

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»
Кафедра радіотехніки та телекомунікацій

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи з дисципліни
«Антени спеціального призначення
та САПР антен»
для студентів спеціальності
172 «Електронні комунікації та радіотехніка»
ОПП «Радіотехніка»
всіх форм навчання

Методичні вказівки для самостійної роботи з дисципліни «Анени спеціального призначення та САПР антен» для студентів спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» ОПІ «Радіотехніка» всіх форм навчання / Укл.: Т.І. Бугрова, Г.В. Мороз. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 42 с.

Укладачі: к.т.н., доц. Т.І. Бугрова,
ст. викладач. Г.В.Мороз

Рецензент: д.т.н., проф. Д.М. Піза

Відповідальний
за випуск: к.т.н., доц. Т.І. Бугрова

Затверджено:
на засіданні кафедри
радіотехніки та телекомунікацій
Протокол № 5 від 05.04.2024 р.

Рекомендовано до видання НМК
факультету інформаційної безпеки та
електронних комунікацій
Протокол № 6 від 24.04.2024 р.

ЗМІСТ

1	Мета й задачі дисципліни АСП та САПР, її місце у навчальному процесі	4
1.1	Мета викладання дисципліни АСП та САПР	4
1.2	Задачі вивчення дисципліни АСП та САПР	
1.3	Перелік дисциплін, засвоєння яких студентам необхідне для вивчення даної дисципліни та зв'язок з наступними дисциплінами	4
2	Зміст дисципліни	5
2.1	Склад, обсяг і терміни виконання змістових модулів	5
2.2	Лабораторні заняття, їх найменування та об'єм у годинах ...	9
2.3	Організація поточного контролю знання матеріалу з дисципліни АСП та САПР	10
2.4	Форми проведення та контролю самостійної роботи студентів	10
2.5	Контрольні запитання до іспиту з дисципліни АСП та САПР	10
3	Завдання для самостійної роботи	11
3.1	Завдання 1	11
3.2	Завдання 2	24
	Перелік джерел посилань	42

1 Мета й задачі дисципліни АСП та САПР антен, її місце у навчальному процесі

1.1 Мета викладання дисципліни АСП та САПР антен

Метою вивчення дисципліни «Анени спеціального призначення та системи автоматизованого проектування антен» є формування у студентів знань, навиків та умінь, які дозволять їм навчитись обирати адекватний розв'язуваній задачі математичний апарат та виробити навик вирішення певних технічних та наукових задач, які пов'язані з проектуванням сучасних антен спеціального призначення для їх застосування в радіоелектронних та телекомунікаційних системах.

1.2 Задачі вивчення дисципліни АСП та САПР антен

Основне завдання навчальної дисципліни - виробити навик вирішення певних технічних та наукових задач, які пов'язані з проектуванням сучасних антен спеціального призначення, а саме вибрати ефективну структуру антени з обробкою сигналів з урахуванням наявних задач і апаратного та програмного забезпечення; здійснювати параметричний синтез антен спеціального призначення, створювати програми в середовищах MATLAB та MathCAD для моделювання антен та їх окремих елементів; користуватися програмними середовищами електродинамічного моделювання Microwave Office та Ansoft HFSS, вміти проводити дослідження відомих і розробку нових методик аналізу, синтезу, оптимізації антен спеціального призначення в складі систем та комплексів обробки різноманітних даних; формувати нові конкурентоспроможні ідеї в області теорії і практики антен з обробкою сигналів.

1.3 Перелік дисциплін, засвоєння яких студентам необхідне для вивчення даної дисципліни та зв'язок з наступними дисциплінами

Для вивчення цієї дисципліни необхідні знання по наступних фундаментальних та прикладних дисциплінах:

а) фізика - поля, хвилі, електрика й магнетизм;

б) математика - лінійна алгебра й векторний аналіз, диференційні та інтегральні рівняння, теорія функції комплексної змінної, ряди Тейлора, Фур'є, Лорана й розклад функцій за ортогональними базисами, перетворення Фур'є, Лапласа і Гілберта, чисельні методи, теорія ймовірностей й математична статистика;

в) основи теорії кіл;

г) електродинаміка та поширення радіохвиль;

д) пристрої НВЧ та антени.

Дисципліна АСП та САПР є фаховою та системною в підготовці інженерів у галузі радіотехніки.

2 Зміст дисципліни

2.1 Склад, обсяг і терміни виконання змістових модулів

1. Опис навчальної дисципліни

Загальна характеристика

Обов'язковий освітній компонент	
Рівень вищої освіти	Другий (магістерський) рівень
Ступінь вищої освіти	Магістр
Галузь знань	17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
Спеціальність	172 Електронні комунікації та радіотехніка
Обмеження щодо форм навчання	Без обмежень

Обсяг навчальної дисципліни

Найменування показників	Характеристика навчальної дисципліни	
	денна форма навчання	заочна форма навчання
Кількість кредитів	4	
Модулів	2	-
Змістових модулів	2	-

Семестр	1	1
Загальна кількість годин	120	
з них аудиторних:	56	6
<i>лекції</i>	28	4
<i>практичні</i>	-	-
<i>лабораторні</i>	28	2
<i>семінарські</i>	-	-
з них самостійної роботи:	64	114
Занять на тиждень на тиждень	2	6
Форма контролю	іспит	

Дисципліна складається з п'яти блоків змістових модулів – основних її розділів, які разом зі змістовими модулями наведені у таблиці 2.1.

синтезу та циліндричних АР з електричним скануванням												
Тема 5. Антени мобільного з'язку. Метаматері али. Фрактальні антени		3		6		8						9
Разом за змістовим модулем 1	60	14		14		32	60	2				57
МОДУЛЬ 2												
Змістовий модуль 2. Сучасні середовища електродинамічного моделювання антен та пристроїв НВЧ												
Тема 1. Метаматері али		3		2		6						9
Тема 2. Загальна характерист ика сучасних САПР НВЧ		3				6						12
Тема 3. Застосування середовища Microwave Office для проектуванн я НВЧ антен		3				6						12
Тема 4. Середовище електродина мічного 3D		3		8		8		2				12

<i>моделювання НВЧ антен та пристроїв Ansoft HFSS</i>											
<i>Тема 5. Проектуванн я монополя на основі серветки Серпінського в середовищі Ansoft HFSS.</i>		2		4		6				2	12
<i>Разом за змістовим модулем 2</i>	60	14		14		32	60	2		2	57
Усього годин	120	28		28		64	120	4		2	114

2.2 Лабораторні заняття, їх найменування та об'єм у годинах

Лабораторні заняття проводяться на 9 семестрі (загалом 28 годин). Їх зміст й об'єм у годинах:

- 2.2.1 Дослідження АФР стовпця ФАР та його ДС – 4 години.
- 2.2.2 Дослідження багатоканального подільника потужності – 4 години.
- 2.2.3 Дослідження змійкового опромінювача дзеркальної антени – 4 години.
- 2.2.4 Дослідження спрямованих властивостей серветки Серпінського – 4 години.
- 2.2.5 Дослідження спіральних антен– 4 години.
- 2.2.6 Дослідження логоперіодичних антен – 4 години.
- 2.2.7 Дослідження ФАР– 4 години.

2.3 Організація поточного контролю знання матеріалу з дисципліни АСП та САПР

Поточний контроль проводиться на лабораторних заняттях шляхом індивідуального опитування й проведення модульного контролю у групі. Модульний контроль проводиться за основними розділами теоретичного курсу.

На модульний контроль № 1 виносяться запитання № 1 – 25, на модульний контроль № 2 виносяться запитання № 26- 50.

2.4 Форми проведення та контролю самостійної роботи студентів

Самостійну роботу студент виконує за такими формами:

- Проробляє теоретичний матеріал по кожній з тем за літературою, рекомендованою в робочій програмі, перевіряючи свої знання по контрольних запитаннях.
- Виконує самостійну роботу по методичних вказівках.
- Готується до лабораторних робіт по методичних вказівках.
- Повторює теоретичний матеріал перед опитуваннями, модульним контролем знань, іспитом.

