-три паралельних проводи, що закріплені над землею у вигляді ромба, що підтримується в кожній вершині вежами або стовпами, до яких дроти кріпляться за допомогою ізоляторів. Усі чотири сторони антени однакової

довжини, зазвичай не менше однієї довжини хвилі, або довші. Часто використовуються для зв'язку та роботи в діапазоні декаметрових хвиль.

### Двовимірні антенні решітки



Рис. 1.13. Зовнішній вигляд двовимірної антенної решітки

Багатоелементний масив диполів, що використовуються в КХ діапазонах (1,6 - 30 МГц), що включає ряди та стовпці диполів. Кількість рядів може бути 1-4 або 6. Кількість стовпців – 2 або 4. Диполі горизонтально поляризовані, а відбиваючий екран розташовується за масивом диполів для забезпечення отримання підсиленого променя. Кількість стовпців диполів визначає ширину азимутального променя. Для 2 стовпців ширина ДН становить близько  $50^\circ$ , для 4 стовпців -  $30^\circ$ . Головний промінь можна відхиляти на  $15^\circ$  або  $30^\circ$  для отримання максимального охоплення  $90^\circ$ .

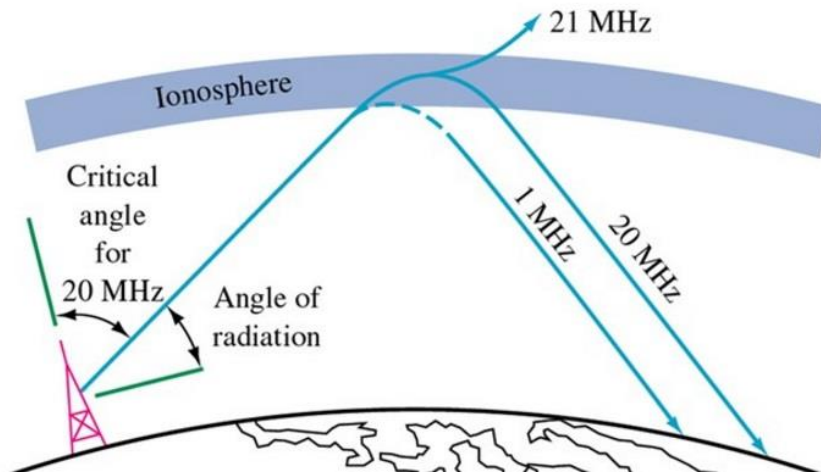


Рис. 1.14. Принцип роботи

Кількість рядів і висота найнижчого елемента над землею визначає кут піднесення і розмір території, що обслуговується. Масив з двох рядів має кут  $20^\circ$ , а з чотирьох –  $10^\circ$ . Випромінювання двовимірних решіток зазвичай підходить до іоносфери під невеликим кутом, і через низьку частоту часто відбивається назад до поверхні землі. Оскільки випромінювання може багаторазово відбиватися від іоносфери і поверхні землі, дія антени не обмежена горизонтом. В результаті така антена часто використовується для зв'язку на далекі відстані.

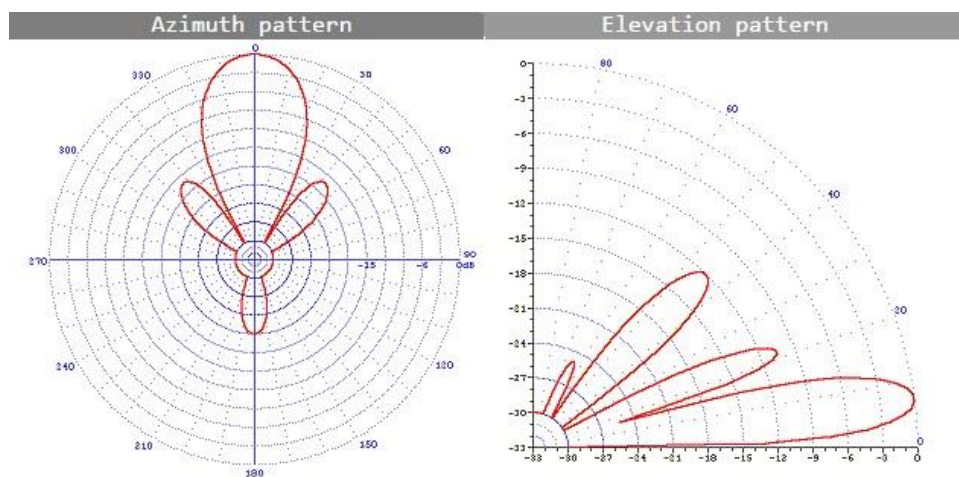


Рис. 1.15. ДН

## Рупорна антена

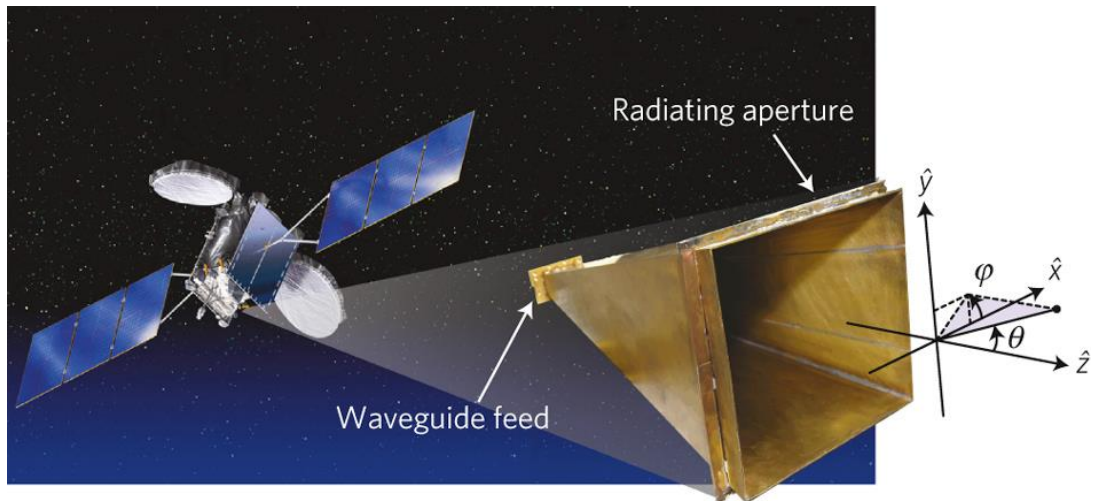


Рис. 1.16. Зовнішній вигляд рупорної антени

Рупорна антена складається з металевого хвилевода у формі рупора, що розширюється та збирає радіохвилі в промінь. У рупорних антен дуже широкий спектр робочих частот, можуть працювати з 20-кратним розривом його границь – наприклад, від 1 до 20 ГГц. Підсилення варіюється від 10 до 25 дБ, і часто вони використовуються як опромінювачі більших антен.

## Параболічна антена



Рис. 1.17. Зовнішній вигляд параболічної антени

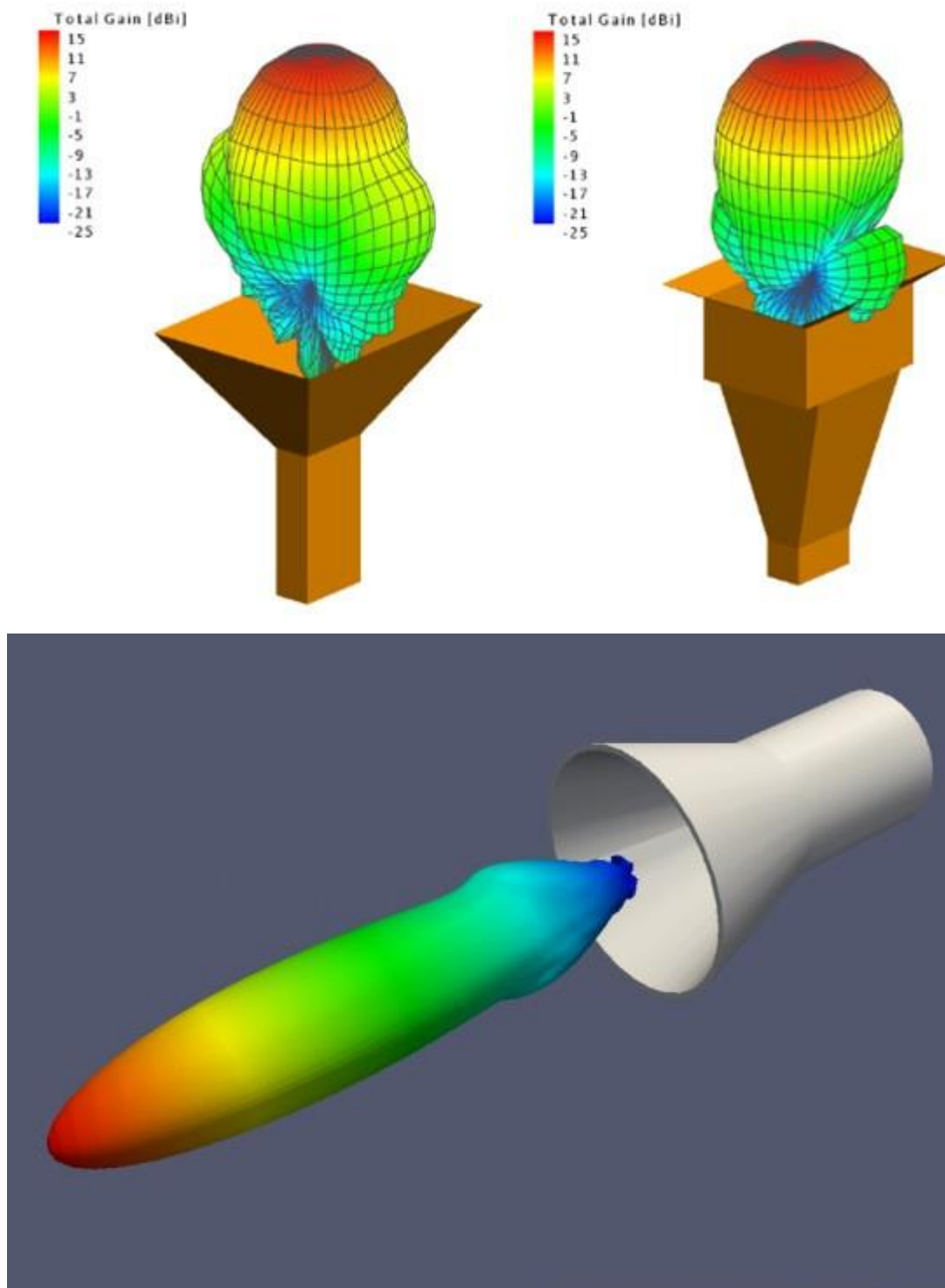


Рис. 1.18. ДН

Одна з найпопулярніших антен для зв'язку – параболічний відбивач. Опромінювач розташовується у фокусі параболи, і енергія радара прямує на поверхню відбивача. Найчастіше як опромінювач використовується рупорна антена, але можна використовувати дипольну або спіральну.



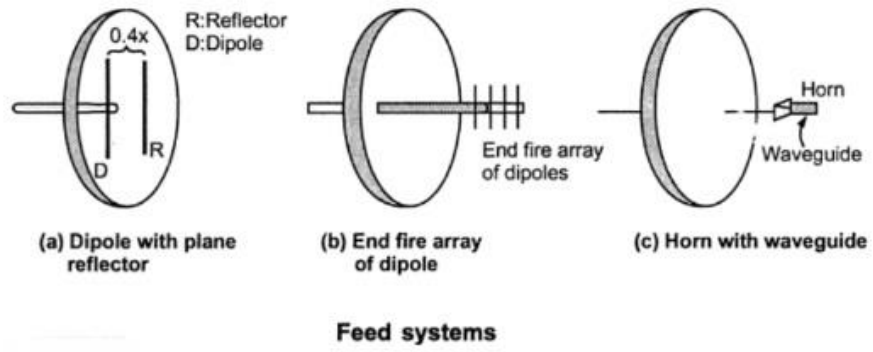


Рис. 1.19. Принцип работы

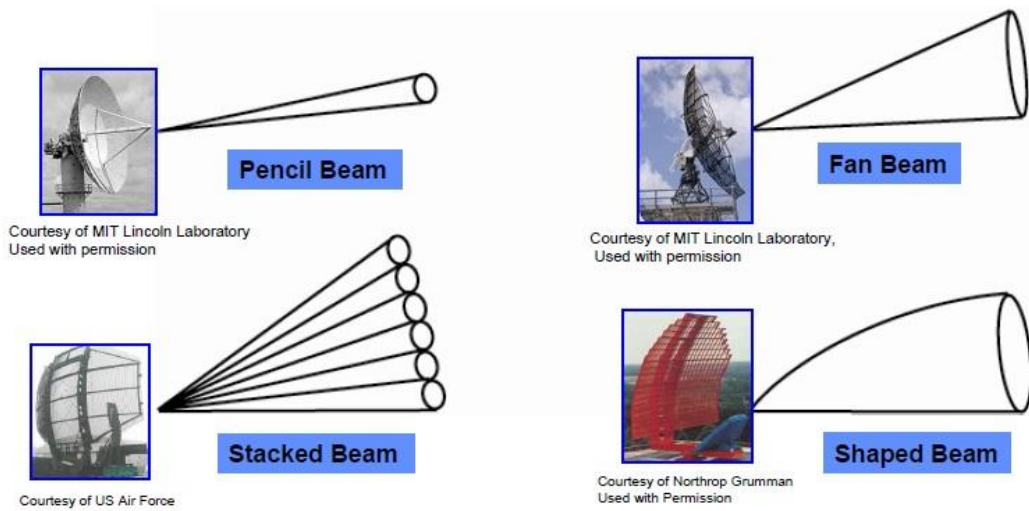
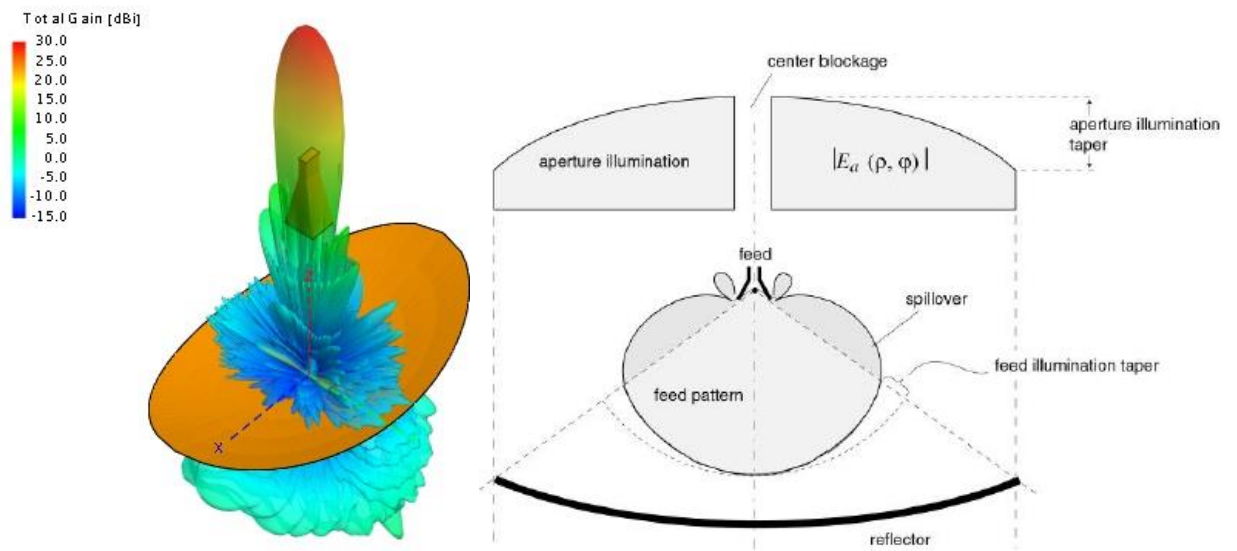


Рис. 1.20. ДН

Оскільки точкове джерело енергії знаходиться у фокусі, воно перетворюється на хвильовий фронт постійної фази. Змінюючи розмір і форму відбиваючої поверхні можна створювати промені і схеми випромінювання різної форми. Направленість параболічних антен набагато краща, ніж у дипольної, підсилення може досягати 30-35 дБ. Головний їхній недолік – непристосованість до низьких частот через розмір. Ще один – опромінювач може блокувати частину сигналу.

### Антенна Кассегрена

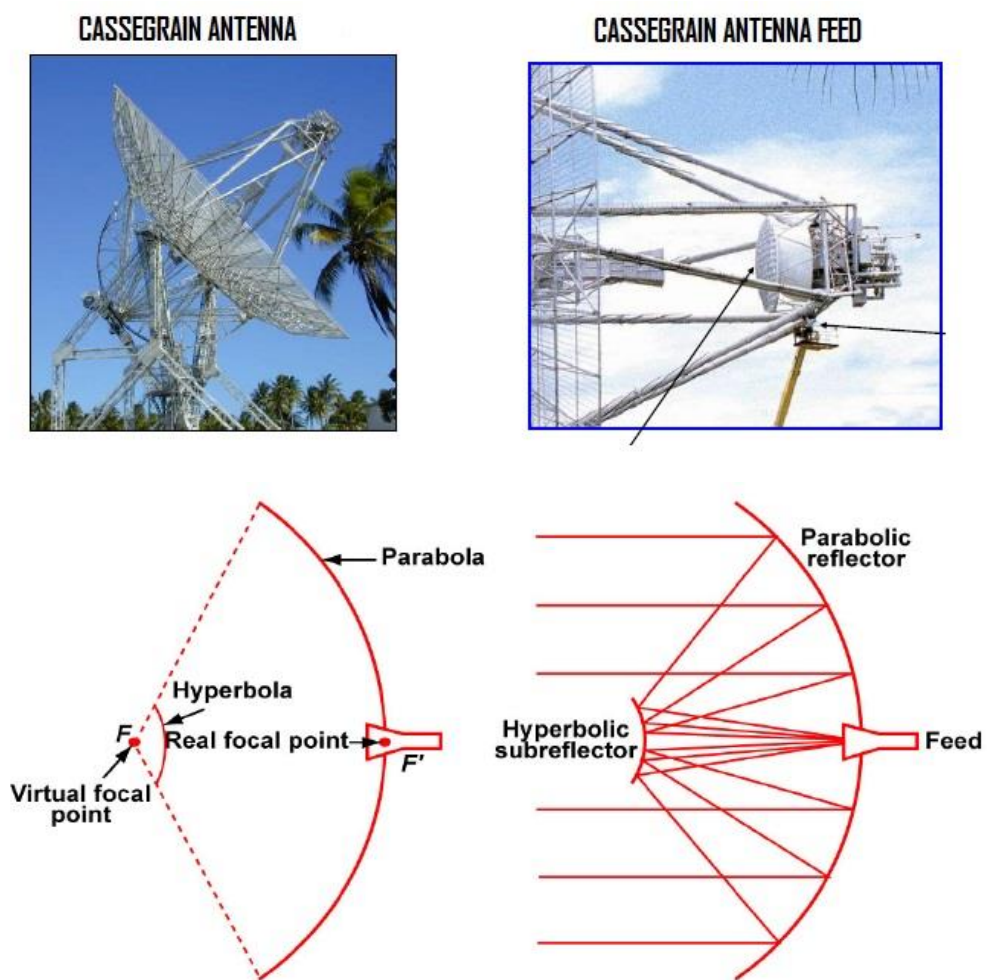


Рис. 1.21. Зовнішній вигляд антени Кассегрена

Антенна Кассегрена дуже схожа на звичайну параболічну, але використовує систему із двох відбивачів для створення та фокусування променя. Основний відбивач параболічний, а допоміжний гіперболічний.



Опромінювач знаходиться в одному з двох фокусів гіперболи. Енергія з передавача відбивається від допоміжного відбивача на основний і фокусується. Вхідна енергія збирається основним відбивачем і відбивається у вигляді променя, що сходиться в одній точці. Потім вона відбивається допоміжним відбивачем і збирається у точці, де розташований опромінювач. Така конструкція зменшує осьові розміри, але збільшує затінення розкриття. Невеликий допоміжний відбивач, навпаки, зменшує затінення розкриття, але його потрібно розташовувати подалі від основного. Переваги порівняно з параболічною антеною: компактність (незважаючи на наявність другого відбивача, загальна відстань між двома відбивачами менша, ніж відстань від опромінювача до рефлектора параболічної антени), зменшення втрат (приймач можна розмістити близько від рупорного випромінювача). Основні недоліки: сильніше блокується промінь (розмір допоміжного відбивача та опромінювача більше, ніж розмір опромінювача звичайної параболічної антени), погано працює з широким діапазоном хвиль.

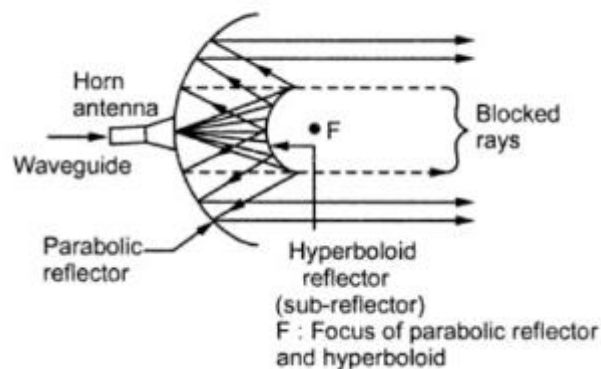


Рис. 1.22. Принцип роботи

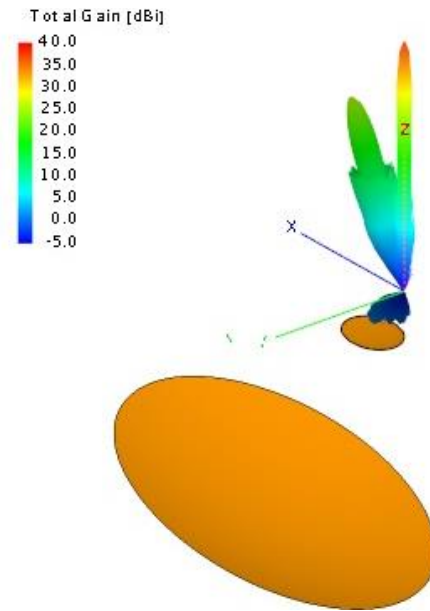


Рис. 1.23. ДН

### Антенa Грегорі

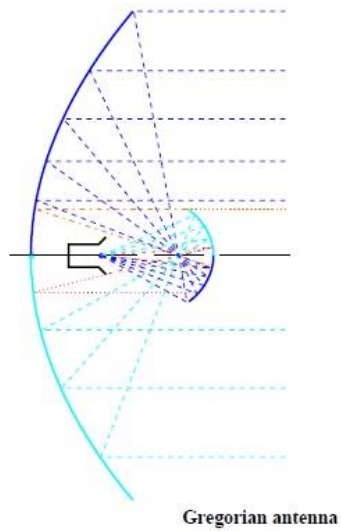


Рис. 1.24. Зовнішній вигляд антени Грегорі

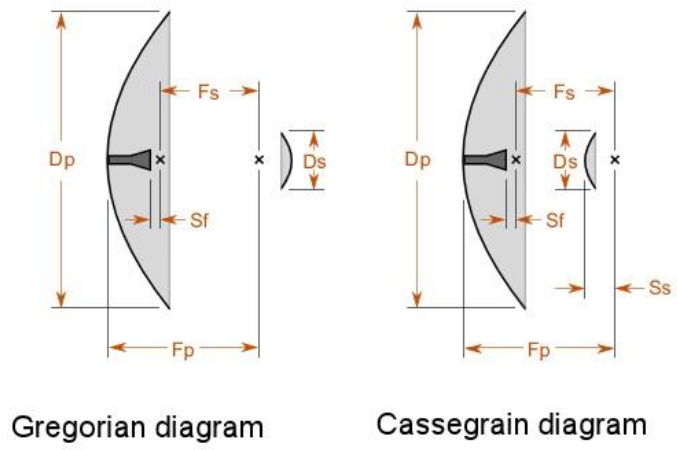


Рис. 1.25. Порівняння принципу роботи антени Кассегрена та антени Грегорі

Параболічна антена Грегорі дуже схожа структурою на антену Кассегрена. Відмінність у тому, що допоміжний відбивач викривлений у протилежний бік. Конструкція Грегорі може використовувати менший за розмірами допоміжний відбивач у порівнянні з антеною Кассегрена, внаслідок чого перекривається менша частина променя.

Офсетна (асиметрична) антена

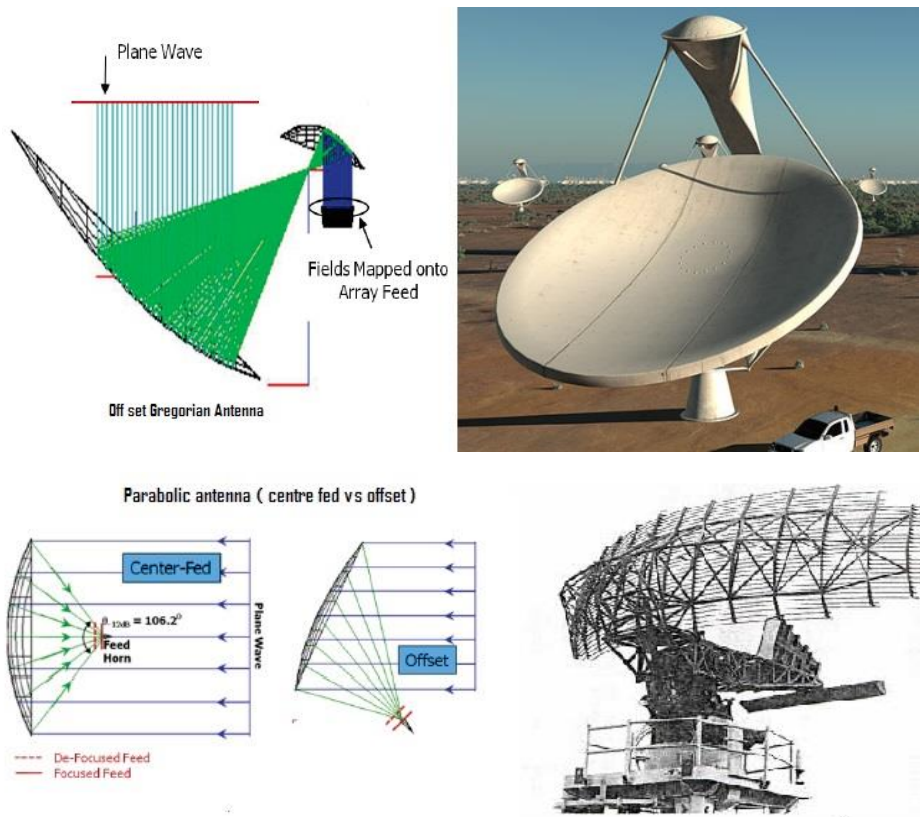


Рис. 1.26. Зовнішній вигляд асиметричної антени

Випромінювач та допоміжний відбивач (якщо це антена Грегори) у офсетної антени зміщені від центру основного відбивача, щоб не блокувати промінь. Така схема часто використовується на параболічних антенах та антенах Грегори для підвищення ефективності.

Ще одна схема, призначена для боротьби з блокуванням променя допоміжним відбивачем, - це антена Кассегрена з плоскою пластиною. Вона працює з урахуванням поляризації хвиль. У електромагнітної хвилі є 2 компоненти, магнітна та електрична, що завжди знаходяться перпендикулярно один одному і напрямку руху. Поляризація хвилі визначається орієнтацією електричного поля, вона буває лінійною (вертикальною/горизонтальною) або круговою (круговою або еліптичною, закрученою за або проти годинникової стрілки). Найцікавіше в поляризації - це поляризатор, або процес фільтрації хвиль, що залишає лише хвилі, поляризовані в одному напрямку або в одній площині. Зазвичай поляризатор виготовляють із матеріалу з паралельним розташуванням атомів, або це може бути решітка з паралельних проводів, відстань між якими менша, ніж довжина хвилі. Часто приймається, що відстань має бути приблизно рівною половині довжини хвилі.

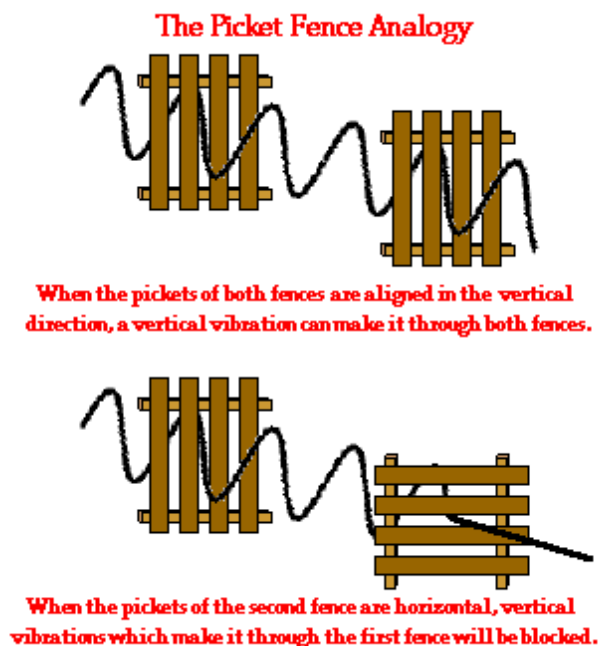


Рис. 1.27. Робота антени Кассегрена

Решітка з паралельних горизонтальних проводів повністю блокує і відбиває горизонтально поляризовану радіохвилю і пропускає вертикально поляризовану - і навпаки. Причина наступна: коли електричне поле, або хвиля, паралельні дроту, вони збуджують електрони за довжиною дроту, і оскільки довжина дроту багаторазово перевищує його товщину, електрони можуть легко рухатися і поглинають більшу частину енергії хвилі. Рух електронів призведе до появи струму, а струм створить хвилі. Ці хвилі погасять хвилі передачі і будуть поводитися як відбиті. З іншого боку, коли електричне поле хвилі перпендикулярне дротам, воно збуджуватиме електрони по ширині дроту. Оскільки електрони не зможуть активно рухатися таким чином, відбиватиметься дуже мала частина енергії.

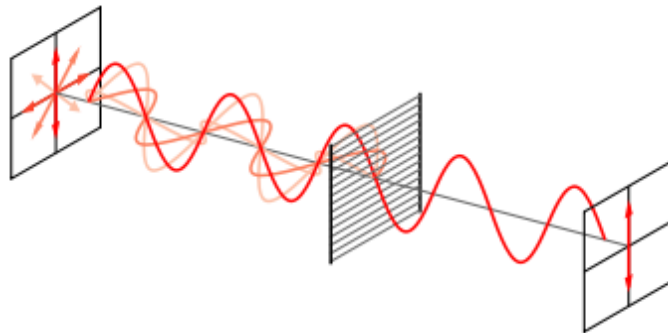


Рис. 1.28. Принцип роботи антени Кассегрена з плоскою фазовою пластиною

Важливо відзначити, що, хоча на більшості ілюстрацій у радіохвиль всього 1 магнітне та 1 електричне поле, але вони не обов'язково осцилюють строго в одній площині. Насправді можна уявляти, що електричні та магнітні поля складаються з кількох підполів, що складаються векторно. Наприклад, у вертикально поляризованої хвилі з двох підполів результат додавання їх векторів вертикальний. Коли два підполя збігаються по фазі, результуюче електричне поле завжди буде стаціонарним в одній площині. Але якщо одне з підполів повільніше за інше, тоді результуюче поле почне обертатися навколо напрямку руху хвилі (це часто називають еліптичною поляризацією). Якщо

одне підполе повільніше за інші на  $1/4$  довжини хвилі (фаза відрізняється на  $90$  градусів), то ми отримаємо кругову поляризацію:

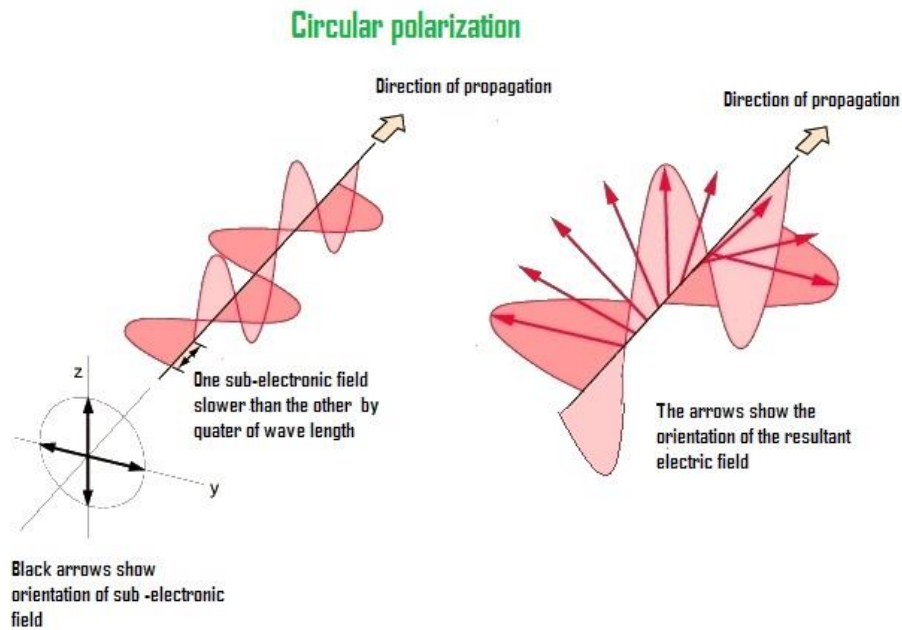


Рис. 1.29. До пояснення антени Кассегрена

Для перетворення лінійної поляризації хвилі в кругову поляризацію і назад необхідно уповільнити одне з підполів відносно інших рівно на чверть довжини хвилі. Для цього найчастіше використовуються решітки (чвертьхвильова фазова пластина) з паралельних проводів з відстанню між ними в  $1/4$  довжини хвилі, розташованих під кутом  $45$  градусів до горизонталі.