2.5 Контрольні запитання до екзамену з дисципліни АСП та САПР антен

- 1 Антени в сучасній радіоелектроніці. Класи антен.
- 2 Класифікація антен з обробкою сигналу як основного напрямку розвитку та їх коротка характеристика.
- 3 Багатоелементні багатопробленеві антени.
- 4 Перевипромінюючі антени.
- 5 Електронно-скануючі антени.
- 6 Активні антени.
- 7 Адаптивні антени.
- 8 Цифрові решітки.
- 9 Радіооптичні решітки.
- 10 Антени з нелінійною обробкою сигналу.
- 11 Антени з логічним синтезом.
- 12 Антени апертурного синтезу.
- 13 Динамічні антени (антени з часовою модуляцією параметрів).

- 14 Специфічні характеристики антен (динамічні, характеристики керування, ЕПР та ін.).
- 15 Проблеми проектування сучасних антен. Синтез антенних систем. Особливості проектування.
- 16 ФАР, їх класифікація, особливості проектування.
- 17 Основні терміни АП і САПР. Основні задачі.
- 18 Принципи побудови САПР антен. Етапи:
 - 1) декомпозиційне моделювання;
 - 2) баготорівневе моделювання;
 - 3) параметричний синтез;
 - 4) формалізований вхід та вихід (випуск КД).
- 19 Задачі оптимізації цільової функції та методи їх розв'язку (лінеаризації нелінійної цільової функції, варіаційний (множника Лагранжа), градієнтний, штрафних функцій).
- 20 Структурна схема процесу проектування (САПР):
 - блок формалізованого завдання (БФЗ);
 - блок фізичної моделі (БФМ);
 - блок математичної моделі (БММ);
 - блок прикладної математичної моделі (БПММ);
 - блок синтезу АС (БС);
- 21 Параметричний синтез антен.
- 22 ДНА. Визначення ДСА по АФР поля (струму) для неперервного криволінійного випромінювача довільної форми.
- 23 Узагальнена модель ФАР.
- 24 Матриця розсіювання випромінюючої системи АР.
- 25 Основні параметри багатоелементних АР.
- 26 Урахування взаємодії елементів решітки. Розрахунок основних характеристик АР з урахуванням взаємного впливу елементів.
- 27 Ефект “осліплення” в великих АР, його причини. Засоби узгодження елементів в площинних АР.
- 28 Методика проектування випромінюючої системи багатоелементної площинної ФАР.
- 29 Розподільча система ФАР, ХЩР, вимоги до неї, способи реалізації.
- 30 Хвилеводно-щільові, коаксіальні та інтегральні подільники потужності НВЧ як елементи систем розподілу потужності.
- 31 Феритові взаємні та невзаємні фазообертачі, їх керуючі пристрої, основні розрахункові співвідношення.

- 32 Напівпровідникові фазообертачі відбивного та прохідного типу. Особливості їх використання у схемах керування променем ФАР.
- 33 Склад автоматизованого вимірювального комплексу (АВК) для дослідження напрямлених властивостей антен у дальній зоні по вимірюванням АФР у ближній зоні в безехових камерах.
- 34 Апаратура відліку координат і координатні пристрої АВК.
- 35 Джерела похибок відновлення ДН антен по АФР та способи їх мінімізації.
- 36 Циліндричні и кільцьові ФАР з електричним скануванням.
- 37 Антени РЛС із синтезованою апертурою.
- 38 Порядок розрахунку ФАР.
- 39 Апертурний метод розрахунку поля випромінювання.
- 40 Склад та можливості програми Microwave Office
- 41 Інтерфейс програми Microwave Office
- 42 Зміст проекту в Microwave Office
- 43 Командне меню і панель інструментів програми Microwave Office
- 44 Склад та можливості середовища HFSS для проектування НВЧ пристроїв та антен
- 45 Параметричний аналіз і оптимізація антен в середовищі HFSS
- 46 Створення топології антен і пристроїв НВЧ в середовищі HFSS
- 47 Математичні методи використовувані в Microwave Office
- 48 Математичні методи використовувані в середовищі HFSS
- 49 Інтерфейс програми HFSS 19.0
- 50 Інтерфейс програми Microwave Office 2019

3 Самостійна робота

Розрахункова частина самостійної роботи складається з 2-х завдань, умови для виконання яких та методичні вказівки подано нижче. Тут N - номер варіанту, який відповідає останній цифрі залікової книжки.

3.1 Завдання 1

Спроекувати за наведеними даними фазовану антенну решітку, що працює в польових умовах у складі радіокомплексу у якості антени наземної трикоординатної РЛС. Вихідні дані: ефективна площа цілі - $S_{\text{ц}} = 10N \text{ м}^2$, робоча частота - $f = (10 + N) \cdot 10^9 \text{ Гц}$, смуга - $2 \cdot \Delta \cdot f \pm 5\%$, тип поляризації - обертання, рівень бічних пелюстків - $(-20 - N) \text{ дБ}$, ширина головного променя в основній площині співпадає з шириною головного променя у допоміжній площині, потужність випромінення передавача - $P_{\text{вд}} = 100N \text{ Вт}$, чутливість приймача - $P_{\text{пр}} = 10^{-14} \text{ Вт}$, дальність дії РЛС - $R_{\text{max}} = 200 \text{ км}$, сектор огляду - $\theta_{\text{max}} = (50 + N)^\circ$.

Розв'язок

За формулою (3.1) визначаємо довжину хвилі

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{18 \cdot 10^9} = 0,0167 \text{ м.}$$

При гексагональному розміщенні елементів ФАР, крок сітки обирається з умови відсутності вторинних максимумів у найнебезпечнішому перерізі $f_0 = \frac{\pi}{2}$ (3.2) [1]

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{1 + \sin \Theta_{\max}} \quad (3.2)$$

звідси

$$d < \frac{2 \cdot \lambda}{\sqrt{3} \cdot (1 + \sin \Theta_{\max})},$$

$$d < \frac{2 \cdot 0,0167}{\sqrt{3} \cdot (1 + \sin(50^\circ))} = \frac{0,0334}{3,0589} = 0,011 \text{ м} = 11 \text{ мм}.$$

Скориставшись основним рівнянням радіолокації (3.3) визначимо коефіцієнт підсилення антени [2]

$$G = \sqrt{\frac{R_{\max}^4 \cdot 64 \cdot \pi^3 \cdot P_{np}}{P_{nep} \cdot \lambda^2 \cdot S_{ef}}}, \quad (3.3)$$

$$G = \sqrt{\frac{(200 \cdot 10^3)^4 \cdot 64 \cdot 3,14^3 \cdot 10^{-14}}{400 \cdot 10^3 \cdot 0,0167^2 \cdot 100}} = 1690.$$

Звідси, за допомогою співвідношення (3.4) визначимо коефіцієнт спрямованої дії. Для цього задамося значенням КПД $\eta = 0,9$ [1]

$$D = \frac{G}{\eta}, \quad (3.4)$$

$$D = \frac{G}{\eta} \Big|_{\eta=0,9} = \frac{1690}{0,9} = 1878 \approx 2000.$$

За допомогою співвідношення (3.5) розрахуємо площину розкриття ФАР. Для цього задамося значенням коефіцієнта використання поверхні (КВП) $\gamma = 0,5$

$$D = \frac{4 \cdot \pi \cdot S \cdot \gamma}{\lambda^2}, \quad (3.5)$$

$$S = \frac{D \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi \cdot \gamma} = \frac{1878 \cdot 0,0167^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,5} = 0,083 \text{ м}^2.$$