У хвилі, що проходить через пристрій, лінійна поляризація перетворюється на кругову, а кругова – на лінійну.

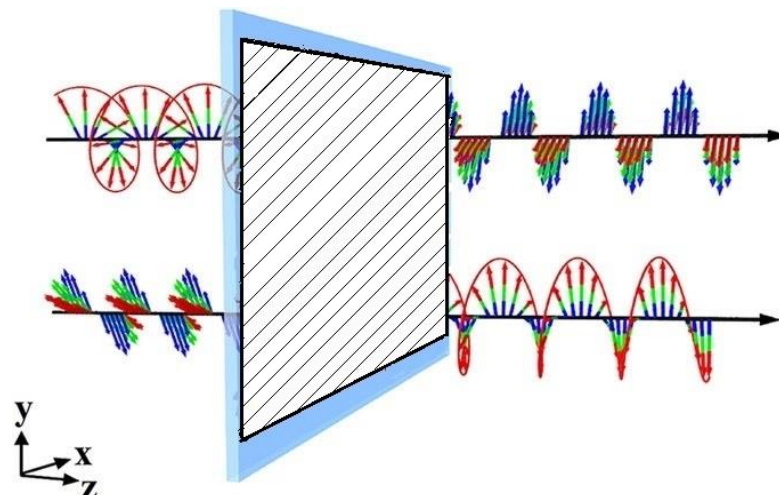


Рис. 1.30. Поляризація в антені Кассегрена



Антенна Кассегрена, що працює за цим принципом, з плоскою фазовою пластиною включає два відбивачі рівного розміру. Допоміжний відбивач лише хвилі з горизонтальною поляризацією і пропускає хвилі з вертикальною поляризацією. Основний відбивач всі хвилі. Пластина допоміжного відбивача розташовується перед основним, що містить дві частини - це пластина зі щілинами, що йдуть під кутом в  $45^\circ$ , і пластина з горизонтальними щілинами шириною менше  $1/4$  довжини хвилі.

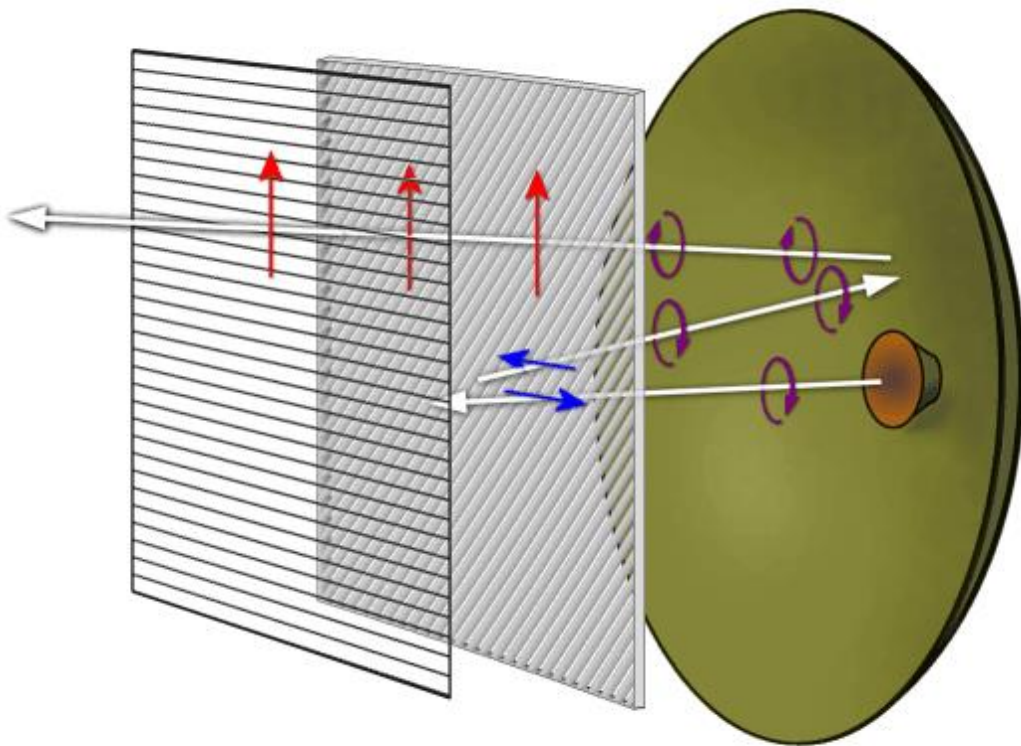


Рис. 1.31. Принцип роботи антени Кассегрена з плоскою фазовою пластиною

Припустимо, опромінювач передає хвилю з круговою поляризацією проти годинникової стрілки. Хвиля проходить через чвертьхвильову пластину і перетворюється на хвилю з горизонтальною поляризацією. Вона відбивається від горизонтальних проводів. Вона знову проходить через чвертьхвильову пластину, вже з іншого боку, і для неї дроти пластини орієнтовані вже дзеркально, тобто ніби повернені на  $90^\circ$ . Попередня зміна поляризації



усувається, так що хвиля знову набуває кругової поляризації проти годинникової стрілки і йде назад до основного відбивача.

### Щілинна антена



Рис. 1.32. Зовнішній вигляд щілинної антени

Хоча в описаних антен досить велике підсилення по відношенню до розміру апертури, у всіх них є загальні недоліки: велика сприйнятливість по бічних пелюстках, зменшення ефективності через блокування променя. У результаті було придумано нову схему антени – щілинну. Вона виконана у вигляді металевої поверхні, зазвичай плоскої, в якій прорізані отвори або щілини. Коли її опромінюють на потрібній частоті, електромагнітні хвилі випускаються з кожного слота - тобто слоти виступають у ролі окремих антен і формують масив. Оскільки промінь, що йде з кожного слота, слабкий, їх бічні пелюстки також дуже малі. Щілинні антени характеризуються високим підсиленням, малими бічними пелюстками та малою вагою. Вони можуть мати виступаючі частини, що у ряді випадків є важливою перевагою

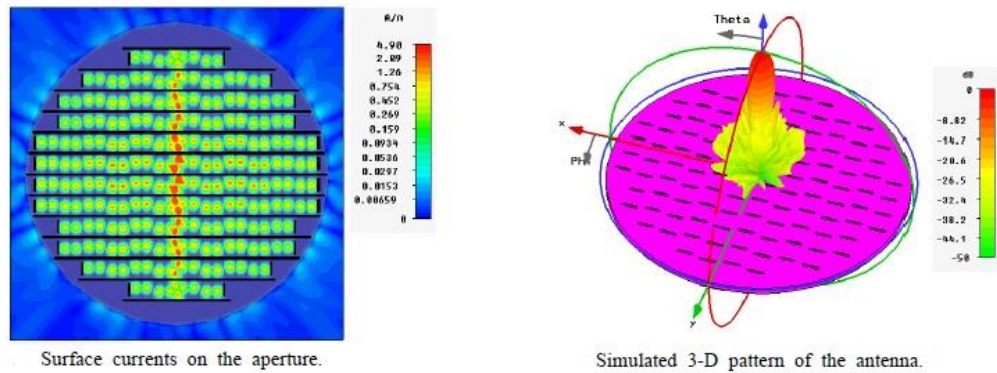


Рис. 1.33. ДН

## 1.2 Принцип роботи ПА

Параболічна антена — це пристрій, який використовується для прийому та передачі сигналів у радіозв'язку. Вона складається з металевого відбивача у формі параболоїда і фокуруючого елемента — радіофари, розташованого у фокусі відбивача. Принцип роботи цієї антени ґрунтується на фокусуванні та підсиленні електромагнітної енергії в пучкові, який спрямований у визначеному напрямку.

Параболічна антена може бути використана для різних цілей, включаючи СЗ, радіорелейні системи, радіотелескопи та радіометри. Вона володіє високою направленістю. Більший розмір відбивача і використання оптимальної частоти дозволяє отримати високу чутливість і дальшу дальність зв'язку.

Особливістю параболічної антени є те, що вона здатна фокусувати не тільки електромагнітні хвилі, але і звукові хвилі. Це дозволяє використовувати такі антени в звукозаписі та створенні звуку високої якості. Крім того, завдяки своїй конструкції ПА може працювати дзеркалом в сонячних енергетичних системах.

Принцип роботи ПА що ґрунтується на фокусуванні радіохвиль, які падають на поверхню антени, в її фокусі. Коли падаюча хвиля досягає відбиваючої поверхні, вона відбивається у фокус. Це означає, що сигнал,

потрапляючи на антену, посиляється у фокус і передається або приймається з більшою потужністю.

### 1.3 Переваги використання параболічної антени

Переваги використання параболічної антени включають:

Висока направленість сигналу – антена фокусує вхідний або вихідний сигнал у вузьку точку, що дозволяє отримувати або передавати сигнал на більші відстані;

Висока чутливість – завдяки фокусуванню радіохвиль, параболічна антена може забезпечити більш сильний сигнал і більш чіткий прийом;

Стійкість до завад – антена ефективно фокусує сигнал у визначеній точці, що робить її менш чутливою до впливу зовнішніх завад;

Більш широкий спектр частот – ПА можуть використовуватися для обміну сигналами у різних діапазонах частот.

ПА є важливим компонентом в системах зв'язку, що дозволяє забезпечити високу якість передачі і прийом радіосигналів на більші відстані.

Перевага використання ПА

Велика пропускна здатність: ПА дозволяє передавати великий об'єм даних в короткі терміни. Завдяки своїм характеристикам вона забезпечує пропускну здатність і ефективність передачі даних.

Зниження завад: ПА мають вузьку ДН, що дозволяє максимально знизити рівень завад від інших джерел сигналів. Це підвищує якість зв'язку та мінімізує можливість помилок при передачі даних.

Легке встановлення і обслуговування: ПА відрізняються простою установкою і обслуговуванням. Не потрібні спеціальні навички або складне обладнання для їх монтажу. Крім того, вони володіють високою надійністю і довговічністю, що зменшує витрати на обслуговування.

Стійкість до погодних умов: ПА мають стійку конструкцію, здатну підтримувати екстремальні погодні умови, включаючи сильний ветер, дощ і

сніг. Це робить їх надійними та ефективними інструментами зв'язку в будь-яких кліматичних умовах.

#### Основні особливості ПА

Форма параболоїда. ПА має форму параболоїда або, точніше, сегмента параболічної поверхні. Ця форма дозволяє фокусувати електромагнітні хвилі в точці фокуса, де знаходиться приймач або передатчик.

Фокусна відстань. Розмір ПА антени визначається її діаметром, ефективність її роботи залежить від фокусного розташування. Чим більше діаметр антени і чим менше фокусна відстань, тим сильніший сигнал збирається і формується в точці фокуса.

Діаграма направленості. ПА має дуже вузьку ДН, вилучаючи або приймаючи сигнали тільки в напрямку точки фокусу. Це дозволяє отримати більшу направленість і бути ефективною при роботі на більшій відстані.

Підсилення. Завдяки своїй формі і фокусуванню сигналу ПА має високе підсилення. Використання антени визначається її діаметром також частотою використовуваних сигналів. Загальні параболічні антени мають потужність у кілька децибел (дБ), що дозволяє успішно використовувати їх в комунікаційних системах.

Важливо відзначити, що ПА вимагають точних налаштувань і високої точності при виготовленні, щоб забезпечити максимальну ефективність і продуктивність при роботі. Крім того, вони мають обмежену діаграму огляду і вимагають високої стабільності в установці, щоб зберегти якість сигналу.

#### 1.4 Застосування параболічної антени в різних сферах

Параболічні антени широко використовуються завдяки своїм унікальним характеристикам і можливостям.

Однією з основних сфер застосування параболічної антени є телекомунікація. Вони використовуються для передачі і прийому радіосигналів на більшій відстані. За допомогою параболічної антени можлива

високошвидка передача даних, стільниковий зв'язок, супутникова трансляція та багато іншого.

Ще однією важливою областю застосування параболічних антен є СЗ. Вони використовуються в системах супутникового телебачення, супутникового інтернету та супутникової навігації.

Також параболічні антени застосовуються в радарних системах і метеорології. Вони дозволяють вловлювати слабкі радіолокаційні сигнали і обробляти їх, що дозволяє передбачати погодні умови і виявляти об'єкти військового або цивільного значення.

Крім зазначених вище сфер застосування, параболічні антени можуть бути використані в наукових дослідженнях, промисловості та інших сферах.

### 1.5 Типи та характеристики параболічних антен

Масив каналів подачі – щоб отримати промінь довільної форми, замість одного рупору каналу можна використовувати масив каналів, згрупованих навколо точки фокусу. Антени з решітками живлення часто використовуються на супутниках зв'язку, зокрема супутниках прямого мовлення, для створення ДН низхідної лінії зв'язку для покриття певного континенту чи зони. Вони часто використовуються з вторинними рефлекторними антенами.

Діаграми електричних і магнітних полів у отворі параболічної антени є просто збільшеним зображенням полів, які випромінює фідерна антена, тому поляризація визначається фідерною антеною. Щоб досягти максимального підсилення, обидві фідерні антени (передавальна та приймальна) повинні мати однакову поляризацію. Наприклад, вертикальна дипольна фідерна антена буде випромінювати промінь радіохвиль з вертикальним електричним полем, що називається вертикальною поляризацією. Для їх прийому приймальна фідерна антена також повинна мати вертикальну поляризацію; якщо подача горизонтальна (горизонтальна поляризація), антена характеризується зменшенням підсилення.

Щоб збільшити швидкість передачі даних, деякі параболічні антени передають два окремі радіоканали на одній частоті з ортогональною поляризацією, використовуючи окремі фідерні антени; це називається антеною подвійної поляризації. Наприклад, сигнали супутникового телебачення передаються із супутника по двох окремих каналах на одній частоті з використанням правої та лівої кругової поляризації. У домашній супутниковій антені вони приймаються двома невеликими монопольними антенами у рупорі каналу, орієнтованими під прямим кутом. Кожна антена підключається до окремого приймача.

Якщо сигнал з одного поляризаційного каналу приймається протилежно поляризованою антеною, це спричинить перехресні перешкоди, що погіршить співвідношення сигнал/шум. Здатність антени зберігати ці ортогональні канали розділеними вимірюється параметром, який називається перехресною поляризаційною дискримінацією (XPD). У передавальній антені XPD – це частка потужності антени однієї поляризації, що випромінюється в іншій поляризації. Наприклад, через незначні недоліки антена з вертикально поляризованою фідерною антеною буде випромінювати невелику кількість своєї потужності в горизонтальній поляризації; ця частка є XPD. У приймальній антені XPD — це відношення потужності сигналу, отриманого протилежною поляризацією, до потужності, отриманої тією самою антеною правильною поляризацією, коли антена опромінюється двома ортогонально поляризованими радіохвилями однакової потужності. Якщо система антени має неадекватний XPD, для зменшення перехресних перешкод часто можна використовувати алгоритми цифрової обробки сигналу з придушенням перехресної поляризації (XPIC).

#### Формування подвійного відбивача

В антенах Кассегрена та Грегорі наявність двох відбиваючих поверхонь на шляху сигналу відкриває додаткові можливості для покращення продуктивності. Коли потрібна найвища продуктивність, можна використовувати техніку, що називається подвійним відбивачем. Це включає

в себе зміну форми субрефлектора, щоб направити більше потужності сигналу на зовнішні ділянки тарілки. Однак це призводить до появи вторинної фази, яка вже не є точно гіперболічною (хоча вона все ще дуже близька), тому властивість постійної фази втрачається. Однак цю фазову похибку можна компенсувати, трохи змінивши форму основного дзеркала. Результатом є вищий приріст, або коефіцієнт приросту, за рахунок поверхонь, які складніше виготовити та перевірити.

Підсилення. Направленість антени вимірюється безрозмірним параметром, який називається її підсиленням, який є відношенням потужності, отриманої антеною від джерела вздовж осі її променя, до потужності, отриманої гіпотетичною ізотропною антеною. Коефіцієнт підсилення параболічної антени становить:

$$G = \frac{4\pi A}{\lambda^2} e_A = \left( \frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 e_A$$

де:

$A$  – площа апертури антени. Для круглої антенної тарілки  $A = \pi d^2 / 4$ .

$d$  діаметр параболічного відбивача, якщо він круглий.

$\lambda$  це довжина радіохвилі.

$e_A$  це безрозмірний параметр між 0 і 1, який називається ефективністю апертури. Ефективність апертури типових параболічних антен становить від 0,55 до 0,70.

Можна побачити, що чим більше апертура відносно довжини хвилі, тим вище підсилення. Коефіцієнт підсилення збільшується разом із квадратом відношення ширини апертури до довжини хвилі, тому великі параболічні антени, такі як ті, що використовуються для зв'язку космічних апаратів і радіотелескопів, можуть мати надзвичайно високий коефіцієнт підсилення. Застосування наведеної вище формули до антен діаметром 25 метрів, які часто використовуються в радіотелескопічних решетках і супутникових наземних



антенах при  $\lambda$  хвилі 21 см (1,42 ГГц, звичайна радіоастрономічна частота), дає приблизне максимальне підсилення в 140 000 разів або приблизно 52 дВі (децибели вище ізотропного рівня). Найбільшою параболічною антеною у світі є сферичний радіотелескоп із п'ятсотметровою апертурою на південному заході Китаю, ефективна апертура якого становить близько 300 метрів. Коефіцієнт підсилення цієї антени на частоті 3 ГГц становить приблизно 90 мільйонів, або 80 дБі.

Ефективність апертури  $e_A$  є основною змінною, яка враховує різні втрати, які зменшують підсилення антени від максимуму, якого можна досягти за даної апертури.

У ПА практично вся випромінювана потужність зосереджена у вузькій головній пелюстці вздовж осі антени. Залишкова потужність випромінюється в бічних пелюстках в інших напрямках, які зазвичай є набагато меншими. Оскільки апертура рефлектора параболічних антен набагато більша за довжину хвилі, дифракція зазвичай викликає багато вузьких бічних пелюсток, тому діаграма бічних пелюсток є складною. Також зазвичай є зворотня пелюстка у напрямку, протилежному до основної пелюстки, через випромінювання.

#### Ширина променя

Кутова ширина променя, випромінюваного антенами з високим КП, вимірюється шириною променя половинної потужності (HPBW), яка є кутовою відстанню між точками на ДН антени, при якій потужність падає до половини (-3 дБ) від його максимального значення. Для ПА HPBW  $\theta$  визначається як:

$$\theta = k\lambda/d$$

де  $k$  — коефіцієнт, який незначно змінюється залежно від форми відбивача та схеми опромінення. Для ідеального рівномірно опроміненого параболічного відбивача та  $\theta$  у градусах  $k$  буде 57,3 (кількість градусів у радіанах). Для типової параболічної антени  $k$  становить приблизно 70.

Об'єднавши рівняння ширини променя з рівнянням підсилення, можна отримати співвідношення:

$$G = \left( \frac{\pi k}{\theta} \right)^2 e_A$$

Формула ДН

Випромінювання від великого параболоїда з рівномірно опроміненою апертурою по суті еквівалентне випромінюванню від круглого отвору такого ж діаметру  $D$  у нескінченній металевій пластині, рівномірною плоскою хвилею, що падає на пластину.

Діаграму радіаційного поля можна розрахувати, застосовуючи принцип Гюйгенса подібним чином до прямокутної апертури. Картину електричного поля можна знайти, оцінивши інтеграл дифракції Фраунгофера по круглій апертурі. Його також можна визначити за допомогою рівнянь зони Френеля.

$$E = \iint \frac{A}{r_1} e^{j(\omega t - \beta r_1)} dS = \iint e^{2\pi i(lx + my)/\lambda} dS$$

$$\text{де } \beta = \omega/c = 2\pi/\lambda$$

Використовуючи полярні координати,  $x = \rho \cdot \cos \theta$  ;  $y = \rho \cdot \sin \theta$ .

Беручи до уваги симетрію,

$$E = \int_0^{2\pi} d\theta \int_0^{\rho_0} e^{2\pi i \rho \cos \theta / \lambda} \rho d\rho$$

і використання функції Бесселя 1-го порядку дає картину електричного поля  $E(\theta)$

$$E(\theta) = \frac{2\lambda}{\pi D} \frac{J_1[(\pi D/\lambda) \sin \theta]}{\sin \theta}$$

де  $D$  діаметр отвору антени в метрах,  $\lambda$  довжина хвилі в метрах,  $\theta$  це кут у радіанах від осі симетрії антени, і  $J_1$  є функцією Бесселя першого порядку. Визначення перших нульових значень ДН дає ширину променя  $\theta_0$ .  $J_1(x) = 0$ ,  $x = 3.83$ . Таким чином,

$$\theta_0 = \arcsin \frac{3.83\lambda}{\pi D} = \arcsin \frac{1.22\lambda}{D}.$$

Коли діафрагма велика, кут  $\theta_0$  дуже маленький, тому  $\arcsin(x)$  приблизно дорівнює  $x$ . Це дає загальні формули ширини променя,

$$\theta_0 \approx \frac{1.22\lambda}{D} \text{ (in radians)} = \frac{70\lambda}{D} \text{ (in degrees)}$$

## 1.6 Висновки до розділу 1

В розділі проаналізовано типи та принцип роботи антен, що використовуються в системах обміну даними, зокрема в системах супутникового телебачення. Проаналізовано особливості будови та роботи дипольної антени, несиметричного вібратора, вібраторної логоперіодичної антени, спіральної антени, ромбічної антени, рупорної антени, параболічної антени, антени Кассегрена та антени Грегорі. Встановлено основні переваги використання параболічної антени для роботи в системах супутникового телебачення, зокрема високу пропускну здатність, стійкість до дії завад, високу чутливість характеристики направленості.

## РОЗДІЛ 2

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Аналіз роботи параболічної роботи

Досліджувана у цій роботі антена складається з параболічного дзеркала 1 і опромінювача 2, що поміщений у фокус параболоїда (рис.2.1). Як опромінювач використовується слабонаправлена смужкова антена, а як дзеркало - параболоїд обертання.

Антена характеризується такими геометричними розмірами (рис.2.1):

- радіусом розкриття  $R$ ;
- фокусною відстанню  $F$ ;
- кутом розкриття  $\varphi_0$ .

У прямокутній системі координат (рис.2.1) поверхня параболоїда описується виразом:

$$x^2 + y^2 = 4Fz \quad (2.1).$$

Антена зберігає всі свої характеристики при виконанні наступної умови:

$$(R,F) \gg \lambda \quad (2.2).$$

Тут  $\lambda$  - довжина хвилі у вільному просторі, що відповідає випромінюваному або прийнятому сигналу. При аналізі принципу роботи антени ця умова дозволяє знехтувати у першому наближенні дифракційними ефектами та розглядати її з позиції геометричної оптики.

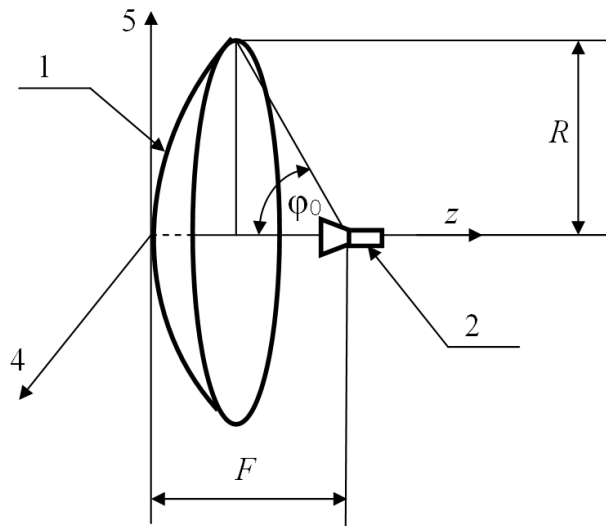


Рис. 2.1. До пояснення поверхні параболоїда

На рис.2.2 зображено переріз параболоїда по осі Z (рис.2.1).

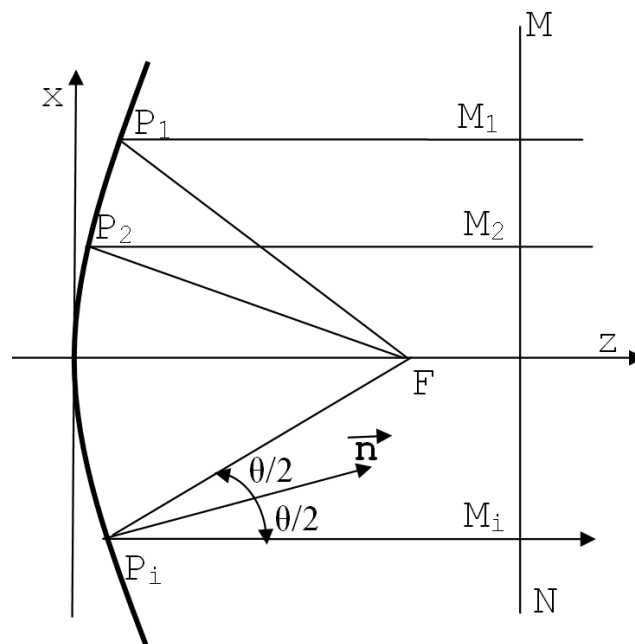


Рис. 2.2. Переріз параболоїда по осі Z

Слід зазначити дві властивості аналізованої поверхні дзеркала, які формулюються в такий спосіб.

1. Відстань від фокуса  $F$  параболоїда, що лежить на його осі (вісь  $z$ ), до будь-якої точки  $M_i$ , що лежить на прямій  $MN$ , перпендикулярно до осі, по ламаних шляхах  $FP_iM_i$  ( $P_i$  - точка на дзеркалі), які є однаковими ( $FP_1M_1 = FP_2M_2 = \dots$ );

2. Нормаль  $n$  до поверхні дзеркала у будь-якій точці лежить у площині рисунка рис.2 і становить кут  $\theta/2$  з прямою, що з'єднує цю точку на дзеркалі з точкою  $F$  і прямою паралельно осі.

Ці геометричні властивості поверхні визначають принцип роботи антени. Розглянемо її у режимі передачі. Хвиля, що формується смужковим випромінювачем малих розмірів  $2$  близька за своїми властивостями до неоднорідної сферичної хвилі. З позицій геометричної оптики її можна подати променями  $FP_i$  (рис.4), які падають на поверхню параболоїда. Внаслідок другої властивості параболічного дзеркала, після відбивання промені поширюватимуться по траєкторіях, паралельних осі антени. Таким чином ламані лінії  $FP_iM_i$  є частиною траєкторій цих променів.

Завдяки першій властивості параболічного дзеркала фазовий вплив на різних частинах траєкторій  $FP_iM_i$  виявляється однаковим. Легко зрозуміти, що поверхня, де фази променів, відбитих від дзеркала, будуть однакові (фазовий фронт хвилі), є перпендикулярною до осі  $z$  площиною (рис.2.1, 2.2). Це означає, що створена опромінювачем хвиля, близька за властивостями до сферичної, перетворюється на плоску. Таким чином, параболічне дзеркало трансформує відносно широку ДН випромінювача (400 - 700) у вузьку, шириною долі градуса.

Робота антени при прийомі розглядається аналогічно. Плоска хвиля, що падає на дзеркало, фокусується ним на опромінювач.

Як опромінювачі параболічних антен можуть бути використані:

- вібраторні опромінювачі, що є системою "активний - пасивний вібратор", "активний вібратор - плоский контррефлектор";
- рупорні опромінювачі (пірамідальні рупори, конічні рупори);
- щілинні опромінювачі;
- спіральні опромінювачі.

У цій роботі як опромінювач використовується малогабаритна смужкова антена.

При строгому аналізі дзеркальної параболічної антени використовується



хвильовий підхід визначення поля у її дальній зоні. Наприклад, при аналізі її роботи як передавальної, визначаються вторинні струми, розподілені поверхнею параболічного дзеркала. Поява цих струмів обумовлена електромагнітною хвилею від опромінювача, що падає на дзеркало. Вторинні струми формують випромінювання антени в дальній зоні.

Кожен тип опромінювача забезпечує відмінний від інших розподіл вторинних струмів поверхнею параболічного дзеркала. Отже, тип опромінювача впливає на характеристики направленості антени.

Важливим моментом при розробці конструкції дзеркальної ПА є узгодження характеристик направленості опромінювача та геометричних розмірів дзеркала. На рис.2.3 зображено переріз параболоїда по осі  $Z$  і відзначено точку фокусу  $F$ , в якій розташований опромінювач і кут розкриття  $\varphi_0$ .

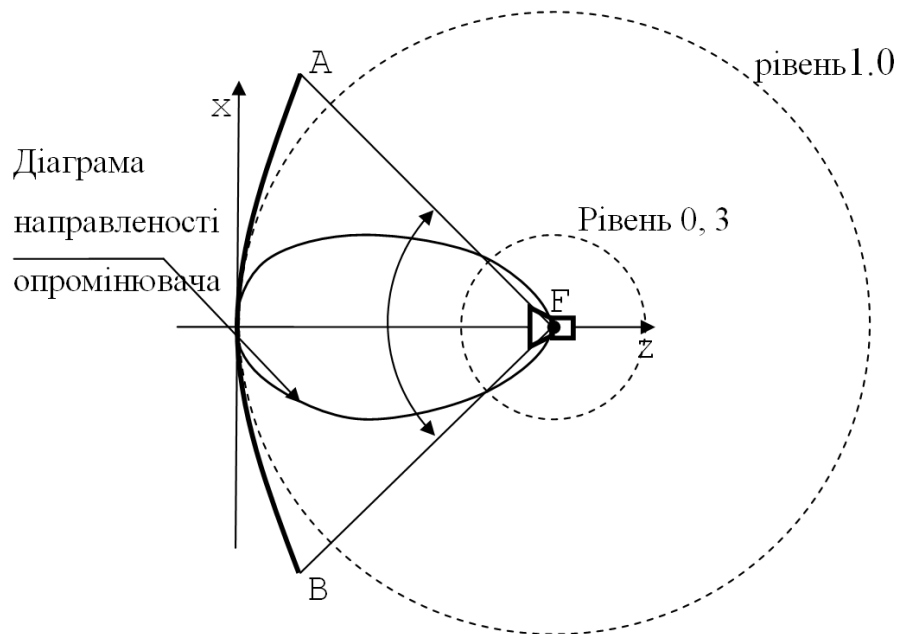


Рис. 2.3. Переріз параболоїда площиною

З практичної точки зору важливо, щоб енергія електромагнітної хвилі, створюваної опромінювачем, наскільки можна повно перехоплювалася і перевідбивалася дзеркалом. Для цього ДН опромінювача має бути обмежена прямими  $AF$  та  $BF$  (рис.2.3).

На рис.2.3 зображено ДН опромінювача в полярній системі координат і відзначено два рівні 1 і 0,3. Їм відповідають два пунктирні кола. Перетин цих кіл з ДН опромінювача визначає напрямок головного максимуму та напрямки, в яких амплітуда випромінюваної хвилі зменшується до рівня 0,3 від максимального значення.

На рис.2.3 прями AF та BF проходять через ці точки перетинів. Це означає, що енергія електромагнітної хвилі опромінювача, що виходить за межі кута AFB, не перехоплюється опромінювачем і безповоротно втрачається. З практичної точки зору такий вибір співвідношення між геометрією дзеркала та характеристиками направленості опромінювача виявляється оптимальним. Збільшення частки енергії, що перехоплюється дзеркалом, вимагає збільшення геометричних розмірів антени в цілому, що веде до збільшення її ваги, площі та вартості. З іншого боку, це не призводить до істотного збільшення ККД антени. Компенсувати енергетичні втрати в цьому випадку простіше за рахунок незначного збільшення потужності передавача (під час роботи на прийом) або чутливості приймача (при роботі на передачу).

Великий вплив на характеристики дзеркальної ПА чинить точність, з якою фазовий центр опромінювача поєднаний з точкою фокусу. На рис.2.4,а показано, що поздовжнє зміщення опромінювача відносно фокусу призводить до поширення перевипромінюваних дзеркалом променів (розглядається режим роботи антени на передачу) за напрямками, що становлять різні кути з поздовжньою віссю антени (вісь z). Отже, фазовий фронт MN (рис. 2.4,а) перевипромінюваної хвилі не є плоским. Легко зрозуміти, що це відповідає збільшенню ширини ДН антени загалом.

На рис.2.4,б показано, що зміщення опромінювача відносно фокусу в поперечному напрямку призводить до зміни напрямку головного максимуму. Теоретичний аналіз показує, що при незначних зсувах  $d$  опромінювача в поперечному напрямку (порядку довжини хвилі  $\lambda$  прийнятого або переданого випромінювання) не відбувається (у першому наближенні) збільшення

ширини головного максимуму ДН. Тому на практиці часто механічні переміщення опромінювача використовуються для сканування або підстроювання характеристик направленості антени.

При створенні конструкції антени велика увага приділяється мінімізації "тіньового ефекту". Він полягає в екрануванні частини параболічного дзеркала опромінювачем, що має кінцеві розміри. З одного боку, це веде до неповного використання енергії випромінюваної або прийнятої хвилі.