Маючи площину і виходячи з того, що розміщення випромінювачів гексагональне і тому лінійні розміри у площинах X та Y однакові, за формулою (3.6) визначимо лінійні розміри полотна [1]

$$L_{x,y} = \sqrt{S}, \quad (3.6)$$

$$L_{x,y} = \sqrt{0,083} = 0,288 \text{ м}.$$

Положемо, що одинарний випромінювач має квадрат в перерізі. Тоді для визначення геометричних розмірів одного випромінювача скористуємося співвідношенням (3.7) [1]

$$a = 0,65 \cdot \lambda, \quad (3.7)$$

$$a = 0,65 \cdot 0,0167 = 0,0109 \text{ м}.$$

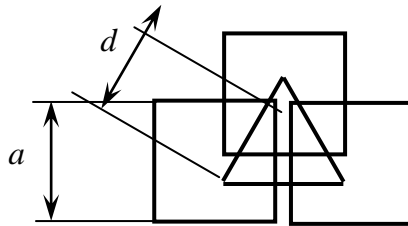


Рисунок 3.1 – Гексагональна антенна решітка при $a = 10,9 \text{ мм}$

З рисунку 3.1 добре видно, що використання звичайних хвилевідних випромінювачів є неможливим. Тому для зменшення розмірів випромінювача можна заповнити їх внутрішнє середовище діелектриком. Нприклад фторопластом, або поліетиленом. Тоді Геометричні розміри такого випромінювача визначаємо за формулою (3.8)

$$a' = \frac{0,65 \cdot \lambda}{\sqrt{\varepsilon_{\text{IA}}}}, \quad (3.8)$$

де $\varepsilon_{\text{PE}} = 2,54$ - відносна діелектрична проникність поліетилену.

$$a' = \frac{0,65 \cdot 0,0167}{\sqrt{2,54}} = 0,007 \text{ м} = 7 \text{ мм.}$$

Виходячи з цього розрахунку можемо побудувати гексагональну антенну решітку (рисунок 3.2)

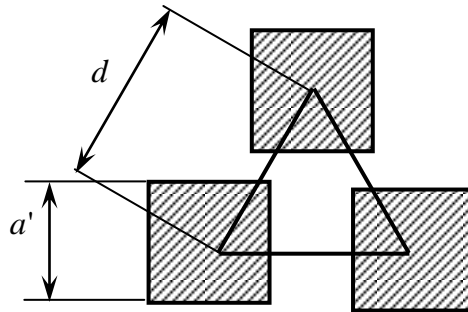


Рисунок 3.2 – Гексагональна антенна решітка при $a' = 7 \text{ мм}$

З рисунку 3.2 добре видно, що отримані в результаті розрахунку геометричні розміри випромінювачів можна без перешкод розмістити на площі розкриття ФАР.

Із співвідношення (3.9) розрахуємо загальну кількість випромінювачів

$$N_{x,y} = \frac{L_{x,y}}{d} + 1, \quad (3.9)$$

$$N_{x,y} = \frac{0,28}{0,011} + 1 = 26.$$

Діаграма спрямованості випромінювача описується виразом (3.10):

$$f_1^{E,H} = \frac{\cos \left(\frac{\pi \cdot a}{\lambda \sqrt{\varepsilon_{PE}}} \cdot \sin \theta \right)}{1 - \left(\frac{2 \cdot a}{\lambda \sqrt{\varepsilon_{PE}}} \cdot \sin \theta \right)^2}. \quad (3.10)$$

Виходячи з виразу (3.10) побудуємо діаграму спрямованості випромінювача (рисунок 3.3)

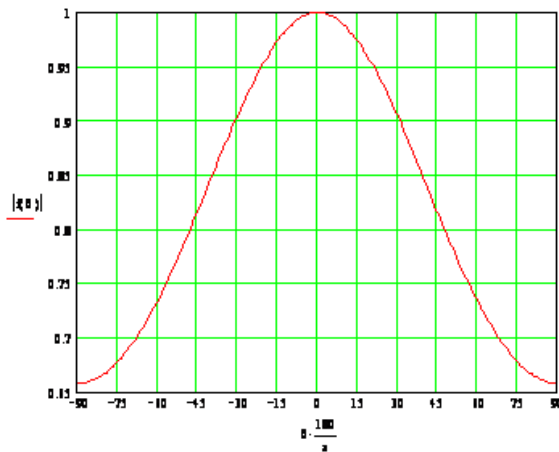


Рисунок 3.3 – Діаграма спрямованості випромінювача

Визначимо значення множника антенної решётки. Для цього розрахуємо діаграму спрямованості анетни двома методами – методом дискретного перетворення Фур'є та методом еквівалентної апертури.

Метод дискретного перетворення Фур'є

Розрахуємо діаграму спрямованості при нормованому положенні головного пелюстка ($\varphi_n = 0^\circ$).

Значення n розглядатимемо на інтервалі (3.11)

$$n = -\frac{N_{x,y} - 1}{2}, -\frac{N_{x,y} - 1}{2} + 1, \dots, \frac{N_{x,y} - 1}{2}. \quad (3.11)$$

Для обрання розподілу амплітуди поля, проведемо порівняння між косинусним розподілом амплітуди поля (3.12) та косинус-квадратним розподілами амплітуди поля (3.13) [3]

$$E(n) = \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot d}{L_{x,y}}\right), \quad (3.12)$$

$$E1(n) = \left(\cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot d}{L_{x,y}}\right)\right)^2. \quad (3.13)$$

На рисунку 3.4 побудуємо графічно вищезазначені розподіли амплітуди поля.

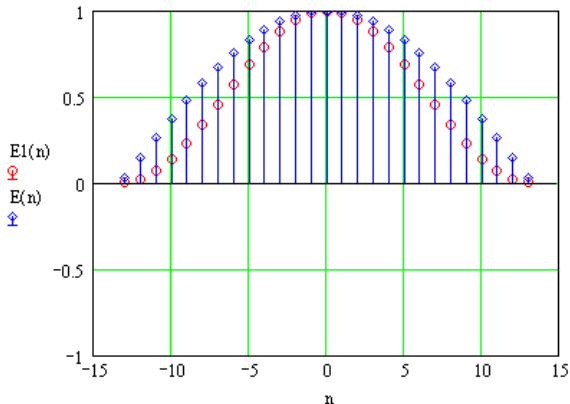


Рисунок 3.4 – Графічне зображення розподілу амплітуди поля

Через те, що розглядається випадок нормованого положення головного пелюстка ($\varphi_n = 0^\circ$), на рисунку 3.5 побудуємо графічну залежність фази φ від значення n .

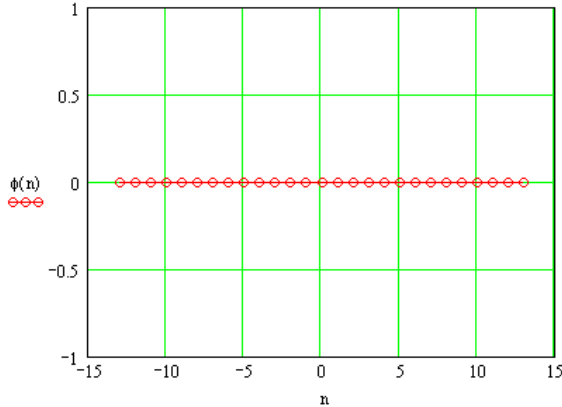


Рисунок 3.5 - Графічна залежність фази φ від значення n

Для двох розподілів амплітуди поля (3.12) та (3.13), що порівнюються запишемо вирази та побудуємо діаграми спрямованості всієї антенної решітки, (3.14) та (3.15), відповідно.

$$F(\theta) = \sum_{n=-\left(\frac{N_{x,y}-1}{2}\right)}^{\left(\frac{N_{x,y}-1}{2}\right)} E(n) \cdot e^{j\varphi(n)} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot d \cdot \sin(\theta)}, \quad (3.14)$$

$$F1(\theta) = \sum_{n=-\left(\frac{N_{x,y}-1}{2}\right)}^{\left(\frac{N_{x,y}-1}{2}\right)} E1(n) \cdot e^{j\varphi(n)} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot d \cdot \sin(\theta)}. \quad (3.15)$$

Для отримання достовірних та більш зручних результатів відразу віднормуємо отримані діаграми спрямованості (3.16) та (3.17)

$$F(\theta) = \frac{F(\theta)}{F(0)}, \quad (3.16)$$

$$F1(\theta) = \frac{F1(\theta)}{F1(0)}. \quad (3.17)$$

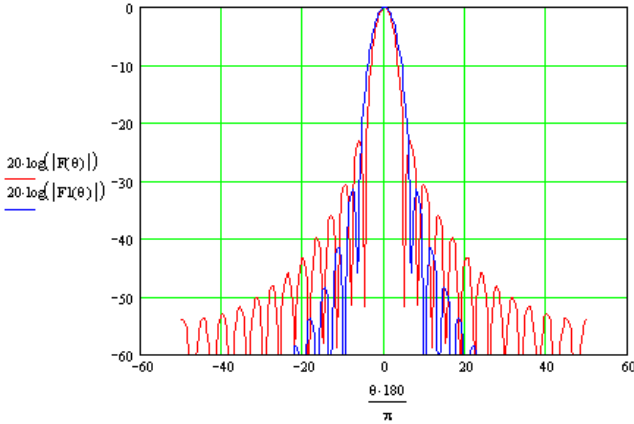


Рисунок 3.6 – Діаграми спрямованості антенної решітки

З рисунку 3.6 добре видно, що у випадку косинусного розподілу амплітуди поля діаграма спрямованості антенної решітки має дещо вузький основний пелюсток, ніж при косинус-квадратному розподілі амплітуди поля, та рівень бічних пелюстків дещо вищий, ніж при косинус-квадратному розподілі амплітуди поля.