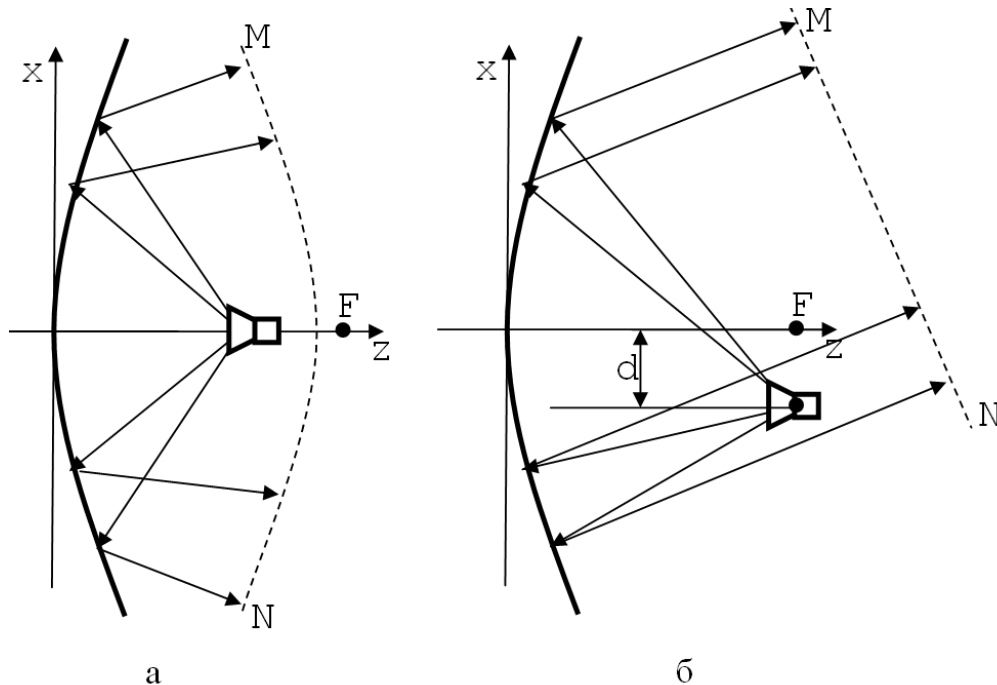


Рис. 2.4. До пояснення точності дзеркальної антени

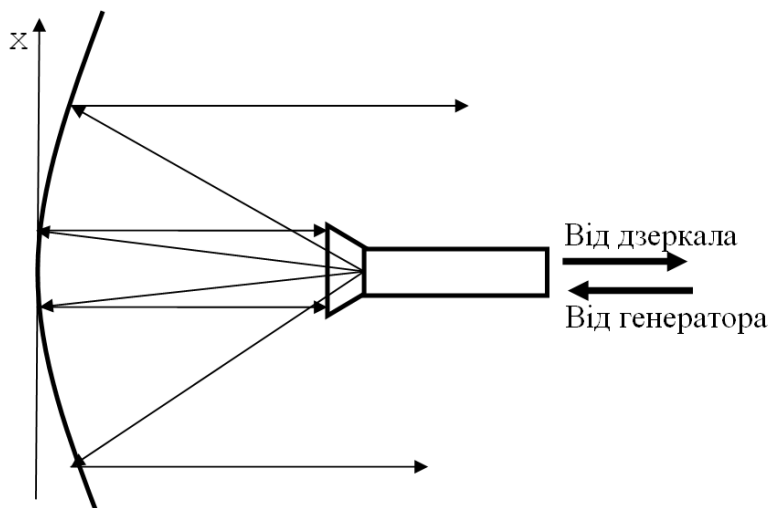


Рис. 2.5. Тіньовий ефект

З іншого боку цей ефект веде до неузгодженості опромінювача з лінією живлення. Даний ефект ілюструється на рис. 2.5, на якому показано наявність двох хвиль, що поширюються в зустрічних напрямках - від генератора і від дзеркала.

Для усунення тіньового ефекту використовуються різні методи. На сьогоднішній день найбільш ефективним з них є використання дзеркала не центральної, а бічної частини параболоїда обертання. Як впливає з рис.2.6, опромінювач при цьому вже не перекриває дзеркало і в фідері живлення не виникають хвилі, породжені відбиттям від параболічного дзеркала.

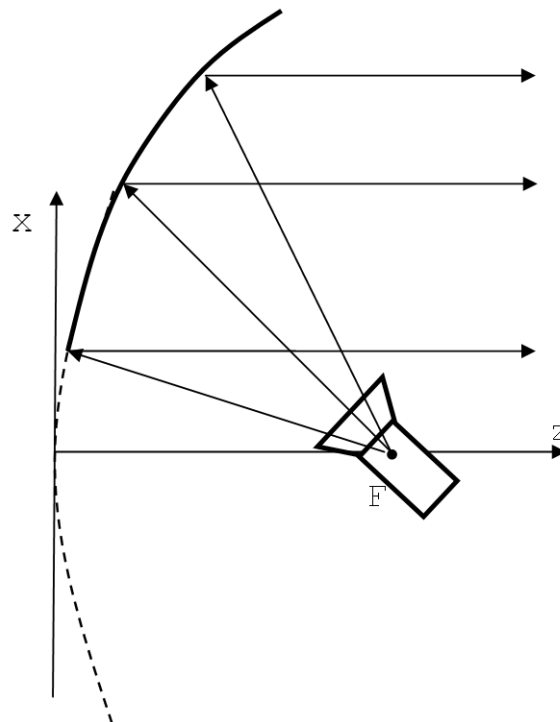


Рис. 2.5. Використання дзеркала бічної частини параболоїда обертання

Теоретичний аналіз показує, що вимоги до точності виконання геометричних розмірів дзеркала визначаються допустимими відхиленнями порядку  $\lambda/8$ . При збільшенні частоти вимоги до точності виготовлення зростають, що веде до суттєвого подорожчання антени загалом.

## 2.2 Аналіз прототипів

Відомі конструкції антен, які можуть бути використані як опромінювачі параболічних антен (патенти США N 3434166 і N 4636798). Ці опромінювачі є відкритим кінцем круглого хвилеводу з фланцем.

Найбільш близькою за сукупністю суттєвих ознак є конструкція опромінювача (патент США N 4636798 прототип), яка є відкритим кінцем круглого хвилеводу з імпедансним фланцем, в апертурі хвилеводу встановлена діелектрична лінза у формі півтора. Діелектрична лінза розширює ДН, що дозволяє використовувати її як опромінювач дзеркальних антен із вкороченою фокусною відстанню.

Однак ДН відомого опромінювача не достатньо наближена до ідеальної діаграми опромінення головного дзеркала параболічних антен, внаслідок чого зменшується КВП дзеркальних антен. Крім того, даний опромінювач не дозволяє отримати оптимальне опромінення дзеркала з кутом розкриття  $\theta_0 \geq 180^\circ$ , що не дозволяє використовувати короткофокусні дзеркальні антени, які мають мінімальні габарити та вагу.

Технічний результат полягає у підвищенні ефективності опромінення дзеркала короткофокусної ПА за рахунок формування близької до ідеальної діаграми опромінення.

Для цього у відомій антені, що має круглий хвилевід з фланцем і діелектричну лінзу, остання виконана у вигляді циліндра з конічним поглибленням, вершина якого направлена до відкритого кінця хвилевода, в якому розміщений діелектричний стержень, що з'єднаний з лінзою. Пропонований при цьому опромінювач складається з круглого хвилевода з хвилею Н11, металевого фланця, який може мати як плоску, так і імпедансну поверхню, і діелектричної лінзи, яка є продовженням хвилевода. У цій конструкції використовується явище відбивання та заломлення електромагнітних хвиль на межі поділу 2-х діелектриків.

Електромагнітна хвиля, поширюючись із середовища з більшою

оптичною густиною в середовище з меншою густиною, зазнає повного внутрішнього відбивання на діелектричному конусі, що дозволяє сформувати ДН антени з провалом по осі.

### 2.3 Висновки до розділу 2

В розділі проаналізовано принцип роботи параболічної антени, що складається з параболічного дзеркала та опромінювача в фокусі параболоїда. Опромінювачем є смужкова антена. Проаналізовано геометричні властивості поверхні параболічного дзеркала антени та їх вплив на фазові характеристики отриманих сигналів. Розглянуто вплив тіньового ефекту від опромінювача та основні способи його зменшення. Проаналізовано прототипи антени.



## РОЗДІЛ 3

### НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

#### 3.1 Методика розрахунку елементів ПА

ПА є поширеними як джерела або приймачі направлено випромінювання дециметрового, сантиметрового і міліметрового діапазонів довжин хвиль. Істотний вплив на характеристики ПА відіграє вибір типу випромінювача. Добре відомі антени з випромінювачами у формі рупорів, спіралей, вібраторів.

В роботі розглядається ПА з опромінювачем у вигляді смужкової антени (СА), розміри якої набагато менші за розміри дзеркала. Цьому вибору сприяли простота конструкції, висока технологічність, мала маса, повторюваність розмірів, низька вартість виготовлення та ін. Наявність діелектрика дозволяє суттєво зменшити лінійні розміри випромінюючих елементів та використовувати їх при створенні мініатюрних антенних систем. Однак, присутність цього покриття та пов'язаних з ним поверхневих хвиль суттєво ускладнює визначення характеристик випромінювання СА. У зв'язку зі складністю механізму випромінювання СА, труднощами експериментального налаштування їх зразків значно зростає роль розрахункових методів, що ґрунтуються на строгих підходах і дають необхідну для інженерної практики точність розрахунку основних характеристик. На сьогодні відомо досить багато методів розрахунку та аналізу СА.

Один із перших методів розрахунку характеристик випромінювання СА заснований на поданні прямокутної антени розмірами  $a \times b$  як двох магнітних вібраторів – щілин, рознесених на відстань  $b$  один від одного. Зв'язок випромінюючих щілин по внутрішньому простору здійснюється введенням сполучного відрізка смужкової лінії з постійним поширенням  $\beta$  і характеристичним опором  $Z_C$ , що визначається шириною антени  $a$ . Вважають,

що лінія підтримує лише квазі-Т хвилю. СА замінюється еквівалентною схемою, складеною з використанням теорії довгих ліній. Відрізок лінії довжиною  $b$  вважається навантаженим із двох сторін на провідності випромінювання щілин.

$$Y = G + jB = \frac{\pi a}{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon_0 / \mu_0}} \cdot [1 + j(1 - 0.27b \ln k_0 d)] ,$$

де  $d$  – ширина щілини, що дорівнює приблизно товщині підкладки.

Вираз для провідності випромінювання щілини без жорстких обмежень на її відносну ширину:

$$Y = \frac{a}{d} \sqrt{\varepsilon_0 / \mu_0} \left\{ \left[ \int_0^{k_0 d} J_0(x) dx - J_1(k_0 d) \right] + j \left[ \int_0^{k_0 d} N_0(x) dx + N_1(k_0 d) + \frac{2}{\pi k_0 d} \right] \right\} ,$$

де  $J_n(x), N_n(x)$  - функції Бесселя та Неймана порядку  $n$ .

Довжина відрізка лінії наближено буде рівною  $\lambda_D/2$  де  $\lambda_D$  – довжина хвилі в діелектриці підкладки з  $\varepsilon_r$  ( $\lambda_D = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_r}$ ). Однак на практиці довжину відрізка лінії вибирають порядку (0,48 ... 0,49)  $\lambda_D$ . При довжині відрізка лінії  $\lambda_D/2$ , провідності випромінювання щілин будуть включені паралельно по відношенню до вхідних клем і вхідний опір антени матиме комплексний характер. При розмірах, менших  $\lambda_D/2$ , перетворена провідність матиме реактивну складову протилежного знака, і за цієї довжини вхідний опір випромінювача буде суто активним, тобто найбільш оптимальними будуть розміри прямокутного випромінюючого елемента, за яких

$$b = (0,48 \dots 0,49) \cdot \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon_r} \quad (3.1)$$

Вхідна провідність антени  $Y_{вх} = 1/Z_{вх}$  – результат додавання провідності

щілини на вході антени (клеми 1-1) та щілини, що трансформується по входу через відрізок лінії довжиною  $b$ , так що

$$Y_{\dot{a}\dot{a}} = G + jB + Y_C \cdot \frac{G + jB + jY_C \operatorname{tg} \beta b}{Y_C + j(G + jB) \operatorname{tg} \beta b},$$

де  $\beta$  - постійна розповсюдження лінії;  $Y_C = 1/Z_C$ .

Якщо вважати антену налаштованою в резонанс, то спрощено вхідна провідність вважатиметься рівною  $2G$ .

У першому наближенні випромінювання щілин вважається незалежним. При більш точному вирішенні враховують їхній взаємний зв'язок із зовнішнього простору введенням взаємної провідності випромінювання

$$G_{12} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \int_0^\pi \frac{\sin^2\left(\frac{\pi a}{\lambda_0} \cos \theta\right) \sin^3 \theta}{\cos^2 \theta} J_0(k_0 b \sin \theta) d\theta,$$

де  $G_{12}$  - взаємна провідність випромінювання;  $J_0(x)$  – функція Бесселя 0-го порядку.

КНД ПА в рамках даної моделі розраховується для решітки з двох щілин, рознесених на відстань  $b$  в площині  $E$

$$D = \frac{2}{1 + g_{12}},$$

де  $g_{12}$  - нормована до провідності вільного простору взаємна провідність випромінювання щілин.

Наявність діелектрика враховують шляхом введення для відрізка лінії шириною  $a$  ефективної діелектричної проникності підкладки. Даний метод дозволяє приблизно оцінити резонансну довжину смужкового випромінювача

і розрахувати його ДН як результат випромінювання двоелементної антеної решітки магнітних вібраторів.

В рамках апроксимації СА щілинами, прорізаними у провідному екрані, були спроби уточнення формули для розрахунку провідності випромінювання щілини.

$$G = 1/2 \cdot \sqrt{\varepsilon_0 / \mu_0} \left\{ k_0 a \cdot \text{si}(k_0 a) + \cos(k_0 a) - 2 + \sin(k_0 a) / k_0 a \right\} + \left[ 1 - (k_0 h)^2 / 24 \right] + k_0 h / 12 \cdot \left[ 1/3 + \cos(k_0 a) / (k_0 a)^2 - \sin(k_0 a) / (k_0 a)^3 \right] \quad , (3.2)$$

де  $\text{si}(x)$  - інтегральний синус.

Вираз (3.2) отримано на основі асимптотичного розкладання у формулі для ідеальної провідності нескінченної щілини в екрані.

Фізичні міркування підказують наявність залежності провідності випромінювання СА не лише від ширини пластини  $a$ , а й її довжини  $b$ .

Вхідний опір СА у точці резонансу з урахуванням взаємодії щілин у зовнішній області може бути визначений

$$Z_{\text{вх}} = \frac{1}{2G[1 + J_0(k_0 b)]} ,$$

де  $G$  – провідність випромінювання одиночної щілини;  $J_0(x)$  – функція Бесселя 0-го порядку.

Подальший розвиток цього методу призвів до створення математичної моделі у вигляді прямокутного резонатора з магнітними стінками по його периметру.

У 50-ті роки було запропоновано метод для аналізу смужкових ліній на основі моделі, при якій лінія передачі замінювалася еквівалентним хвилеводом з магнітними стінками (модель Олінера). Ширина хвилеводу  $a_{\text{еф}}$  та діелектрична проникність матеріалу  $\varepsilon_{\text{еф}}$ , що заповнює його внутрішній простір, вибиралися з умови рівності характеристичних опорів і постійних

розповсюдження лінії та еквівалентного їй хвилеводу. Смужкова антена замінюється відрізком хвилеводу та її випромінювання визначається як випромінювання торців хвилеводу. За прийнятим розподілом струму на торцях визначається векторний потенціал, через який виражаються компоненти поля далекої зони.

Інший метод знаходження характеристик випромінювання СА полягає в розбитті напівпростору на кілька областей з постійними параметрами та визначення потенціалу для кожної з цих областей з урахуванням виконання граничних умов між ними. При цьому, цей простір розглядається як такий, що обмежений екраном з діелектричним шаром. У свою чергу, компоненти збуджуваного поля визначаються через знайдений потенціал.

Вказаним методам властивий загальний недолік – непряме врахування шару діелектрика  $\epsilon$ , як наслідок, відсутність будь-якої інформації про поверхневі хвилі, що збуджуються в структурі шару діелектрик-екран. Наявність поверхневих хвиль при певних параметрах підкладки може призвести до істотного зниження ефективності СА, коли значна частина потужності, що підводиться, буде витратитися на збудження паразитних поверхневих хвиль.

Набули розвитку кілька нових методів, що дозволяють розрахувати характеристики випромінювання СА з урахуванням поверхневих хвиль. Ефективним та в загальному універсальним є метод, заснований на вирішенні рівняння Поклінгтока відносно невідомого розподілу струму по антені з використанням відповідної функції Гріна, отриманої для задання збудження поля горизонтальним диполем Герца на діелектричній підкладці. Подання функції Гріна використовується для напівпростору, обмеженого провідним екраном з шаром діелектрика у вигляді розкладу хвиль LE і LM. При цьому підінтегральні рівняння не мають особливостей і задача може бути легко підготовлена для чисельного розв'язання на ЕОМ. Дане уявлення дозволяє досить просто записати вирази опору випромінювання хвиль, пов'язаних з діелектриком (поверхневих) і випромінюваних у відкритий простір, а також

розрахунок частотних і геометричних параметрів СА.

### 3.2 Дослідження характеристик випромінювання смужкової антени – випромінювача параболічної антени

Маючи низку переваг, ПА мають знижений ККД, зумовлений тепловими втратами в матеріалі провідника і діелектрика, а також збудженням паразитних поверхневих хвиль. Тому є доцільним проведення дослідження характеристик випромінювання ПА залежно від геометричних розмірів, діелектричної проникності матеріалу підкладки і т.д. та формування рекомендацій щодо оптимального з точки зору ефективності роботи ПА вибору цих параметрів.

Розглянемо метод визначення характеристик випромінювання ПА, що ґрунтується на електродинамічному підході з використанням представлення функції Гріна для шару діелектрика під провідним екраном. Пропонований підхід враховує конструкторсько – технологічні параметри пристрою, втрати в діелектриці та металі, кількісні співвідношення між потужностями, що переносяться поверхневими та просторовими хвилями, детальний розрахунок зовнішніх провідностей та опорів випромінювання. Можливість врахування багатого характеру полів у ПА та навколишній структурі, що містить діелектрик, та детальне врахування вкладу поверхневих хвиль дозволяє використовувати цю методику розрахунку ПА аж до хвиль міліметрового діапазону та субміліметрового діапазонів. Цей метод представляє модель Мансона і отримав у літературі назву модифікований резонансний метод.

### 3.3 Модифікований резонансний метод

ПА збуджується випромінювачем у вигляді прямокутної лінії, що показана на рис. 3.1



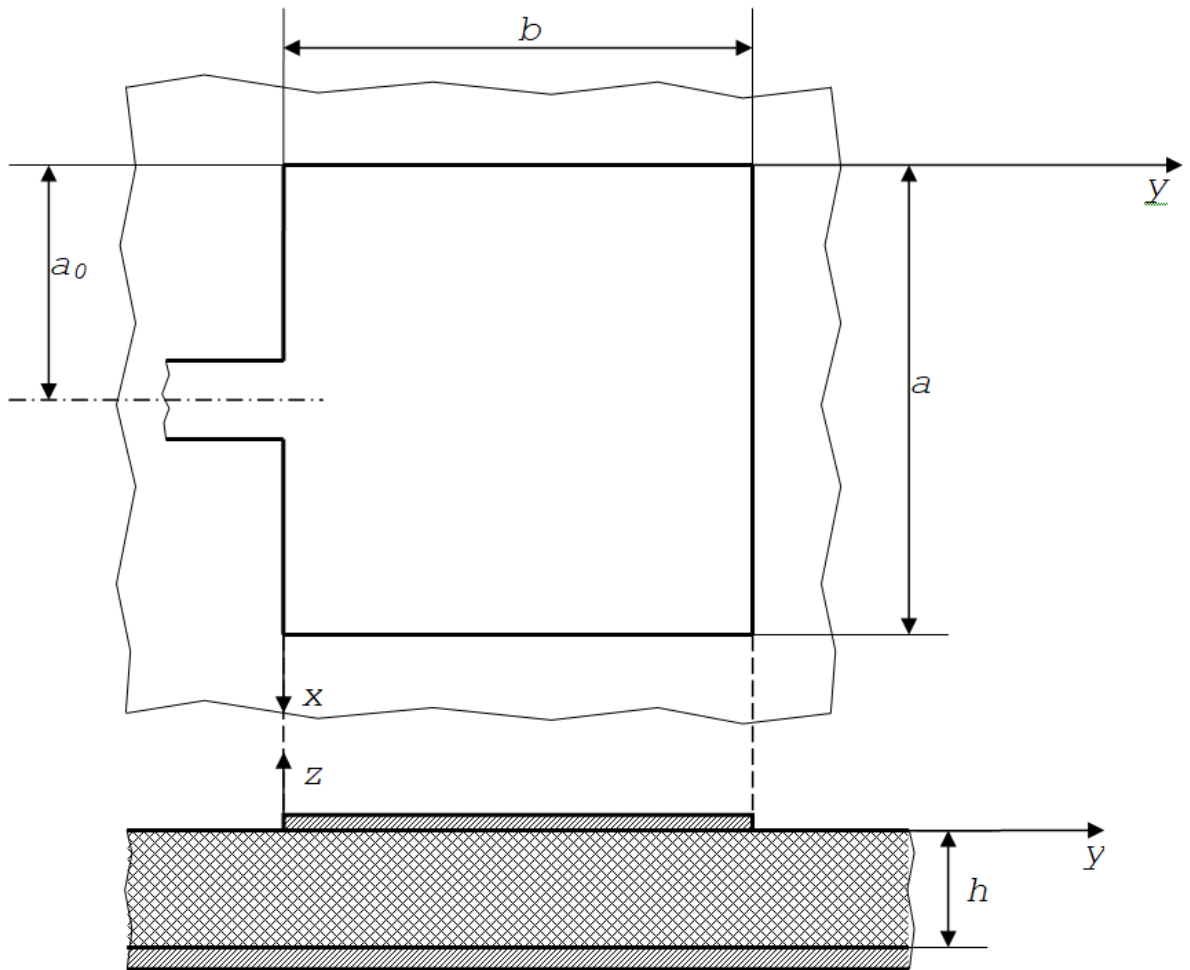


Рис. 3.1. Служкова антена

Для аналізу характеристик такої антени скористаємось уточненим резонаторним методом. Його уточнення – модифікація – пов'язана як із внутрішньою, так і з зовнішньою частиною відповідної граничної задачі. Внутрішня – резонаторна задача вирішується у два етапи. На першому – визначаються електромагнітні поля у прямокутному резонаторі з магнітними ( $x=0, a; y=0, b$ ) та електричними ( $z=0, h$ ) стінками. Для резонаторів, коли  $h \ll \lambda_0$ , поле всередині резонатора є суперпозицією коливань  $E_{mn0}$ .

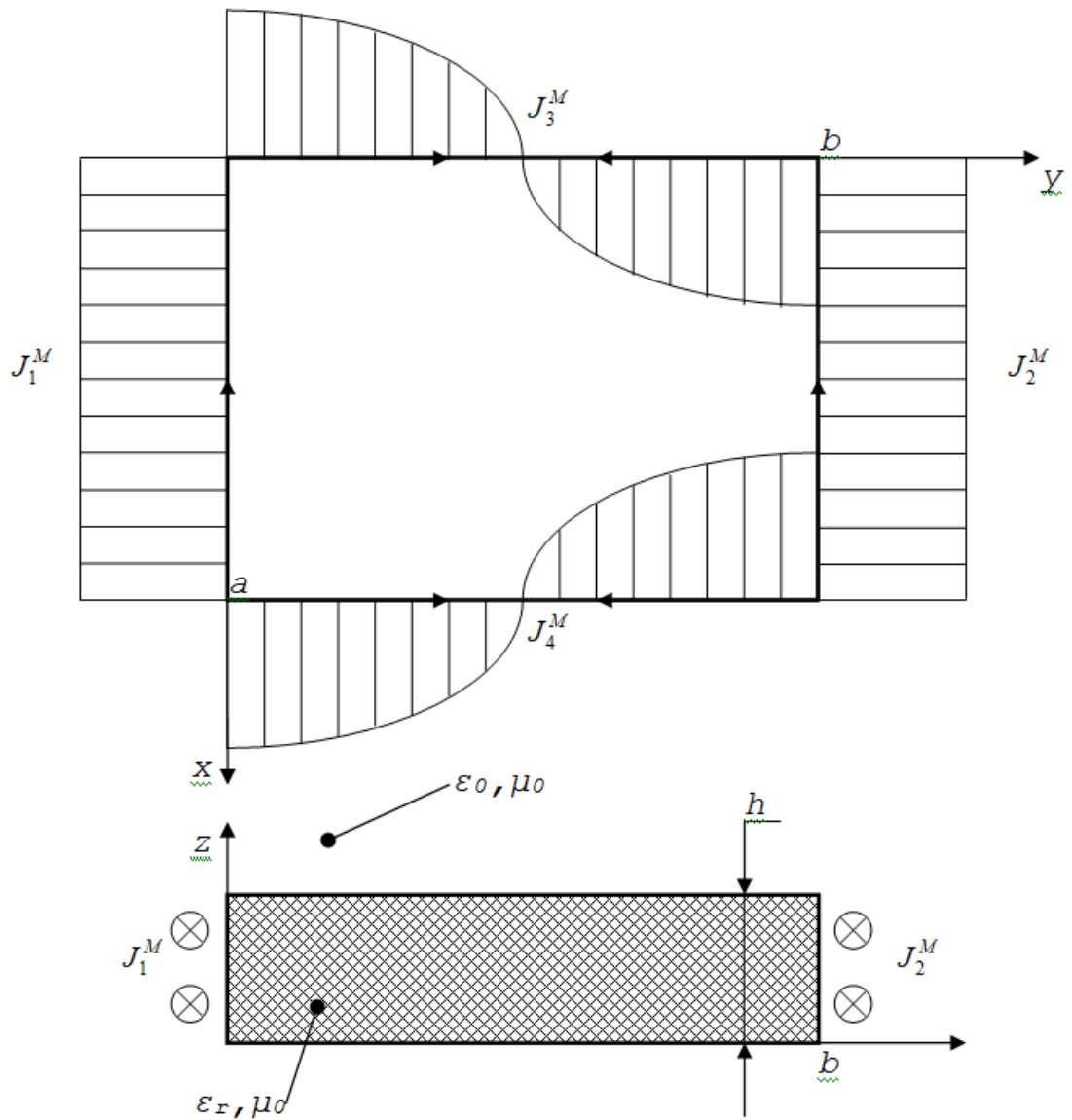


Рис. 3.2. До пояснення резонансного методу

І тут поздовжня складова електричного поля

$$E_z = -j\omega\mu_0 \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_m \varepsilon_n / ab (k_{mn} / k_1 \gamma_{mn})^2 \cos(\pi n a_0 / a) \cos(\pi m x / a) \cos(\pi n y / b) \quad , \quad (3.3)$$

де  $\gamma_{mn} = \sqrt{k_1^2 - k_{mn}^2} = \sqrt{k_1^2 - (\pi n / a)^2 - (\pi m / b)^2}$ ,  $k_1 = k_0 \sqrt{\varepsilon_r}$ .

Складова  $E_z$  (3) отримана інтегруванням Гріна Г11 з характеристичною частиною, пов'язаною з віссю  $u$ .

На другому етапі напруженість поля  $E_z$  використовується для

визначення еквівалентних магнітних струмів на всіх або тільки синфазно випромінюючих стінках резонатора. У цьому випадку стінки вважаються електричними, і еквівалентний магнітний струм рівним:

$$J^M = n \times E \quad (3.4)$$

де  $n$  - Зовнішня нормаль до стінки.

У зовнішній області покращення методу пов'язані з коректнішим визначенням провідностей випромінювання у присутності діелектричного шару і з урахуванням збудження як просторових так і поверхневих хвиль.

Використовуємо зазначені вище особливості модифікованого резонаторного методу при аналізі характеристик прямокутної СА.

### 3.4 Випромінювання просторових хвиль

Для будь-якої СА потужність випромінювання просторових хвиль є єдино корисною.

Розглянемо внутрішню область СА як об'єднаний резонатор, заповнений діелектриком і який функціонує поблизу першого резонансу (найбільша робоча довжина хвилі). Для оцінювання еквівалентних струмів, що виникають на стінках резонатора використано відповідні епюри (рис. 3.3). Струми на торцевих стінках ( $y=0, b$ ) у цьому випадку синфазні і формують основні компоненти поля випромінювання, тоді як струми на бічних стінках ( $x=0, a$ ) містять протифазні ділянки і беруть слабку участь у випромінюванні. Це випромінювання формує кросполяризаційну складову поля у зовнішній області, що знижує ефективність СА. Витрата енергії на утворення цього випромінювання буде врахована при визначенні добротності, робочої смуги та ККД антени.

З урахуванням цих зауважень активні частини провідності випромінювання по просторовим хвилям для торцевих отворів резонатора

$$G_r = \frac{1}{\pi^2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \int_0^{\pi/2} \int M_1^2 [1 + \cos(bk_0 \sin\theta \sin\varphi)] \times \left\{ \frac{\cos^2 \varphi}{1 + (Y^E)^2} + \frac{\cos^2 \theta \sin^2 \varphi}{1 + (Y^H)^2} \cdot \frac{(\varepsilon_r)^2}{\xi^4} + (k_0 h)^2 (\cos^2 \theta \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) \right\} \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (3.5)$$

Аналогічно для бічних отворів

$$G_{\text{біч}} = \frac{1}{\pi^2} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \int_0^{\pi/2} \int M_2^2 [1 + \cos(ak_0 \sin\theta \cos\varphi)] \times \left\{ \frac{\sin^2 \varphi}{1 + (Y^E)^2} + \frac{\cos^2 \theta \cos^2 \varphi}{1 + (Y^H)^2} \cdot \frac{(\varepsilon_r)^2}{\xi^4} + (k_0 h)^2 (\cos^2 \theta \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi) \right\} \cdot \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad , \quad (3.6)$$

$$\text{де } \xi = \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta} \quad , \quad (3.7)$$

$$Y^E = \frac{\xi}{\cos\theta} \operatorname{ctg} \xi \cdot k_0 h \quad , \quad Y^H = \frac{\cos\theta}{\xi} \varepsilon_r \operatorname{ctg} \xi \cdot k_0 h \quad , \quad (3.8)$$

$Y^E$  і  $Y^H$  – нормовані провідності по електричним та магнітним хвилям.

У формулах (5)-(8) враховується взаємодія випромінюючих отворів резонатора у зовнішній області.

При обчисленні зовнішньої провідності отворів резонатора по просторових хвилях було використано таке припущення: потужність, що випромінюється відкритим торцем резонатора (рис. 3.3,а), ділиться на дві частини - потужність, випромінювану плоским магнітним струмом у праву частину напівпростору, що містить шар діелектрика (рис. 3.3,в) і потужність, випромінювану в ліву частину напівпростору лінійним магнітним струмом (рис. 3.3,б).

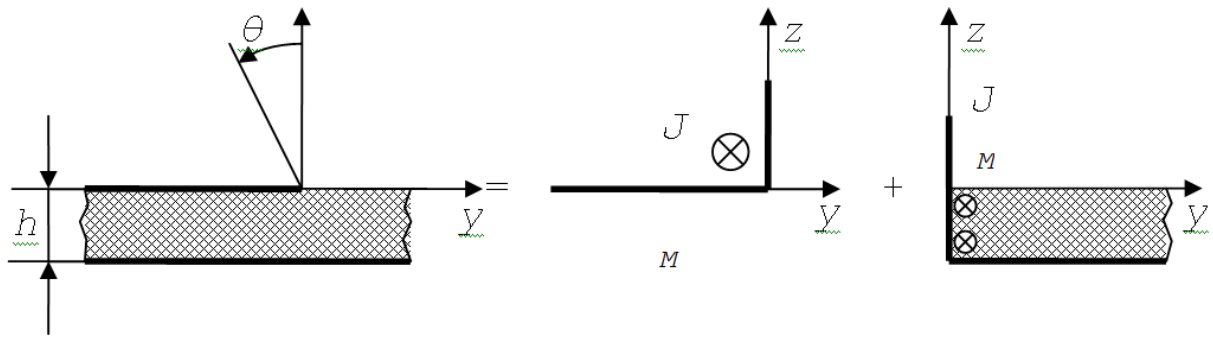


Рис. 3.3. Еплюри та напрямки еквівалентних струмів на відкритих стінках резонатора

Коефіцієнти  $M_1$  та  $M_2$  у виразах визначаються розподілом магнітного струму на кромках резонатора, тобто залежать від типу коливань у резонаторі. Для хвилі  $E_{010}$  (нижчий тип)

$$M_1 = \frac{a}{h} \cdot \frac{\sin(0,5ak_0 \sin\theta \cos\varphi)}{0,5ak_0 \sin\theta \cos\varphi}, \quad (3.9)$$

$$M_2 = \frac{4b}{\pi^2 h} (0,5bk_0 \sin\theta \cos\varphi) \frac{\cos(0,5bk_0 \sin\theta \cos\varphi)}{1 - [(bk_0/\pi) \sin\theta \sin\varphi]^2}. \quad (3.10)$$

### 3.5 Випромінювання поверхніх хвиль

При розрахунку провідностей випромінювання отворів резонатора по поверхневим хвилям використовуються представлення функції Гріна для області, що частково заповнена діелектриком, у вигляді розкладання хвиль  $LE$ ,  $LM$ . У цьому випадку провідність ділиться на частини, що відповідають хвилям згаданих типів. Однак для тонких шарів діелектрика, що становить основний практичний інтерес, у структурі поширюється лише поверхнева хвиля  $LM_1$ . Для цієї хвилі провідність кожного з чотирьох отворів прямокутного резонатора:

$$G_s = \frac{1}{\pi} \sqrt{\varepsilon_0} \frac{(\alpha_1^e)^2 \operatorname{tg}^2 r_1^e}{k_0 (A_1^e)^2} \int_0^{\pi/2} M_s^2 \cos^2 \Phi d\Phi, \quad (3.11)$$

де для торцевих отворів ( $y=0, b$ )

$$M_s = \frac{a}{h} \cdot \frac{\sin\left(0,5ak_0\sqrt{\varepsilon_r - (\alpha_1^e)^2} \sin\Phi\right)}{0,5ak_0\sqrt{\varepsilon_r - (\alpha_1^e)^2} \sin\Phi}, \quad (3.12)$$

для бічних отворів ( $x=0, a$ )

$$M_s = \frac{4b}{\pi^2 h} \cdot \frac{\cos\left(0,5bk_0\sqrt{\varepsilon_r - (\alpha_1^e)^2} \sin\Phi\right)}{1 - \left(\frac{bk_0}{\pi} \cdot \sqrt{\varepsilon_r - (\alpha_1^e)^2} \sin\Phi\right)^2} \left(0,5bk_0\sqrt{\varepsilon_r - (\alpha_1^e)^2} \sin\Phi\right). \quad (3.13)$$

де

$$\alpha_1^e = r_1^e / (k_0 h), \quad (3.14)$$

$$(A_1^e)^2 = \frac{h}{2} \cdot \left\{ \left[ 1 + \left( \frac{t_1^e}{r_1^e} \right)^2 \right] \frac{1}{t_1^e} + \left[ 1 + \left( \frac{t_1^e \varepsilon_r}{r_1^e} \right)^2 \right] \frac{1}{\varepsilon_r} \right\}, \quad (3.15)$$

$r_1^e$  і  $t_1^e$  знаходяться з розв'язання системи трансцендентних рівнянь

$$\begin{cases} r_1^e \operatorname{tg} r_1^e = \varepsilon_r t_1^e \\ (r_1^e)^2 + (t_1^e)^2 = (\varepsilon_r - 1)(k_0 h)^2 \end{cases} \quad (3.16)$$

З першого рівняння системи виразимо  $t_1^e$



$$t_1^e = \frac{r_1^e \operatorname{tg} r_1^e}{\varepsilon_r},$$

і підставимо в друге рівняння

$$(r_1^e)^2 + \frac{r_1^e \operatorname{tg} r_1^e}{\varepsilon_r} = (k_0 h)^2 \cdot (\varepsilon_r - 1).$$

Отримане трансцендентне рівняння відносно  $r_1^e$  легко розв'язується числовими методами.