Беручи до уваги те, що розподіл амплітуди поля вздовж випромінювачів обирається з умови забезпечення необхідного рівня бічних пелюстків діаграми спрямованості, обираємо косинусний розподіл амплітуди поля, тому, що рівень бічних пелюстків діаграми спрямованості при цьому становить -23дБ , що майже задовольняє вихідним даним. Тоді як при косинус-квадратному розподілі амплітуди поля, рівень бічних пелюстків складає $-31,5\text{дБ}$.

Розрахуємо діаграму спрямованості при боковому положенні головного пелюстка $\varphi_n \neq 0^\circ$.

Для визначення кута на який повернуто головний пелюсток скористуємося рисунком 1.7, на якому наведена схема розрахунку кута повороту головного пелюстка діаграми спрямованості.

Виходячи з рисунку 3.7, кут на який повернуто головний пелюсток визначається за формулою (3.18)

$$\frac{\varphi(n)}{d} = \operatorname{tg}(\theta_{\max}). \quad (3.18)$$

Звідси, за формулою (3.19), визначимо фазу $\varphi(n)$

$$\varphi(n) = n \cdot d \cdot \operatorname{tg}(\theta_{\max}). \quad (3.19)$$

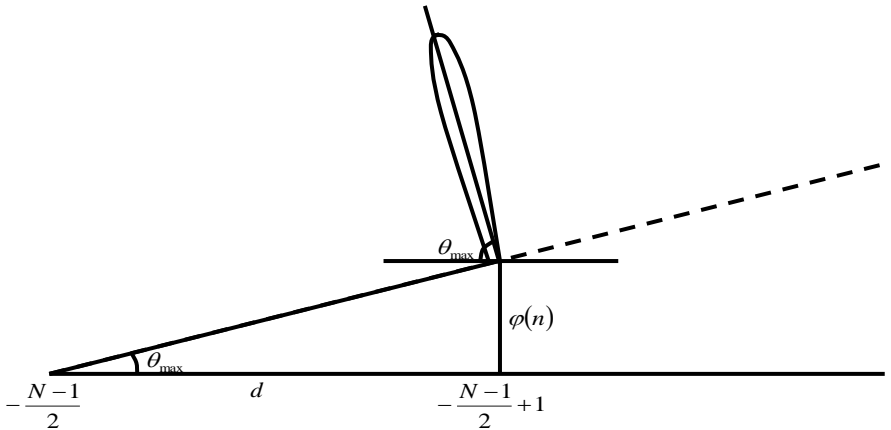


Рисунок 3.7 - Схема розрахунку кута повороту головного пелюстка діаграми спрямованості

На рисунку 3.8 побудуємо графічну залежність фази φ від значення n .

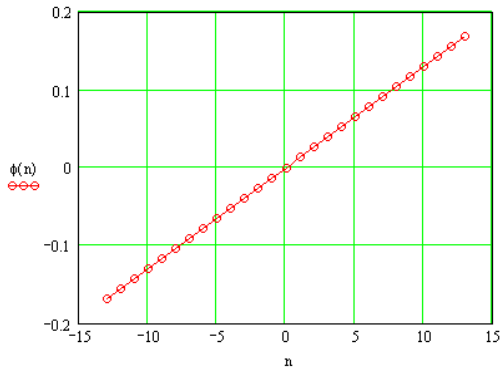


Рисунок 3.8 - Графічна залежність фази φ від значення n

Використавши формули (3.14), (3.15) та віднормувавши їх за формулами (3.16) та (3.17) відповідно, будемо діаграми спрямованості антенної решітки, при бічному положенні головного пелюстка (рисунок 3.9).

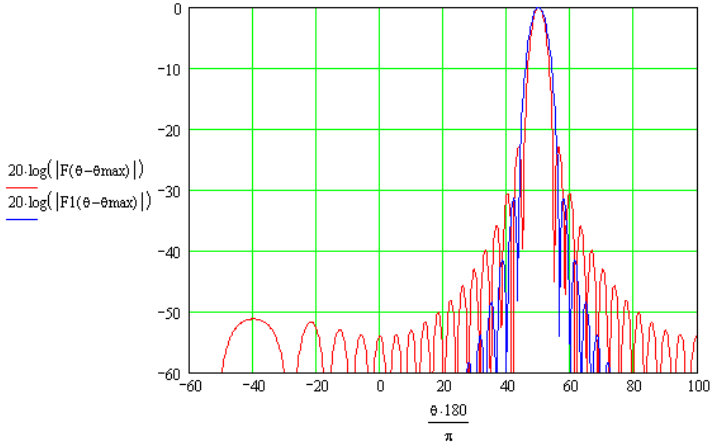


Рисунок 3.9 – Діаграми спрямованості антенної решітки, при бічному положенні головного пелюстка

Порівнюючи рисунки 3.6 та 3.9 можна сказати, що при бічному положенні головного променя діаграми спрямованості антени спостерігається невелике спотворення (порушення симетрії) діаграми відносно центру головного пелюстка, як на рисунку 3.6, а зсув головного пелюстка діаграми спрямованості на кут θ_{\max} добре помітний.

Метод еквівалентної неперервної апертури

При розрахунку діаграми спрямованості всієї антени методом еквівалентної апертури, як і у попередньому методі, проведемо розрахунок для двох значень фази.

Розрахуємо діаграму спрямованості при нормованому положенні головного пелюстка ($\varphi_n = 0^\circ$).

Для цього скористаємося формулою (3.20) [1]

$$F(\theta) = (1+t) \cdot \frac{\sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{L_{x,y}}{2} \cdot \sin(\theta) - \varphi\right)}{\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{L_{x,y}}{2} \cdot \sin(\theta) - \varphi} - (1-t) \cdot \frac{\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{L_{x,y}}{2} \cdot \sin(\theta) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{L_{x,y}}{2} \cdot \sin(\theta) - \varphi\right)}{\left(\frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \frac{L_{x,y}}{2} \cdot \sin(\theta) - \varphi\right)^2 - \pi^2} \quad (3.20)$$

Залежність записана у вигляді формули (3.20) має вигляд (рисунок 3.10)

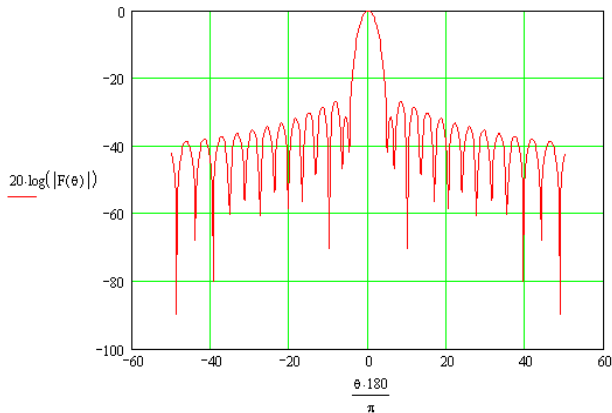


Рисунок 3.10 – Розрахунок ДС методом еквівалентної неперервної апертури

Розрахуємо діаграму спрямованості методом еквівалентної неперервної апертури при боковому положенні головного пелюстка $\varphi_n \neq 0^\circ$.