### 3.6 Оцінювання втрат в СА та її ефективності

Врахування всіх видів втрат в СА є важливим етапом їх проектування. Резонансний характер роботи, наявність шару діелектрика, малі розміри – це фактори, що призводять до втрати частини корисної потужності та зниження ефективності антени.

Для хвилі типу E010 втрати в діелектриці підкладки СА з  $\operatorname{tg} \delta$  визначаються як провідність втрат у діелектриці

$$G_{di} = \frac{k_1^2 ab \operatorname{tg} \delta}{k_0 h} \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}}. \quad (3.17)$$

Провідність втрат у металі

$$G_m = R_s \frac{k_1^2 ab}{(k_0 h)^2} \cdot \frac{\varepsilon_0}{\mu_0}, \quad (3.18)$$

де  $R_s = 10,88 \cdot 10^{-3} \sqrt{10^7 / (\delta \cdot \lambda_0)}$ , Ом - опір металевих стінок резонатора, пов'язаний з питомою провідністю металу смужки і довжиною хвилі  $\lambda_0$ .

Загальна провідність прямокутної СА

$$G_{\Sigma} = G_r + G_{r\bar{\sigma}\bar{\sigma}} + G_S + G_{s\bar{\sigma}\bar{\sigma}} + G_{di} + G_m. \quad (3.19)$$

ККД СА можна оцінювати різними способами. Насам перед можна оцінити потужність випромінювання просторових хвиль. В цьому випадку ККД при основному типі поляризації може бути оцінений як:

$$\eta = \frac{G_r}{G_{\Sigma}}. \quad (3.20)$$

Також, ККД по всій випромінюваній потужності

$$\eta' = \frac{G_{\Sigma} - G_{di} - G_m}{G_{\Sigma}}. \quad (3.21)$$

Втрати пов'язані з величинами ККД безпосередньо

$$L = 10 \lg \frac{1}{\eta}, \quad L' = 10 \lg \frac{1}{\eta'}. \quad (3.22)$$

Нарешті, провідність  $G_r$  використовують для обчислення КНД антени з основною поляризацією поля:

$$D = \frac{4(k_0 a)^2}{\pi G_r} \cdot \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}}. \quad (3.23)$$

Добротність випромінювання СА може бути визначена за формулою

$$Q = \varepsilon_r D \frac{\lambda_0}{16h}. \quad (3.24)$$

Для прямокутних СА характерні значення добротності випромінювання становлять 30...80.

За відомим значенням добротності та допустимим значенням коефіцієнта стоячої хвилі можна визначити робочу смугу СА

$$\Delta f = (K_{cmu} - 1) / Q \sqrt{K_{cmu}}. \quad (3.25)$$

Вхідний опір СА визначається як величина, що обернена до загальної провідності

$$Z_{ex} = \frac{1}{G_{\Sigma}}. \quad (3.26)$$

Слід зазначити, що вхідний опір прямокутної СА легко регулюється підбором положення точки живлення. Вхідний опір максимальний при живленні на краю і зміниться пропорційно до множника  $\sin^2(\pi a_0/b)$  при розташуванні точки живлення на відстані  $a_0$  від центру антени. Якщо точка живлення зсунута до центру, то в пластині антени робиться характерний виріз.

### 3.7 Діаграма направленості СА

При елементарному підході ДН прямокутної СА в площині Н еквівалентна діаграмі щілини довжиною  $a$ , прорізаної в плоскому провідному екрані, що має рівномірний розподіл поля. У площині Е випромінювання СА визначається як випромінювання таких двох щілин, рознесених на відстань  $b$ . При такому підході вплив діелектричного шару не приймається до уваги. У деяких роботах цей вплив враховується введенням додаткового множника

$\cos(k_0 h \sqrt{\varepsilon_r} \cos \theta)$ , що враховує дзеркальне відбиття магнітного струму в екрані.

Більш коректне інтегрування розподілу еквівалентних магнітних струмів по апертурі випромінюючих торців СА призводить до виразів для ДН У площині Н ( $\varphi=0$ )

$$F_\varphi(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + (\tilde{\xi} \operatorname{ctg} \tilde{\xi} k_0 h)^2}} \left[ \frac{\sin(0,5 k_0 a \sin \theta)}{0,5 k_0 a \sin \theta} \right], \quad (3.27)$$

у площині Е ( $\varphi=\pi/2$ )

$$F_\theta(\theta) = \frac{2 \tilde{\xi} \cos \theta}{\sqrt{\tilde{\xi} + (\varepsilon_r \cos \theta \operatorname{ctg} \tilde{\xi} k_0 h)^2}} \left[ \frac{\cos(0,5 k_0 b \sin \theta)}{1 - (k_0 b / \pi \sin \theta)^2} \right], \quad (3.28)$$

де  $\tilde{\xi} = \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta}$ .

### 3.8 Алгоритм розрахунку

Запропоновано алгоритм розрахунку параметрів випромінювання прямокутної смужкової антени, як опромінювача параболічної антени (рис. 3.4). Він може бути використаний для визначення характеристик конкретного випромінюючого елемента.

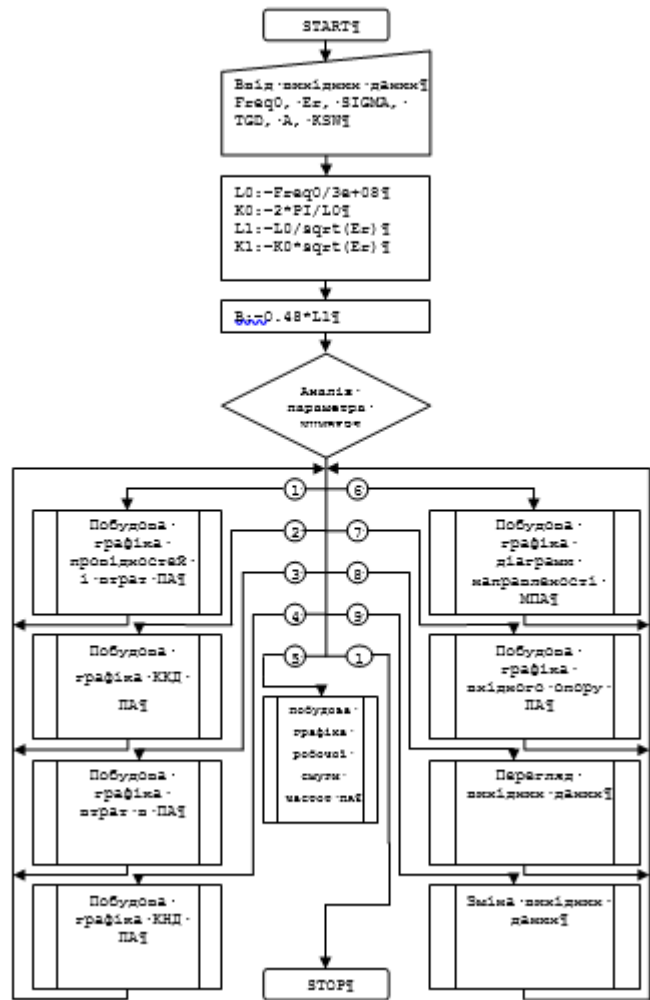


Рис. 3.4. Алгоритм програми розрахунку характеристик СА

Встановлено, що для всіх значень  $\epsilon_r$  характерне зростання провідностей втрат у металі та діелектрику ( $G_m$  і  $G_{di}$ ) зі зменшенням товщини підкладки. З іншого боку, зі збільшенням товщини підкладки збільшуються значення провідностей торцевих і бічних отворів по поверхневим хвилям ( $G_{Stop}$  і  $G_{бок}$ ), що пов'язано з інтенсифікацією збудження поверхневих хвиль в товстих підкладках. Причому для вищих значень  $\epsilon_r$  збудження поверхневих хвиль відбувається інтенсивніше. Однак, зі зростанням  $\epsilon_r$  знижується вклад у загальне випромінювання СА кросполяризаційної складової, що обумовлена провідністю випромінювання бічних отворів по просторовим хвилям  $G_{r.бок}$ , що пояснюється зменшенням резонансної довжини випромінюючого елемента при його фіксованій ширині (в даному випадку  $a=12,5$  мм), а отже зменшенням

випромінюючої бічної щілини.

Зростання провідностей випромінювання поверхневими хвилями обмежує зверху діапазон можливих товщин підкладки, так як в іншому випадку різко знижується ККД параболічної антени і відповідно зростають втрати.

Кількісне співвідношення між провідностями (потужностями) випромінювання торцевих і бічних отворів резонатора підтверджує правильність прийнятих при формулюванні модифікованого резонаторного методу припущень про визначальний вплив торцевих отворів на вхідний опір антени.

Отже, отримані залежності показують, що є діапазон товщин підкладки, що будуть оптимальні з точки зору ефективності ( $h/\lambda_0=0,0125\dots0,025$ ). Істотне зниження ККД при зменшенні товщини підкладки пояснюється зростанням теплових втрат, а зниження ефективності при великих  $h/\lambda_0$  – втратами на збудження поверхневих хвиль.

Ширина ДН СА за умовою половинної потужності досить велика і становить близько  $100^\circ$  в Н-площині і  $120^\circ \dots 130^\circ$  в Е-площині, причому залежність форми ДН від відносної товщини підкладки проявляється слабо.

Що стосується вхідного опору СА, він знижується зі зростанням відносної діелектричної проникності і має максимум при оптимальних з точки зору ККД значеннях товщини підкладки. Забезпечення узгодження СА по живленню може бути ускладнене при невисоких значеннях вхідного опору, оскільки в цьому випадку буде потрібне введення додаткових узгоджувальних відрізків лінії, що призведе до зниження масогабаритних показників. Якщо вхідний опір СА вищий ніж хвильовий опір лінії обміну даних, то в даному випадку узгодження може бути забезпечене підбором точки живлення, оскільки вхідний опір прямокутної СА максимальний при живленні на краю і зменшується пропорційно до множника  $\cos^2(k_1 b_0)$  при положенні точки живлення на відстані  $b_0$  від краю.

При аналізі ширина СА була рівною  $0,5\lambda_0$ . Збільшення ширини антени

не дає суттєвого зростання ефективності, водночас порушується рівномірність розподілу струму на кромках (через вплив вищих гармонік), знижується вхідний опір, що ускладнює узгодження СА з лінією живлення та погіршуються масогабаритні характеристики.

### 3.9 Висновки до розділу 3

Встановлено визначальний вплив на характеристики параболічної антени вибору типу опромінювача. В якості останнього використано смужкову антену, розміри якої набагато менші за розміри дзеркала. Для такого типу опромінювача характерними є простота конструкції, висока технологічність, мала маса, повторюваність розмірів, низька вартість виготовлення. Однак, наявність в конструкції смужкової антени діелектричного покриття та пов'язаних з ним поверхневих хвиль ускладнює визначення характеристик випромінювання такої антени, ускладнює експериментальне налаштування. Відповідно розглянуто методи аналізу смужкових антен і встановлено, що їх спільним недоліком є непряме врахування впливу шару діелектрика. При цьому антени мають знижений ККД внаслідок наявності теплових втрат в матеріалі провідника і діелектрика, а також збудження паразитних поверхневих хвиль. Проведено аналіз характеристик випромінювання параболічної антени залежно від геометричних розмірів та діелектричної проникності матеріалу підкладки. Застосовано модифікований резонансний метод визначення характеристик випромінювання антени, що ґрунтується на електродинамічному підході. При цьому враховуються конструкторсько – технологічні параметри антени, втрати в діелектрикові та метали, кількісні співвідношення між потужностями, що переносяться поверхневими та просторовими хвилями, можливим стає детальний розрахунок зовнішніх провідностей та опорів випромінювання. Використовуючи цей метод отримано залежності для оцінювання випромінювання поверхневих хвиль, втрат та ефективності антени.

Запропоновано алгоритм розрахунку параметрів випромінювання прямокутної смужкової антени, як опромінювача параболічної антени. Він може бути використаний для визначення характеристик конкретного випромінюючого елемента. Так, для випадку смужкової антени встановлено, що зі зменшенням товщини підкладки відбувається зростання провідностей втрат у металі та діелектрику. Зі збільшенням товщини підкладки збільшуються значення провідностей торцевих і бічних отворів по поверхневим хвилям. Зі зростанням відносної діелектричної проникності підкладки знижується величина кросполяризаційної складової, що пояснюється зменшенням резонансної довжини випромінюючого елемента при його фіксованій ширині. Зростання провідностей випромінювання поверхневими хвилями обмежує зверху діапазон можливих товщин підкладки, так як в іншому випадку різко знижується ККД параболічної антени і відповідно зростають втрати.

Існує діапазон товщин підкладки, що будуть оптимальні з точки зору ефективності. При цьому, відношення товщини підкладки до довжини хвилі має становити  $0,0125 \dots 0,025$ .



## РОЗДІЛ 4

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

#### 4.1 Охорона праці

##### *Заходи електробезпеки при роботі з виробом*

При роботі з виробом необхідно дотримуватись загальні правила техніки безпеки. Залежно від способу захисту обслуговуючого персоналу від удару електричним струмом блок живлення можна віднести до I або II класу відповідно до діючого стандарту.

##### Правила техніки безпеки:

- при підозрі на несправність під час підготовки блоку до роботи необхідно відключити його від мережі електроживлення (знеструмити). Несправний блок категорично забороняється експлуатувати. Підозріння на несправність виникає із-за виникнення підозрілих шумів, тріску, запахів і тому подібне.

- заземлення на труби опалювання і водопроводу не можна вважати задовільним, оскільки завжди є вірогідність, що в іншому приміщенні на цю ж трубу заземлений блок із значним витоком струму, який може поширитися на пацієнта і обслуговуючий апаратуру персонал.

- якщо одночасно використовується декілька блоків, вони повинні мати одну точку заземлення. Не можна підключати блоки до землі послідовно, в цьому випадку утворюється "петля" заземлення, по якій циркулюють струми витоку.

- заміна патронів, вилок і інших з'єднувачів повинна робитися лише фахівцями, хоча на перший погляд робота здається дуже простою.

##### *Надання першої медичної допомоги при електроударах*

Першу допомогу потерпілому від удару електричним струмом потрібно надавати максимально швидко і правильно. Необхідно, насамперед, людину, що постраждала, звільнити від струму, оскільки тривалість дії впливає на

тяжкість електротравми. Перш за все треба відключити подачу електроенергії до місця події за допомогою рубильника або вимикача. Якщо вимикача поруч немає, а напруга живлячої лінії не перевищує 1000 В (напруга в побутових електричних мережах не перевищує 220 В), то звільняють потерпілого за допомогою сухого предмету не провідного електрика: палиці, дошки, сухої частини одягу, наприклад підлоги піджака або коміра куртки. Відтягаючи потерпілого за одяг, потрібно потурбуватися про власну ізоляцію. Для цієї мети підійде сухий шарф, надітий на руку, суконна або шкіряна кепка; можна встати на гумовий автомобільний килимок або прихопити нею потерпілого; можна перерубати дроти сокирою з сухою дерев'яною рукояткою. Перурабати або перекушувати дроти необхідно поодиноці, кожен фазу окремо. При напрузі в мережі вище 1000 В слід надіти діелектричні рукавички і боти, діяти ізолюючою штангою або виробити замикання дротів накоротко, накинувши на них гнучкий дріт, що має чималий перетин, аби не перегорів при виникненні струму короткого замикання. Іншими словами, потрібне спеціальне устаткування.

У всіх випадках удару електричним струмом потрібно викликати швидку медичну допомогу. Якщо потерпілий в свідомості, але був в непритомності, або якщо знаходиться в несвідомому стані, але дихання і пульс збережені, то його треба положити, розстігнути одяг, зігріти тіло і створити спокійну обстановку довкола. Аби потерпілий не захлинувся від блювоти, голову необхідно обернути набік. Коли потерпілий приходить в свідомість, йому забороняють підійматися і ходити до приїзду швидкої медичної допомоги. Зазвичай таких потерпілих доставляють в стаціонарне відділення і декілька днів спостерігають за їх станом.

Якщо після звільнення від дії електричного струму потерпілий не дихає або дихання у нього рідке, неглибоке, і шкірні покриви поступово синіють, то необхідно провести штучне дихання. Дихання з рота в рот або з рота в ніс забезпечують вступ в легені рятованого необхідної кількості повітря, придатного для дихання. Вдування повітря здійснюється через марлю або

носову хустку. При цьому методі штучного дихання видно, чи потрапляє повітря в легені рятованого, на вдиху у нього підіймаються ребра, а видих відбувається пасивно, за рахунок природної еластичності грудної клітки.

#### 4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

*Виявлення і оцінка інженерної обстановки при вибуху газоповітряної суміші на об'єкті (цеху, дільниці)*

В ході досліджень необхідно, керуватися наступними положеннями:

а) оцінка стійкості елементів об'єкта проводиться до дії кожного уражаючого фактора окремо;

б) всі елементи об'єкта підлягають дії, вражаючих факторів одночасно і в однаковій мірі;

в) дослідження доцільно проводити для найнесприятливіших умов.

Це дозволяє визначити максимальні значення параметрів вражаючих факторів та доцільну межу підвищення стійкості роботи об'єкту (цеху, дільниці). Розглянемо методику оцінки стійкості до кожного уражаючого фактора.

Методика оцінки стійкості об'єкту (цеху) до дії світлового (теплого) випромінювання

Як показник стійкості об'єкта до дії світлового випромінювання приймається максимальне значення світлового імпульсу, при якому ще не починається запалювання елементів об'єкту і виникнення пожеж. Це значення світлового імпульсу і вважається межею стійкості об'єкту до світлового випромінювання –  $I_{lim}$  (кДж/м<sup>2</sup>).

Послідовність оцінки стійкості об'єкту (цеху, дільниці) до світлового випромінювання:

- визначається максимальне значення очікуваного світлового (теплого) імпульсу;

- визначаються ступінь вогнестійкості будівель і споруд з врахуванням їх характеристики;
- визначаємо категорію пожежонебезпечності цеху;
- визначаємо пожежну обстановку в цеху, тобто при яких світлових імпульсах можливе спалахування окремих елементів цеху ;
- визначаємо межу стійкості цеху ( $I_{lim}$ ) для найбільш уразливих елементів цеху, у якого мінімальна межа стійкості;
- порівнюємо межу стійкості цеху з максимальним значенням очікуваного світлового імпульса.

Якщо  $I_{lim} \geq I_{max}$  то цех (об'єкт) стійкий до світлового випромінювання.

Якщо  $I_{lim} < I_{max}$  то цех (об'єкт) не стійкий до світлового випромінювання.

З результатів досліджень і оцінки пожежної обстановки робляться висновки і пропозиції з підвищенням стійкості об'єкту до світлового випромінювання.

У висновках вказуються:

- межа стійкості об'єкту до світлового (теплого) випромінювання;
- очікуваний на об'єкті максимальний світловий (теплого) імпульс.
- найбільш небезпечні в пожежному значенні елементи об'єкту і можлива пожежна обстановка на об'єкті .

На основі зроблених висновків розробляються конкретні заходи щодо підвищення протипожежної стійкості об'єкту .

*Методика оцінки стійкості до дії ударної хвилі*

Як показник стійкості інженерно-технічного комплексу до дії ударної хвилі приймається таке значення надлишкового тиску, при якому будівлі, споруди і обладнання зберігається або отримують такі руйнування, які можливо відновити в короткі терміни. Це значення надлишкового тиску прийнято вважати межею стійкості об'єкту до впливу ударної хвилі –  $\Delta P_{\Phi lim}$ , кПа.

Послідовність оцінки:

- визначається  $\Delta P_{\Phi \max}$ , кПа – максимальне очікуване значення надлишкового тиску;

- знаючи характеристику основних елементів об'єкту /цеху, дільниць/, від яких залежить випуск запланованої продукції, починають дослідження стійкості кожного елемента;

- всі основні елементи кожного цеху, дільниці або окремої споруди заносять в спеціальну таблицю;

- на основі вивчення проектно-будівельної та технологічної документації складають і заносять в ту ж таблицю коротку характеристику кожного досліджуваного елемента;

- визначаються при яких значеннях надлишкового тиску ( $\Delta P_{\Phi}$ ) досліджувані елементи отримують слабкі, середні, сильні та повні руйнування;

- аналізуючи заповнену таблицю, визначимо межу стійкості найбільш уразливого елемента цеху;

- порівнюємо загальну межу стійкості цеху  $\Delta P_{\Phi \lim}$  з максимальним значенням очікуваного надлишкового тиску  $\Delta P_{\Phi \max}$ ;

Якщо  $\Delta P_{\Phi \lim} \geq \Delta P_{\Phi \max}$ , то цех (об'єкт) стійкий до ударної хвилі.

Якщо  $\Delta P_{\Phi \lim} < \Delta P_{\Phi \max}$ , то цех (об'єкт) не стійкий .

На основі аналізу результатів оцінки стійкості по кожному цеху, дільниці, системі і об'єкту в цілому робляться висновки і заходи, в яких вказуються:

- межу стійкості об'єкту;
- найбільш уразливі елементи цеху (об'єкту);
- характер і ступінь руйнувань, очікуваних на об'єкті від ударної хвилі при  $\Delta P_{\Phi \max}$  і можливі збитки;

- межу доцільного підвищення стійкості найбільш уразливих елементів цеху (об'єкту);

- заходи із підвищення межі стійкості об'єкту до дії ударної хвилі.

### 4.3 Висновки до розділу

В розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» описано заходи електробезпеки при роботі з виробом, а також виявлення і оцінка інженерної обстановки при вибуху газоповітряної суміші на об'єкті (цеху, дільниці).

## ВИСНОВКИ

Проаналізовано типи та принцип роботи антен, що використовуються в системах обміну даними, зокрема в системах супутникового телебачення. Проаналізовано особливості будови та роботи дипольної антени, несиметричного вібратора, вібраторної логіперіодичної антени, спіральної антени, ромбічної антени, рупорної антени, параболічної антени, антени Кассегрена та антени Грегорі. Встановлено основні переваги використання параболічної антени для роботи в системах супутникового телебачення, зокрема високу пропускну здатність, стійкість до дії завад, високу чутливість, характеристики направленості.

Проаналізовано принцип роботи параболічної антени, що складається з параболічного дзеркала та опромінювача в фокусі параболоїда. Опромінювачем є смужкова антена. Проаналізовано геометричні властивості поверхні параболічного дзеркала антени та їх вплив на фазові характеристики отриманих сигналів.

Встановлено визначальний вплив на характеристики параболічної антени вибору типу опромінювача. В якості останнього використано смужкову антену, розміри якої набагато менші за розміри дзеркала. Для такого типу опромінювача характерними є простота конструкції, висока технологічність, мала маса, повторюваність розмірів, низька вартість виготовлення. Однак, наявність в конструкції смужкової антени діелектричного покриття та пов'язаних з ним поверхневих хвиль ускладнює визначення характеристик випромінювання такої антени, ускладнює експериментальне налаштування. Відповідно розглянуто методи аналізу смужкових антен і встановлено, що їх спільним недоліком є непряме врахування впливу шару діелектрика. При цьому антени мають знижений ККД внаслідок наявності теплових втрат в матеріалі провідника і діелектрика, а також збудження паразитних поверхневих хвиль. Проведено аналіз

характеристик випромінювання параболічної антени залежно від геометричних розмірів та діелектричної проникності матеріалу підкладки. Застосовано модифікований резонансний метод визначення характеристик випромінювання антени, Використовуючи цей метод отримано залежності для оцінювання випромінювання поверхневих хвиль, втрат та ефективності антени.

Запропоновано алгоритм розрахунку параметрів випромінювання прямокутної смужкової антени, як опромінювача параболічної антени. Так, для випадку смужкової антени встановлено, що зі зменшенням товщини підкладки відбувається зростання провідностей втрат у металі та діелектрику. Зі збільшенням товщини підкладки збільшуються значення провідностей торцевих і бічних отворів по поверхневим хвилям. Зі зростанням відносної діелектричної проникності підкладки знижується величина кросполяризаційної складової, що пояснюється зменшенням резонансної довжини випромінюючого елемента при його фіксованій ширині. Зростання провідностей випромінювання поверхневими хвилями обмежує зверху діапазон можливих товщин підкладки, так як в іншому випадку різко знижується ККД параболічної антени і відповідно зростають втрати.

Існує діапазон товщин підкладки, що будуть оптимальні з точки зору ефективності. При цьому, відношення товщини підкладки до довжини хвилі має становити  $0,0125 \dots 0,025$ .



## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Олександр Серов. DVB-T2 - цифрове телебачення другого покоління // 625.
2. Antenna Theory: Analysis and Design 4th Edition by Constantine A. Balanis
3. Основи теорії антен: навчальний посібник / А.П. Пудовкін, Ю.М. Панасюк, О.О. Іванків. - Х: Вид-во ВПО ХАІ, 2011. - 92 с.
4. Бова Н. Т., Резников Г. Б. Антенны и устройства СВЧ. — К.: Вища школа, 1982. — 272 с.
5. Сподобаєв Ю.М. К61 Основи теорії антен та поширення радіохвиль: Навчальний посібник / За ред. В.П. Кубанова. - К.: ІНУЛ-ПГУТІ, 2016. - 258 с.: іл.
6. <http://antena-shop.ua/тороїдальна-супутникова-антена-t90pm>.
7. [http://www.sat54.ua/catalog.php?prod\\_id=1191](http://www.sat54.ua/catalog.php?prod_id=1191).
8. <http://www.findpatent.ua/patent/259/2598399.html>.
9. [www.ticra.com/products/software/grasp/grasp-student-edition](http://www.ticra.com/products/software/grasp/grasp-student-edition).
10. <http://www.ticra.com/news/grasp-version-10>.
11. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2022. – 150 с.
12. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної бо та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.
13. Дозорський В.Г., Дозорська О.Ф., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Паньків І. М., Яворська Є.Б. Структура системи відбору біосигналів для задачі відновлення комунікативної функції людини. Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. – Хмельницький: редакція

журналу "Вісник Хмельницького національного університету". – 2019. - №2(271) – с. 183-186.

14. Хвостівська Л.В., Осухівська Г.М., Хвостівський М.О., Шадріна Г.М., Дедів, І. Ю. Розвиток методів та алгоритмів обчислення періоду стохастичних біомедичних сигналів для медичних комп'ютерно-діагностичних систем. Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. /Категорія В/ 2019. Вип. 79. С. 78-84. doi: 10.20535/RADAR.2019.79.78-84.

15. Дозорська О.Ф., Яворська Є.Б., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є. і Дедів І.Ю. Метод виявлення ознак основного тону в структурі електроміографічних сигналів для задачі компенсації порушеної комунікативної функції людини», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування, (81), с. 56-64. doi: 10.20535/RADAR.2020.81.56-64.

16. Дедів І.Ю. Структурний синтез вібротерапевтичної апаратури / О.В. Гевко, В.Г. Дозорський, Л.Є. Дедів, І.Ю. Дедів, О.Ф. Дозорська // Перспективні технології та прилади, № 20, Луцьк, 2022. – с. 23-31.

17. Mathematical and Algorithmic Support of Detection Useful Radiosignals in Telecommunication Networks. L. Khvostivska, M. Khvostivskyu, V. Dunetc, I. Dediv. CEUR Workshop Proceedings. 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2022 Ternopil 22- 24 November 2022. Том 3309, с. 314-318.

18. Дедів І.Ю., Сверстюк А.С., Дедів Л.Є., Дозорський В.Г., Хвостівський М.О. Математичне моделювання, методи та програмне забезпечення опрацювання дихальних шумів у комп'ютерних аускультативних діагностичних системах: наукова монографія. Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. 126 с. ISBN 978-617-574-219-8.

19. Дедів Л.Є., Сверстюк А.С., Дедів І.Ю., Хвостівський М.О., Дозорський В.Г., Яворська Є.Б. Математичне та комп'ютерне моделювання електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу: наукова

монографія. Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. 120 с. ISBN 978-617-574-218-1.

20. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunets V., Dediv I. (2023) Matematychnе, alhorytmichne ta prohramne zabezpechennia synfaznoho vyivlennia radiosyhnaliv v elektronnykh komunikatsiinykh merezhakh iz zavadamy [Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio signals in electronic communication networks with noises]. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol. 111, no 3, pp. 48-57 [in Ukrainian].

21. Dozorskyi V., Dediv I., Sverstiuk S., Nykytyuk V., Karnaukhov A. The Method of Commands Identification to Voice Control of the Electric Wheelchair. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.233-240. ISSN 1613-0073. CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine.

22. Liliya Khvostivska, Iryna Dediv, Mykola Khvostivskyi, Leonid Dediv. Computer Tool for generating of Test Radio Signals for verification of the Radio Computer Systems Software. ADVANCED APPLIED ENERGY and INFORMATION TECHNOLOGIES 2021. Proceedings of the International Conference (Ternopil, 15-17 of December 2021.) / Ministry of Education and Science of Ukraine, Ternopil Ivan Puluj National Technical Universtiy [and other.]. – Ternopil : TNTU, Zhytomyr : «Publishing house “Book-Druk”» LLC, 2021. – P.200-205.

# ДОДАТКИ

**УДК 621.396.621.2**

**В.Б. Сендецький, М.Ю. Степанюк, В.С. Форгель, І.Ю. Дедів, к.т.н., доц.**

(Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна)

### **ЗАДАЧА ПРОЕКТУВАННЯ АНТЕН ДЛЯ СИСЕМ СУПУТНИКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ**

**V.B. Sendetskyi, M.Yu. Stepaniuk, V.S. Forgel, I.Yu. Dediv, Ph.D., Assoc. Prof.**

### **THE TASK OF DESIGNING ANTENNAS FOR SATELLITE COMMUNICATION SYSTEMS**

Сьогодні інтенсивно розвивається ринок засобів супутникового зв'язку. Щорічне збільшення обсягу виробництва становить понад 30%. Розробка антени для прийому сигналів із штучних супутників землі є найважливішою частиною наземної системи супутникового зв'язку. Вона є одним із найбільш складних та дорогих пристроїв, що входять до складу приймальної установки. Тому питанням розробки антен та пошуку оптимальних технологічних рішень при їх виробництві приділяється велика увага.

Сьогодні найбільш поширені параболічні однозеркальні антени, процес виробництва дзеркальних рефлекторів яких є дуже складний. Але з розвитком технологій дедалі помітніше місце займають плоскі антени, зокрема фазовані антенні решітки, що містять велику кількість випромінювачів. Кожен випромінювач збуджується від окремого фазованого генератора або підсилювача потужності, а також містить окремий керований фазообертач. При цьому вартість таких антен є високою. Одним із способів зниження вартості антеної решітки є застосування оптичної схеми живлення відкритого типу. Найбільш широко відомі решітки з оптичним збудженням випромінювачів, побудовані за аналогією із дзеркальними та лінзовими антенами. Також, в мікросмужкових дифракційних решітках плоский рефлектор повинен при відбиванні сферичної або циліндричної хвилі опромінювача забезпечити вирівнювання фазового фронту. Досягається це запровадженням додаткової фазової затримки в випромінювачах решітки. Таким чином, основним для проектування плоских рефлекторів з дискретних елементів є питання вибору способу реалізації необхідної затримки фази. Застосування мікросмужкових елементів як випромінювачів решітки дозволяє цю проблему вирішити зручнішим способом, шляхом правильного вибору геометрії випромінювача та його конструктивних розмірів. При цьому особливий інтерес представляють такі дзеркальні антени з інтегральними модулями, що включають випромінювач антеної решітки і керований фазообертач. Відсутність традиційних фазообертачів забезпечує хороші вартісні, технологічні та конструктивні показники.

Таким чином, антени наземних станцій систем зв'язку та радіотелемовлення через штучні супутники землі є складними технічними пристроями. Основні проблеми, що зустрічаються під час створення таких антен, полягають у тому, що необхідно досягти максимально можливого зменшення рівня бічних пелюсток діаграми направленості антени, що досягається вибором відповідної форми та конструкції дзеркал, а також точністю їх виготовлення. Також важливим є підвищення якості антенних систем шляхом збільшення коефіцієнта корисної дії.

Таким чином, розвиток систем супутникового зв'язку призвів до створення значного розмаїття приймальних наземних антен. Власне в дослідженнях і проводиться проектування конструкцій антен для зазначеного виду зв'язку.