Розрахунок проведемо за тою ж самою формулою (3.20). Таким чином отримавши зображення діаграми спрямованості (рисунок 3.11)

З рисунку 3.11 добре видно, що при боковому положенні головного пелюстка, діаграма спрямованості зсувається в один бік, та бічні пелюстки втрачають симетрію та дещо спотворюються.

Порівнюючи метод дискретного перетворення Фур'є з методом еквівалентної безперервної апертури, добре помітна різниця між діаграмами спрямованості, а саме різниця відчутна у рівні других бічних пелюстків, які у першому випадку менші за перші бічні пелюстки, а у другому випадку навпаки більші, а також при розгляданні діаграми спрямованості при боковому положенні

головного пелюстка у другому випадку спотворення ДС більш помітне, ніж у першому.

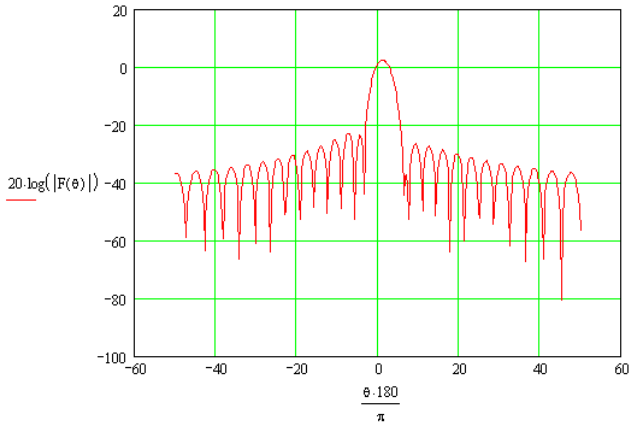


Рисунок 3.11 - Розрахунок ДС методом еквівалентної неперервної апертури при боковому положенні головного пелюстка ДС антени

3.2 Завдання 2

Спроектувати РЛС із синтезованою апертурою за наведеними даними. Вихідні дані: максимальний розмір антени - $l = 0,8 м$, швидкість польоту носія антени – горизонтальна складова - $V = 160 м/с$, висота польоту - $h = 1 \cdot 10^5 м$, мінімальна дальність картографування поверхні $R_{\min} = 1 \cdot 10^5 м$, максимальна дальність картографування поверхні - $R_{\max} = N \cdot 10^5 \hat{i}$, роздільна здатність при картографуванні - $\Delta l = N \hat{i}$, робоча частота - $f_0 = N \cdot 10^{10} Гц$, питомі ефективні поверхневі розсіювання підстилюючих поверхонь – вода $-15 дБ$, суха трава та степ $-25 дБ$, відношення сигнал-шум - $12 дБ$, рівень бічних пелюстків - $-17 дБ$, точність вимірювання кутової координати - $30 кут.хв.$

Розв'язок

Діапазон робочих частот визначаємо за формулами (3.21) та (3.22) [1]

$$f_{\min} = 0,95 \cdot f_0, \quad (3.21)$$

$$f_{\max} = 1,05 \cdot f_0, \quad (3.22)$$

$$f_{\min} = 0,95 \cdot 10^{10} = 9,5 \cdot 10^9 \text{ Гц},$$

$$f_{\max} = 1,05 \cdot 10^{10} = 10,5 \cdot 10^9 \text{ Гц}.$$

Довжину робочої хвилі та довжини хвиль визначаємо за формулами (3.23), (3.24) та (3.25) [2]

$$\lambda = \frac{c}{f_0}, \quad (3.23)$$

де $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ - швидкість світла.

$$\lambda_1 = \frac{c}{f_{\min}}, \quad (3.24)$$

$$\lambda_2 = \frac{c}{f_{\max}}, \quad (3.25)$$

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{1 \cdot 10^{10}} = 0,03 \text{ м},$$

$$\lambda_1 = \frac{3 \cdot 10^8}{9,5 \cdot 10^9} = 0,032 \text{ м},$$

$$\lambda_2 = \frac{3 \cdot 10^8}{10,5 \cdot 10^9} = 0,029 \text{ м.}$$

Нехай довжина шляху хвилі у дощі $R_{\text{дощ}} = 5 \cdot 10^3 \text{ м.}$

Затухання хвилі в дощі від $-0,01 \text{ дБ/м}$ до $0,04 \text{ дБ/м}$ [3].

Приймаємо значення затухання хвилі - $0,03 \text{ дБ/м}$ [1].

Коефіцієнт відбиття для дощу $\Gamma = (1 \dots 6) \cdot 10^{-6}$ [3].

Ефективна площа розсіювання дощу визначається за формулою (3.26)

$$\sigma = V_{\text{дощ}} \cdot |\Gamma|, \quad (3.26)$$

де $V_{\text{дощ}} = 15 \cdot 10^4 \text{ м}^3$ - об'єм, що займає дощ.

$$\sigma = 15 \cdot 10^4 \cdot |3 \cdot 10^{-6}| = 0,45 \text{ м}^2.$$

Верхня допустима межа ширини діаграми спрямованості антени із синтезованою апертурою визначається за формулою (3.27) [1]

$$\theta_{\text{max}} = \arccos\left(\frac{h}{R_{\text{max}}}\right), \quad (3.27)$$

$$\theta_{\text{max}} = \arccos\left(\frac{1 \cdot 10^5}{5 \cdot 10^5}\right) = 1,369.$$

Побудуємо огинаючу рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості від кута спостереження θ (рисунок 3.12). Для цього скористуємося співвідношенням (2.8)

$$\xi_{\theta} = \frac{c \cdot \lambda}{4 \cdot V_{\text{дощ}} \cdot R_{\text{max}} \cdot \sin(\theta)}. \quad (3.28)$$

Заданося інтервалом спостереження - $\theta = 0, \frac{\pi}{60} \dots \frac{\pi}{2}$.

Визначимо геометричну площину фізичної антени. Для цього заданося довільним типом випромінювача, наприклад, прямокутний хвилевід, у якого стінки мають однакові розміри.

Визначимо геометричні розміри випромінювача, скориставшись виразом (3.29)

$$\begin{aligned} a &= 0,65 \cdot \lambda, \\ a &= 0,65 \cdot 0,03 = 0,02 \text{ м.} \end{aligned} \quad (3.29)$$

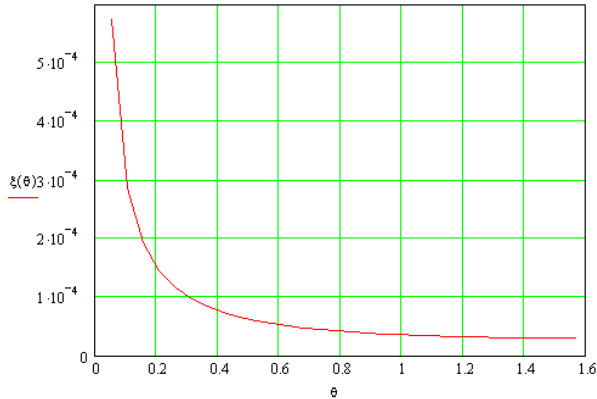


Рисунок 3.12 - Огибающая рівня бічних пелюсток діаграми спрямованості від кута спостереження θ

Для визначення геометричної площі фізичної антени, скористаємося формулою (2.10), яку пояснює рисунок 2.2

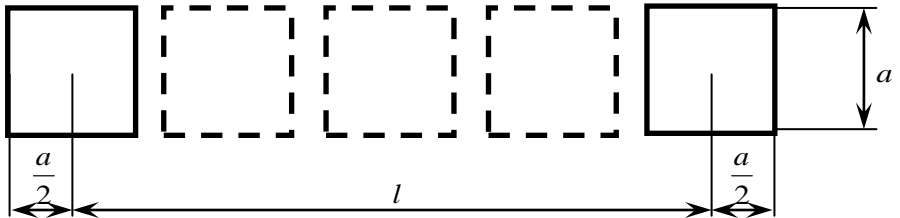


Рисунок 3.13 – Схема для розрахунку геометричної площі фізичної антени

$$S = (l - a) \cdot a, \quad (3.30)$$

$$S = (0,8 - 0,02) \cdot 0,02 = 0,015 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт підсилення антени на передачу визначається за формулою (3.31). Для цього задамося значенням коефіцієнта використання поверхні (КВП) $\gamma = 0,5$ [1]

$$D = \frac{4 \cdot \pi \cdot S \cdot \gamma}{\lambda^2}, \quad (3.31)$$

$$D = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,015 \cdot 0,5}{0,03^2} = 106,3 \approx 107.$$

Для апертурних антен коефіцієнт спрямованої дії майже дорівнює коефіцієнту підсилення

$$D \approx G.$$

Побудуємо залежність коефіцієнта підсилення від частоти

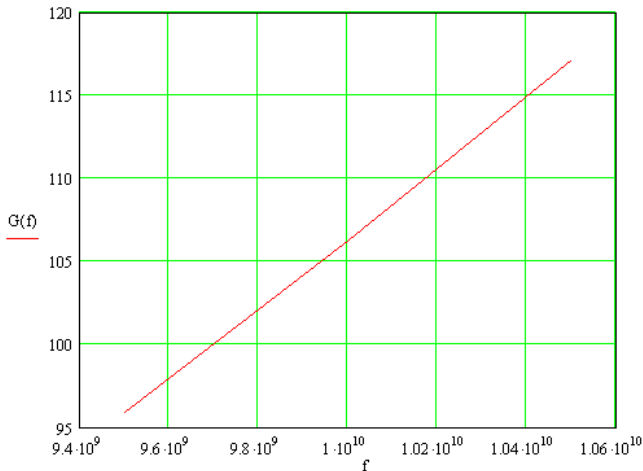


Рисунок 3.14 – Графік залежності коефіцієнта підсилення від частоти

Довжина шляху літаючого апарату розраховується з геометричного трикутника зображеного на рисунку 3.15, за формулою (3.32)

$$L_C = \sqrt{R_{\max}^2 - h^2}, \quad (3.32)$$

$$L_C = \sqrt{(5 \cdot 10^5)^2 - (1 \cdot 10^5)^2} = 489,9 \cdot 10^3 \text{ м} = 489,9 \text{ км}.$$

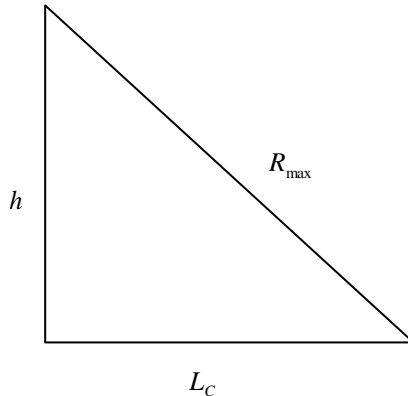


Рисунок 3.15 – Схема розрахунку довжини шляху літального апарату

Оберемо та розрахуємо розподіл поля вздовж антени з умови забезпечення необхідного рівня бічних пелюсток.

Визначимо декілька необхідних параметрів. Із співвідношення (3.33) визначаємо відстань між випромінювачами [1]

$$d < \frac{2 \cdot \lambda}{\sqrt{3} \cdot (1 + \sin \theta_{\max})}, \quad (3.33)$$

$$d < \frac{2 \cdot 0,03}{\sqrt{3} \cdot (1 + \sin(1,369))} = 0,03 \text{ м}.$$

Оскільки розмір випромінювача $a = 0,02\text{ м}$ вдвічі більший за відстань між ними, неважко розрахувати кількість самих випромінювачів при відомій ширині антени.

$$N = 27.$$

За формулою (3.34) визначаємо геометричні розміри антени

$$L_{x,y} = (N - 1) \cdot d, \quad (3.34)$$

$$L_{x,y} = (27 - 1) \cdot 0,03 = 0,78\text{ м}.$$

Значення n розглядатимемо на інтервалі (2.15)

$$n = -\frac{N-1}{2}, -\frac{N-1}{2} + 1 \dots \frac{N-1}{2}. \quad (3.35)$$

Оберемо косинус-квадратний розподіл амплітуди поля (3.36)

[3]

$$E(n) = \cos\left(\frac{\pi \cdot n \cdot d}{L_{x,y}}\right), \quad (3.36)$$

На рисунку 3.16 побудуємо графічно вищезазначені розподіли амплітуди поля.

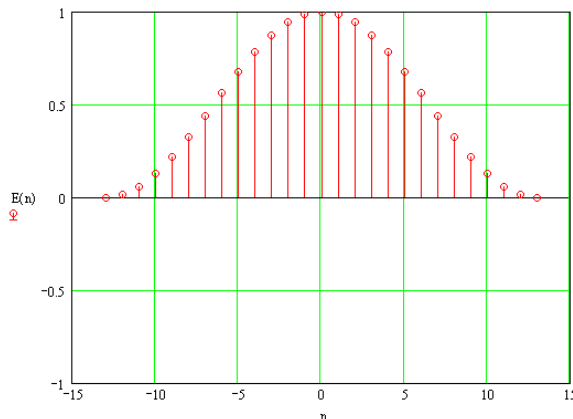


Рисунок 3.16 - Графічне зображення розподілу амплітуди поля

Для розподілу амплітуди поля (3.36), запишемо вираз та побудуємо діаграму спрямованості всієї антени (3.37) [2]

$$F(\theta) = \sum_{n=-\left(\frac{N-1}{2}\right)}^{\left(\frac{N-1}{2}\right)} E(n) \cdot e^{j\varphi(n)} \cdot e^{j\frac{2\pi}{\lambda} n d \cdot \sin(\theta)}. \quad (3.37)$$

Для отримання достовірних та більш зручних результатів відразу віднормуємо отриману діаграму спрямованості (3.38).

$$F(\theta) = \frac{F(\theta)}{F(0)}. \quad (3.38)$$

Діаграму зображено на рисунку 3.17.

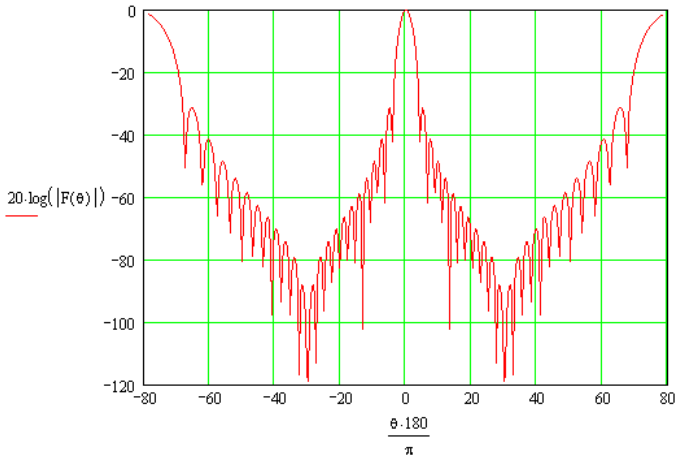


Рисунок 3.17 – Діаграма спрямованості передавальної антенної решітки

Розрахуємо частоту повторення аналізу прийнятого сигналу. Для цього скористаємося виразом (3.39)

$$f_{\text{ПР max}} = \frac{c}{2 \cdot R_{\text{max}}}, \quad (3.39)$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - швидкість світла.

$$f_{\text{ПР max}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 5 \cdot 10^5} = 300 \text{ Гц.}$$

Кутове положення вторинного головного максимуму діаграми спрямованості синтезованої апертури визначається виразом (3.40) [1]

$$\theta_{\text{БГОЛ}} = \frac{\lambda \cdot f_{\text{ПР max}}}{2 \cdot \theta_{\text{max}} \cdot \sin \theta_{\text{max}}}, \quad (3.40)$$

$$\theta_{\text{БГОЛ}} = \frac{0,03 \cdot 300}{2 \cdot 1,369 \cdot \sin(1,369)} = 3,354 \text{ рад.}$$

Час огляду (синтезування) діаграми спрямованості визначимо за співвідношенням (3.41)

$$T_c = \frac{L_c}{V}, \quad (3.41)$$

$$T_c = \frac{489,9 \cdot 10^3}{160} = 3062 \text{ с.}$$

Побудуємо графік еквівалентної зміни курсового сигналу від часу (рисунок 3.18). Для цього скористаємося виразом (3.42)

$$W(t) = 0,11 + (1 - 0,11) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot t}{T_c}\right). \quad (3.42)$$

Заданося інтервалом часу

$$t = 0, \frac{T_C}{100} \dots T_C.$$

Для побудови діаграми спрямованості на прийом за потужністю скористаємося виразом (3.43) [2]

$$F_{CA}(\theta) = \int_{-\frac{T_C}{2}}^{\frac{T_C}{2}} W^2(t) \cdot e^{j \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \left[\frac{V \cdot t}{R_{\max}} \cdot \sin \theta - \frac{V^2 \cdot t^2}{2 \cdot R_{\max}^2} \cdot \sin^2 \theta \right]} dt. \quad (3.43)$$

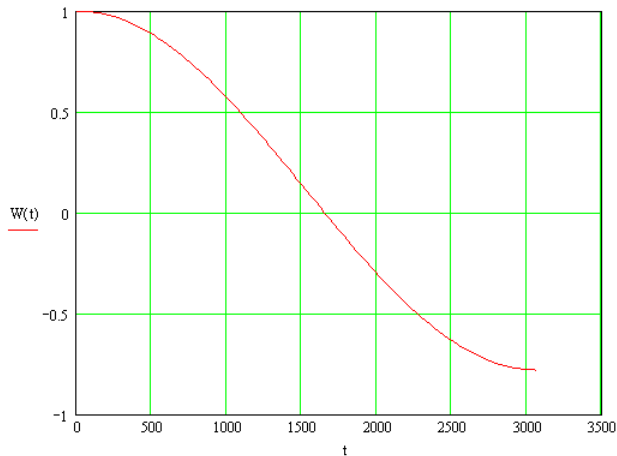


Рисунок 3.18 - Графік еквівалентної зміни курсового сигналу від часу

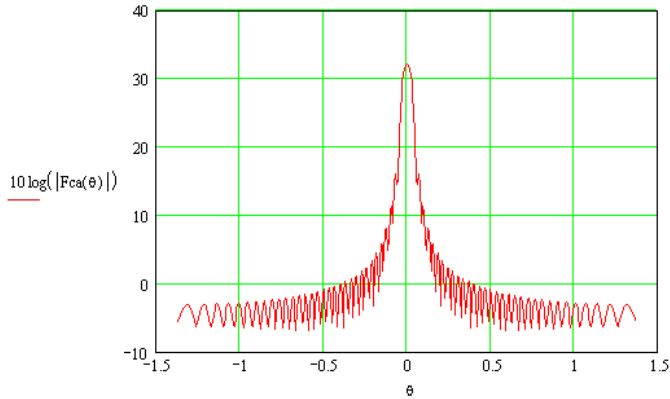


Рисунок 3.19 – Діаграма спрямованості на прийом за потужністю

Коефіцієнт підсилення антени в режимі передачі з урахуванням вагової обробки на прийом визначимо за формулою (3.44)

$$G_{\text{ПРД}} = G + 0,68, \quad (3.44)$$

$$G_{\text{ПРД}} = 106,3 + 0,68 = 106,98 \approx 107.$$

Розрахуємо втрати в системі синтезування. Для цього задамося шумовою температурою параметричного підсилювача $T_{\text{шпв}} = 360\text{K}$, а також фізичною температурою навколишнього середовища $T_{\text{ос}} = 295\text{K}$. Тоді враховуючи втрати:

$L_1 = 1,5\text{дБ}$ - втрати в антені в результаті сканування;

$L_2 = 1\text{дБ}$ - втрати в лініях передачі;

$L_3 = 0,8\text{дБ}$ - втрати в розряднику;

$L_4 = 0,4\text{дБ}$ - втрати в циркуля торі;

$L_5 = 0,5\text{дБ}$ - втрати в атенюаторі;

$L_6 = 1,5\text{дБ}$ - втрати в АЦП;

$L_7 = 0,3\text{дБ}$ - похибка підстроювання фази;

$L_8 = 0,7\text{дБ}$ - втрати в фільтрах;

$L_9 = 1,9\text{дБ}$ - втрати на швидке перетворення Фур'є;

$L_{10} = 1,8\text{дБ}$ - втрати виявляча цілі.

Сумарні втрати визначаються за формулою (3.45)

$$L_B = \sum_{i=1}^{10} L_i, \quad (3.45)$$

$$L_B = 1,5 + 1 + 0,8 + 0,4 + 0,5 + 1,5 + 0,3 + 0,7 + 1,9 + 1,8 = 10,4\text{дБ}.$$

Розрахуємо роздільну здатність за координатами для найгіршого та найліпшого випадків.

Для найгіршого випадку роздільна здатність визначається виразом (3.46) та (3.47)

$$\Delta l_{\max}(\theta) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{\max}}{k_0 \cdot L_C \cdot \sin \theta}, \quad (3.46)$$

$$\text{де } k_0 = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} = \frac{2 \cdot 3,14}{0,03} = 209,3.$$

$$\Delta l_{\max}(\theta) = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 5 \cdot 10^5}{209,3 \cdot 489,9 \cdot 10^3 \cdot \sin \theta} \approx 0,032\text{м}.$$

Цей випадок графічно зображений на рисунку 3.20 та 3.21.

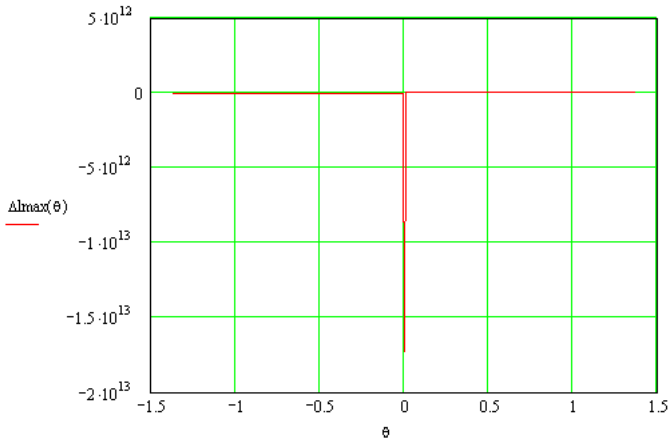


Рисунок 3.20 – Роздільна здатність антени за координатами (найгірший випадок)

$$\Delta R_{\max}(\theta) = \frac{16 \cdot \pi \cdot R_{\max}^2}{k_0 \cdot L_C^2 \cdot \sin^2 \theta}, \quad (3.47)$$

$$\Delta R_{\max}(\theta) = \frac{16 \cdot 3,14 \cdot (5 \cdot 10^5)^2}{209,3 \cdot (489,9 \cdot 10^3)^2 \cdot \sin^2 \theta} \approx 0,267 \text{ м.}$$

Для найкращого випадку роздільна здатність визначається виразом (3.48) та (3.49).

$$\Delta l_{\min}(\theta) = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{\min}}{k_0 \cdot L_C \cdot \sin \theta}, \quad (3.48)$$

$$\Delta l_{\min}(\theta) = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 10^5}{209,3 \cdot 489,9 \cdot 10^3 \cdot \sin \theta} \approx 6,37 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Цей випадок графічно зображений на рисунку 3.22 та 3.23.

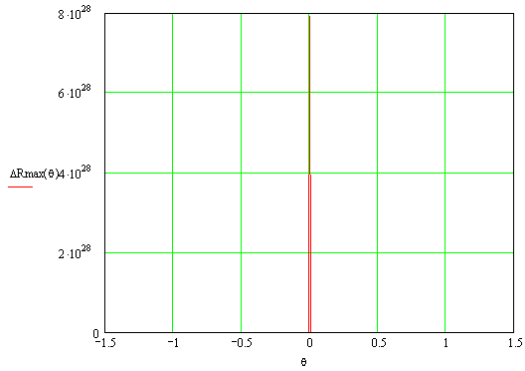


Рисунок 3.21 - Роздільна здатність антени за координатами (найгірший випадок)

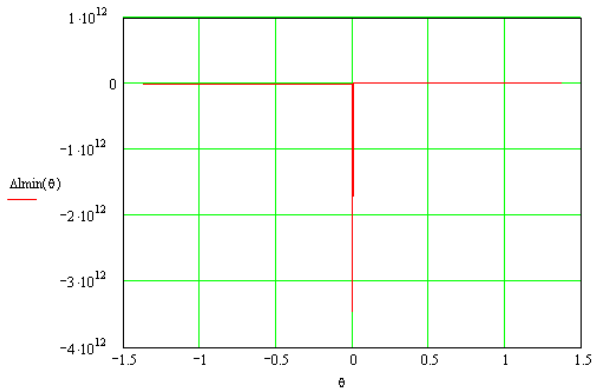


Рисунок 3.22 – Роздільна здатність антени за лінійними координатами (найгірший випадок)

$$\Delta R_{\min}(\theta) = \frac{16 \cdot \pi \cdot R_{\min}^2}{k_0 \cdot L_c^2 \cdot \sin^2 \theta}, \quad (3.49)$$

$$\Delta R_{\min}(\theta) = \frac{16 \cdot 3,14 \cdot (1 \cdot 10^5)^2}{209,3 \cdot (489,9 \cdot 10^3)^2 \cdot \sin^2 \theta} \approx 0,011 \text{ м.}$$

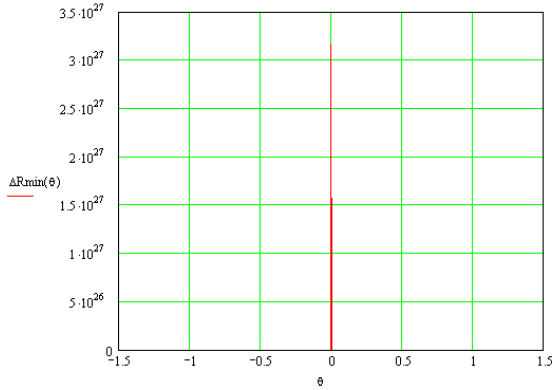


Рисунок 3.23 - Роздільна здатність антени за дальністю (найгірший випадок)

Визначимо вимоги до системи обробки [1]. Спочатку необхідно задатися числом зображень однієї й тієї ж ділянки місцевості.

$$N_M = 7.$$

Число променів на інтервалі синтезування визначається відповідно до рисунку 3.24, за допомогою формул (3.50) та (3.51)

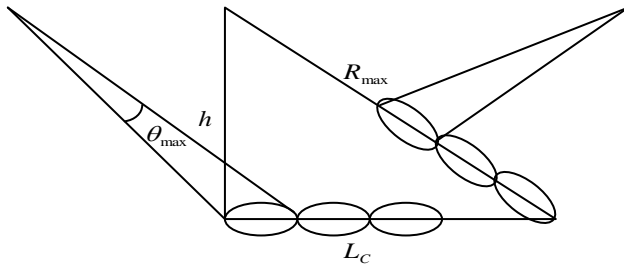


Рисунок 3.24 – Схема, що пояснює розрахунок кількості променів

$$N_L = N_M \cdot \frac{L_c}{\Delta l_{\max} \cdot (\theta_{\max})}, \quad (3.50)$$

$$N_R = N_M \cdot \frac{L_c}{\Delta R_{\max} \cdot (\theta_{\max})}, \quad (3.51)$$

$$N_L = 7 \cdot \frac{489,9 \cdot 10^3}{0,032 \cdot (1,369)} = 4,825 \cdot 10^7,$$

$$N_R = 7 \cdot \frac{489,9 \cdot 10^3}{0,267 \cdot (1,369)} = 9,379 \cdot 10^6.$$

За формулою (3.52) визначимо частоту вибірки АЦП

$$F_{ВАЦП} \geq \frac{c}{\Delta R_{\min} \cdot (\theta_{\max})}, \quad (3.52)$$

$$F_{ВАЦП} \geq \frac{3 \cdot 10^8}{0,011 \cdot (1,369)} = 1,992 \cdot 10^{10} \text{ Гц} = 19,92 \text{ ГГц}.$$

Для розрахунку кількості розрядів АЦП задамося кроком квантування

$$h_{KB} = 3\text{дБ}.$$

Тоді кількість розрядів АЦП розрахуємо по формулі (3.53)

$$n = \frac{\log(\sqrt{12}) \cdot 10^{\frac{h_{KB}}{10}}}{\log(2)}, \quad (3.53)$$

$$n = \frac{\log(\sqrt{12}) \cdot 10^{\frac{3}{10}}}{\log(2)} \approx 4 = 2^2.$$

Частоту вибірок траєкторного сигналу на виході попереднього фільтру можна визначити за допомогою співвідношення (3.54)

$$F_{\text{ВСПФ}} = \frac{N_L}{T_C}, \quad (3.54)$$

$$F_{\text{ВСПФ}} = \frac{4,825 \cdot 10^7}{3062} = 25,56 \cdot 10^3 \text{ Гц} = 25,56 \text{ кГц}.$$

Необхідний об'єм пам'яті визначасмо за формулою (3.55)

$$M = 2 \cdot N_L \cdot N_R \cdot K, \quad (3.55)$$

де $K = 12$ - коефіцієнт запасу для якості картографування.

$$M = 2 \cdot 4,825 \cdot 10^7 \cdot 9,379 \cdot 10^6 \cdot 12 = 1,761 \cdot 10^{16} \text{ біт}.$$

Швидкодія системи обробки інформації визначимо за формулою (3.56)

$$S_P = \frac{N_L \cdot N_R}{T_C}, \quad (3.56)$$

$$S_P = \frac{4,825 \cdot 10^7 \cdot 9,379 \cdot 10^6}{3062} = 239,7 \cdot 10^9 \text{ Гц} = 239,7 \text{ ТГц}.$$

Кількість накопичуваних сигналів визначимо за формулою (3.57)

$$N_C = f_{\text{ПР max}} \cdot T_C, \quad (3.57)$$

$$N_C = 300 \cdot 3062 = 918600.$$

Необхідну потужність передавача визначимо за формулою (3.58) [2]

$$P_{\text{ПРД}} = \frac{R_{\text{max}}^4 \cdot P_{\text{ПР}} \cdot 64 \cdot \pi^3}{G_{\text{ПРД}}^2 \cdot \lambda^2 \cdot S_{\text{ЕФ}}}, \quad (3.58)$$

де $P_{\text{ПР}} = 1 \cdot 10^{-15} \text{ Вт}$ - чутливість приймача; $S_{\text{ЕФ}} = \Delta l^2 = 25 \text{ м}^2$ - ефективна площа розсіювання антени.

$$P_{\text{прд}} = \frac{(5 \cdot 10^5)^4 \cdot 1 \cdot 10^{-15} \cdot 64 \cdot 3,14^3}{107^2 \cdot 0,03^2 \cdot 25} = 482,1 \cdot 10^6 \text{ Bm} = 482,1 \text{ MBm}.$$

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Бугрова Т.І. Антени спеціального призначення та САПР АСП. Навчальний посібник [Текст] / Т.І. Бугрова, Л.М. Логачова, Г.В. Мороз. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 200 с.
2. Ільницький Л.Я. Антени телекомунікаційних та моніторингових систем: навч. посібник [Текст] / Л.Я.Ільницький, Л.В. Сібрук, П.В.Слободянюк, В.Г.Благодарний. – К., НАУ, 2012. – 240 с.
3. Zhi Ning Chen. Handbook of Antenna Technologies /Z.N.Chen, D.Liu, H.Nakano, X.Qing, T.Zwick.-Singapore: Springer Science+Business Media, 2016. – 3467pp.
4. Zavrel, R.J. Antenna Physics: An Introduction [First Edition]. – The American Radio Relay League, Inc. –2016. –390 pp. – ISBN:978-1-62595-049-9.
5. <https://www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss>