

Лабораторна робота №7

Вимірювання діаграми направленості антени

Мета роботи:

1. Ознайомлення з видами та будовою НВЧ антен.
2. Практичне вимірювання діаграми напрямленості НВЧ антени.

1 Короткі теоретичні відомості

1.1.1 Характеристики та параметри антен зазвичай поділяють на первинні та вторинні. Їхня залежність від частоти визначає частотний діапазон антени.

До *первинних параметрів антени* відносять опір випромінювання, опір втрат, ККД антени, вхідний опір антени, характеристику направленості антени, граничну потужність.

До *вторинних параметрів антени* відносять ширину діаграми направленості, коефіцієнт спрямованої дії (КСД), коефіцієнт підсилення (КП), рівень бічних пелюсток та поляризаційні параметри.

Характеристикою направленості антени називають залежність комплексної амплітуди напруженості поля випромінювання \vec{E}_m від кутових координат точки спостереження θ, φ за умови вимірювання цього поля на однаковій відстані r від антени. Комплексна амплітуда має модуль та аргумент, крім цього, хвилю характеризують поляризацією. Тому характеристики направленості розподіляють на амплітудні, фазові та поляризаційні. На практиці найчастіше використовують амплітудні, і в таких випадках слово амплітудний опускається.

Функцію, що описує характеристику направленості, називають *функцією направленості*, а її графічне зображення – *діаграмою направленості (ДН)*.

Крім поділу на амплітудні, фазові та поляризаційні, ДН ще класифікують за такими ознаками:

1. *За полем і потужністю.* ДН за полем виражає залежність амплітудного E_m чи діючого E значення напруженості поля від напрямку (кутів θ, φ), а ДН за потужністю – від щільності потоку потужності P . Оскільки щільність потоку потужності пропорційна квадрату напруженості поля ($P = E^2/120\pi = 120\pi H^2$), то, якщо ДН за полем описують функцією $f(\theta, \varphi)$, ДН за потужністю описуватиметься функцією $f^2(\theta, \varphi)$.

2. *Просторові (об'ємні) та площинні ДН.* Просторова ДН – функція двох кутів θ, φ і є поверхнею $f(\theta, \varphi)$, яка охоплює певний об'єм (рисунок 7.1). Площинна ДН є функцією лише одного кута ($f(\theta)$ чи $f(\varphi)$) і є плоскою фігурою.

Зазвичай для побудови ДН вибирають площини, що проходять через напрямки максимального випромінювання – *головні площини*. Одна з них співпадає з

вектором E і називається E -площиною, а інша – з вектором H і називається H -площиною (рисунок 7.1).

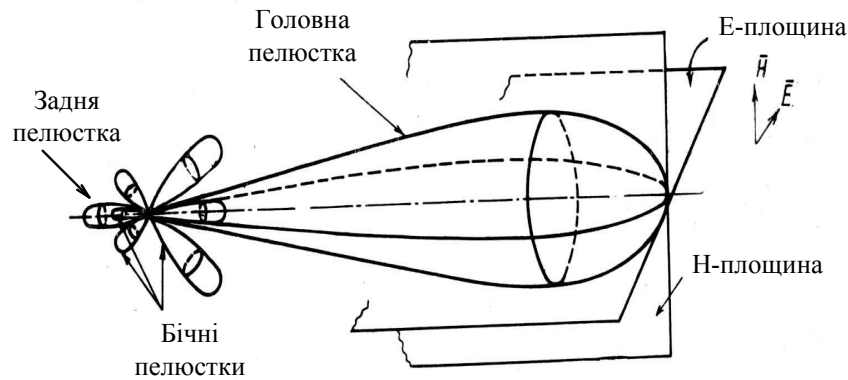


Рисунок 7.1 – Приклад просторової ДН антени

3. За вибраною для побудови ДН системою координат – полярною чи прямокутною. У полярній системі координат на радіусі, розташованому під кутом θ чи φ до вихідного напрямку, відкладають відрізок, довжина якого пропорційна абсолютному значенню $f(\theta)$ чи $f(\varphi)$, а потім кінці відрізків, відкладених для різних кутів θ чи φ , з'єднують. У прямокутній системі координат кут θ чи φ відкладають по вісі абсцис, а $f(\theta)$ чи $f(\varphi)$ – по вісі ординат і отримані точки також з'єднують.

4. За вибраним масштабом відліку ДН. ДН багатьох антен, особливо гостроспрямованих, мають багатопелюсткову структуру (рисунок 7.1): крім головної пелюстки вони містять бічні та задню пелюстки. У таких випадках краще зображати ДН у прямокутних координатах (рисунок 7.2), на якому можна вибрати будь-який масштаб по осях і у такий спосіб зобразити слабкі бічні та задні пелюстки чіткіше, ніж на полярній ДН.

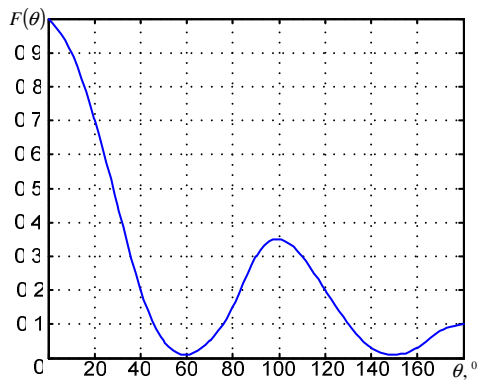
Розрізняють *ненормовані та нормовані ДН*. Нормування означає, що величини E_m та Π у напрямку θ, φ віднесено до їх максимальних значень $E_{m \max}$ та Π_{\max} . Функції нормованих ДН за полем та потужністю позначають так:

$$F(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) / f_{\max}(\theta, \varphi) = E_m / E_{m \max}, \quad (7.1)$$

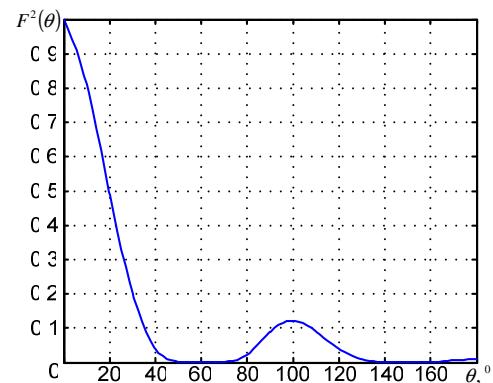
$$F^2(\theta, \varphi) = f^2(\theta, \varphi) / f_{\max}^2(\theta, \varphi) = \Pi / \Pi_{\max}.$$

Нормовані ДН зручно зображати у напівлогарифмічному масштабі, при якому функцію напрямленості виражають у децибелах:

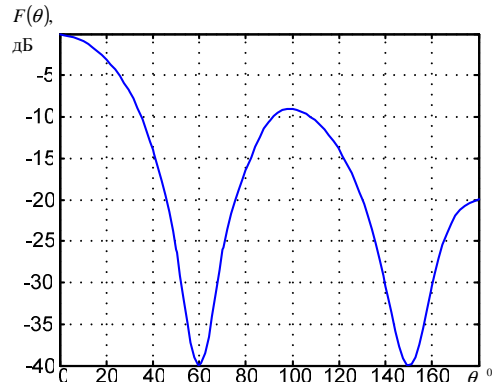
$$N[\text{дБ}] = 10 \lg F^2(\theta, \varphi) = 20 \lg F(\theta, \varphi). \quad (7.2)$$



а)



б)



в)

Рисунок 7.2 – Варіанти масштабів відліку ДН антен: а – лінійний; б – лінійний за потужністю; в – напівлогарифмічний

Числа, наведені у таблиці 7.1, ілюструють перерахунок у децибелі $N[\text{дБ}]$ нормованої функції направленості за потужністю $F^2(\theta, \varphi)$ і за полем $F(\theta, \varphi)$.

Таблиця 7.1

$F^2(\theta, \varphi)$	1	1,26	1,58	2	4	10	100	1000	10000	1000000
$F(\theta, \varphi)$	1	1,12	1,26	1,41	2	3,16	10	31,6	100	1000
$N, \text{дБ}$	0	1	2	3	6	10	20	30	40	60

Ширина ДН антени – це кутовий сектор, що охоплює ту частину променя (головної пелюстки ДН), на границях якого щільність потоку потужності менший за максимальний у певну кількість разів, зазвичай у 2 (–3 дБ) чи 10 (–10 дБ) раз. Тобто 0,5 і 0,1 від максимального рівнів відповідно. Ширину ДН на рівні «половинної потужності», тобто на рівні $1/\sqrt{2} = 0,707$ за напруженістю поля, позначають через $2\theta_{0,5}$ (рисунок 7.3), на рівні 0,1 – через $2\theta_{0,1}$.

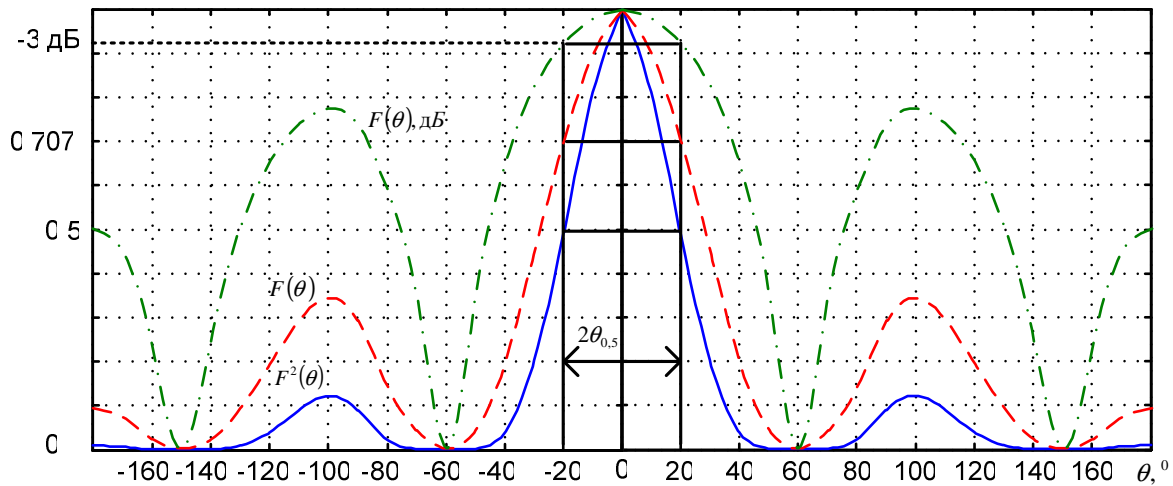


Рисунок 7.3 – Визначення ширини ДН антени на рівні «половинної потужності»

У цілому, комплексна векторна нормована ДН антени $\vec{F}(\theta, \varphi)$ характеризує кутовий розподіл поля, а також поляризаційні та фазові властивості. Задаючи цю характеристику антени, потрібно обов'язково оговорювати положення початку координат, відносно якого здійснюється відлік фаз.

У самому загальному випадку функція $\vec{F}(\theta, \varphi)$ складається з трьох множників:

$$\vec{F}(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) \vec{p}(\theta, \varphi) e^{i\psi(\theta, \varphi)}, \quad (7.3)$$

кожен з яких описує амплітудну, поляризаційну та фазову структуру поля дальньої зони антени

Амплітудну діаграму напрямленості $F(\theta, \varphi)$ розглянуто вище. Зауважимо лише, що її можна отримати як розрахунковим, так і експериментальним шляхом.

Векторний множник $\vec{p}(\theta, \varphi)$ у (7.3) є одиничним вектором поляризації з двома компонентами, що орієнтовані по базисним ортам сферичної системи координат:

$$\vec{p}(\theta, \varphi) = \vec{\theta}_0 \dot{p}_\theta(\theta, \varphi) + \vec{\theta}_\varphi \dot{p}_\varphi(\theta, \varphi) = (\vec{\theta}_0, \vec{\theta}_\varphi) \begin{pmatrix} \dot{p}_\theta \\ \dot{p}_\varphi \end{pmatrix}.$$

Модуль вектора \vec{p} дорівнює одиниці незалежно від напрямку, тобто $|\dot{p}_\theta|^2 + |\dot{p}_\varphi|^2 = 1$. Компоненти \dot{p}_θ і \dot{p}_φ показують співвідношення між вертикальною та горизонтальною складовими поля у дальній зоні антени у вибраному напрямі, а також фазовий зсув між ними.

У загальному випадку обидві компоненти вектора поляризації є комплексними числами. Одну з цих компонент зазвичай вважають дійсною (тобто фазу цієї компоненти включають в уявний показник експоненти у третьому множнику (7.3)) і позначають через α . Це так звана *головна складова поляризації*.

Друга компонента вектора поляризації, ортогональна до головної, називають *кросполяризаційною* (іноді паразитною) *складовою поляризації*. З урахуванням цього

$$\dot{p}(\theta, \varphi) = \bar{\theta}_{zl} \alpha(\theta, \varphi) + \bar{\theta}_{kl} \sqrt{1 - \alpha^2(\theta, \varphi)} e^{i\Delta\psi(\theta, \varphi)},$$

де $\bar{\theta}_{zl}$ – базисний одиничний вектор головної поляризації, $\alpha(\theta, \varphi)$ – дійсна додатна функція, $\bar{\theta}_{kl}$ – базисний вектор кросполяризаційної складової поляризації, $\Delta\psi(\theta, \varphi)$ – фазовий зсув між складовими. Значення $1 - \alpha^2$ дає частку щільності потоку потужності крос поляризаційної складової поляризації.

Уявний показник степеня $\psi(\theta, \varphi)$ у (7.3) називають *фазовою характеристикою направленості антени* по головній поляризації випромінювання. Функція $\psi(\theta, \varphi)$ характеризує зміну фазового зсуву компоненти головної поляризації при переміщенні точки спостереження по поверхні великої сфери радіусу R з центром у початку вибраної системи координат і, як наслідок, суттєво залежить від цього вибору.

Поряд з фазовою характеристикою $\psi(\theta, \varphi)$ у розгляд також вводять еквіфазні поверхні у дальній зоні, тобто поверхні, на яких фаза компоненти головної поляризації однакова для всіх кутів спостереження. Рівняння еквіфазної поверхні з урахуванням радіальної залежності фази дальнього поля можна записати так

$$R(\theta, \varphi) = R_0 + \frac{\lambda}{2\pi} \psi(\theta, \varphi).$$

Якщо еквіфазна поверхня є сферою (за винятком можливих стрибків на $\lambda/2$ при переході через нуль амплітудної ДН), то центр цієї сфери називають *фазовим центром антени*. Для віддаленого спостерігача фазовий центр є саме тією точкою антени, звідки виходять сферичні хвилі випромінюваного поля.

1.1.2 Вплив землі на характеристики антен. Процес відбиття радіохвилі від землі у своїй фізичній основі є взаємодією падаючої хвилі з електричними зарядами ґрунту. Під впливом електромагнітного поля цієї хвилі у ґрунті індукуються струми, які стають джерелами відбитої та заломленої хвиль. Відбиття радіохвилі ґрунтом є вторинним випромінюванням ним електромагнітної енергії.

Характер процесу відбиття формально визначають умови на границі розподілу атмосфери та ґрунту, тобто граничні умови. Особливості цього процесу залежать від електричних параметрів ґрунту, поляризації падаючої хвилі та загальних законів відбиття радіохвиль. Електричні параметри ґрунту залежать від довжини хвилі.

Вплив землі на поле випромінювача, піднятого над нею, зводиться до нерівномірного перерозподілу цього поля у просторі. У напрямках

інтерференційних максимумів воно підсилюється у $1 + R_{yz}$ раз (R_{yz} – узагальнений коефіцієнт відбиття), а у напрямках інтерференційних мінімумів послаблюється у $1 - R_{yz}$ раз.

На розподіл результуючого поля в освітленій області впливає не лише процес інтерференції прямої і відбитої хвиль, але і спрямованість дії джерела випромінювання. З урахуванням його характеристики направленості $F(\vartheta)$ залежність амплітуди результуючого поля записують так:

$$E = E_{np} \Phi(\theta) = E_{\max} F(\vartheta) \Phi(\theta), \quad (7.4)$$

де E_{\max} – амплітуда прямої хвилі у максимумі випромінювання джерела. У виразі (7.4) добуток

$$F(\vartheta) \Phi(\theta) = F(\theta)$$

є результуючою характеристикою направленості.

Вплив положення максимуму випромінювання θ_{\max} виглядає так. Зі збільшенням кута θ_{\max} збільшується амплітуда прямої хвилі та одночасно з цим зменшується амплітуда падаючої хвилі, що призводить до зменшення значення узагальненого коефіцієнта відбиття. Це, в свою чергу, спричиняє зменшення максимальних $1 + R_{yz}$ і збільшення мінімальних $1 - R_{yz}$ значень інтерференційного множника та обумовлює меншу зрізаність результуючої характеристики направленості.

Зі збільшенням кута θ_{\max} збільшується внесок у результуюче поле прямої хвилі і зменшується внесок відбитої хвилі. За деякого значення θ_{\max} внесок останньої настільки незначний, що його можна не враховувати. Результуюче поле при цьому створюється в основному за рахунок прямої хвилі. Результуючою характеристикою направленості $F(\theta)$ стає характеристика направленості джерела у вільному просторі $F(\vartheta)$. У таких випадках говорять, що характеристика направленості джерела «відірвана» від землі.

Якщо падаюча та пряма хвилі поляризовані *горизонтально*, то аргумент коефіцієнта відбиття φ_R для всіх ґрунтів приблизно можна вважати рівним 180° . Якщо ґрунт – провідник, то модуль коефіцієнта відбиття $R = R_z = 1$, $\varphi_R = \pi$ для всіх кутів ковзання θ . Інтерференційний множник («множник землі») при $\theta_{\max} = 0$ ($R_{yz} = R_z$) дорівнює

$$\begin{aligned} \Phi_z(\theta) &= \sqrt{2 + 2 \cos(kh \sin \theta + 180^\circ)} = \\ &= \sqrt{2} \sqrt{1 - \cos(2kh \sin \theta)}, \end{aligned} \quad (7.5)$$

$$\Phi_z(\theta) = 2 \sin(kh \sin \theta),$$

де h – висота підйому джерела над землею.

Коли ґрунт напівпровідник чи діелектрик, характерним є зменшення амплітуди результуючого поля зі збільшенням кута θ внаслідок зменшення коефіцієнта відбиття. Поблизу поверхні землі ($\theta = 0$) результуюче поле за горизонтальної поляризації для будь-якого ґрунту дорівнює нулю, оскільки в цьому напрямі пряма та відбита хвилі інтерферують у протифазі за рівних амплітуд.

Якщо падаюча та пряма хвилі поляризовані *вертикально*, і ґрунт – провідник, то для всіх кутів ковзання $R_g = 1$, $\varphi_R = 0$. Інтерференційний множник при $\theta_{\max} = 0$ дорівнює

$$\begin{aligned} \Phi_g(\theta) &= \sqrt{2 + 2 \cos(kh \sin \theta)} = \sqrt{2} \sqrt{1 + \cos(2kh \sin \theta)}, \\ \Phi_g(\theta) &= 2 \cos(kh \sin \theta). \end{aligned} \quad (7.6)$$

Відмінність цього множника від множника (7.2) за горизонтальної поляризації полягає у тому, що міняється положення інтерференційних максимумів і мінімумів. Це пояснюється тим, що при відбитті вертикально поляризованої хвилі її фаза не змінюється (за горизонтальної поляризації міняється на 180°), пряма та відбита хвилі інтерферують з різницею фаз, обумовленою лише різницею ходу.

При відбитті радіохвиль від землі джерелом відбитої хвилі можна вважати дзеркальне відображення O' (рисунок 7.4) дійсного джерела. Амплітуда та фаза хвилі дзеркального джерела відповідає амплітуді та фазі відбитої хвилі.

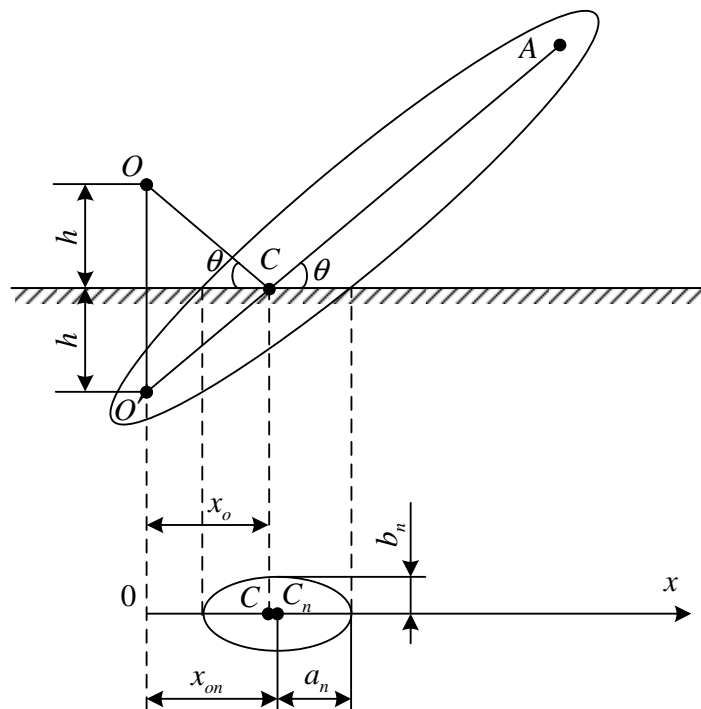


Рисунок 7.4 – До питання про відбиття радіохвиль від землі

Трасою поширення відбитої хвилі є лінія $O'A$. Тому область, суттєва для поширення відбитої хвилі, утворюється еліпсоїдом з полюсами у точках O' та A . Ділянку поверхні, суттєву для відбиття, визначають як переріз поверхнею землі цього еліпсоїда.

Форма цього перерізу – еліпс, що обмежує останню з включених у суттєву область зону Френеля. Точки C_1, C_2, \dots, C_n є центрами симетрії еліпсів відповідних зон, а розміри a_n і b_n – піввісьями еліпсів.

У такий спосіб поверхня землі розглядається в якості хвилевої поверхні з вторинними (гюйгенсівськими) джерелами випромінювання, результуюче поле яких у точці спостереження утворює поле відбитої хвилі.

Положення і розміри зон Френеля на поверхні землі залежать від співвідношення висоти джерела (антени) h і точки спостереження M . Коли $h \ll M$ (типова ситуація у радіолокації), положення та розміри суттєвої області визначають так:

– відстань від основи антени до центра n -ої зони Френеля

$$x_{0n} = x_0 \left(1 + \frac{n\lambda}{2h \sin \theta} \right),$$

– велика піввісь еліпса n -ої зони Френеля

$$a_n = \frac{1}{\sin \theta} \sqrt{\frac{n\lambda h}{\sin \theta} \left(1 + \frac{n\lambda}{2h \sin \theta} \right)},$$

– мала піввісь еліпса n -ої зони Френеля

$$b_n = a_n \sin \theta.$$

Відстань від основи антени до геометричної точки відбиття x_0 становить

$$x_0 = h \operatorname{ctg} \theta.$$

У радіолокації достатньо обмежитись лише першою зоною. У цьому випадку розмір і положення суттєвої для відбиття області визначають так

$$x_{01} = 12 \frac{h^2}{\lambda},$$

$$a_1 = 8\sqrt{2} \frac{h^2}{\lambda},$$

$$b_1 = 2\sqrt{2}h.$$

З цих виразів видно, що зі збільшенням висоти антени збільшуються розміри суттєвої області для відбиття та її віддалення від місця розташування антени.

У деяких випадках для розрахунку суттєвої області зручнішими є формули, отримані через відстань від антени до точки спостереження R_M :

$$a_n = \frac{R_M \sqrt{n\lambda R_M (n\lambda R_M + 4hH)}}{2 \sqrt{n\lambda R_M + (h+H)^2}}, \quad (7.7)$$

$$b_n = \frac{1 \sqrt{n\lambda R_M (n\lambda R_M + 4hH)}}{2 \sqrt{n\lambda R_M + (h+H)^2}}, \quad (7.8)$$

$$x_0 = R_M \frac{h}{h+H}, \quad (7.9)$$

де H – висота точки спостереження над поверхнею землі.

Зміщення центра n -ої зони відносно геометричної точки відбиття становить

$$c_n = R_M \frac{H-h}{2(h+H) \left[1 + \frac{(h+H)^2}{n\lambda R_\delta} \right]}, \quad (7.10)$$

де R_δ – дальність прямої видимості.

Формули (7.7) – (7.10) справедливі за будь-якого співвідношення висот h і H у наближенні, що земля плоска.

2 Лабораторна установка

До складу лабораторної установки входять: генератор НВЧ сигналів; мікровольметр; координатно-поворотна платформа (КПП); НВЧ-вузли та з'єднувальні кабелі; допоміжна та досліджувана антени.

3 Хід виконання роботи

3.1 Ознайомтесь з лабораторною установкою та підготуйте її до роботи.

3.2 Виміряйте діаметри допоміжної $D_{дон}$ та досліджуваної $D_{досл}$ антен.

Користуючись отриманими даними, визначте мінімальну відстань r_{min} (рисунки 7.4) між цими антенами.

Правило вибору цієї відстані таке. Якщо $D_{дон} \ll D_{досл}$ або $D_{досл} \ll D_{дон}$, то

$$r_{min} \geq 2 \frac{D^2}{\lambda}, \quad (7.11)$$

де λ – довжина хвилі у вакуумі. Причому у формулу (2.11) замість D підставляється розмір більшої антени.

Інакше, якщо обидві антени мають приблизно однакові розміри, то

$$r_{min} \geq 5 \frac{D_{дон} D_{досл}}{\lambda}. \quad (7.12)$$

Примітка: частоту, на якій проводитимуться вимірювання, задає викладач.

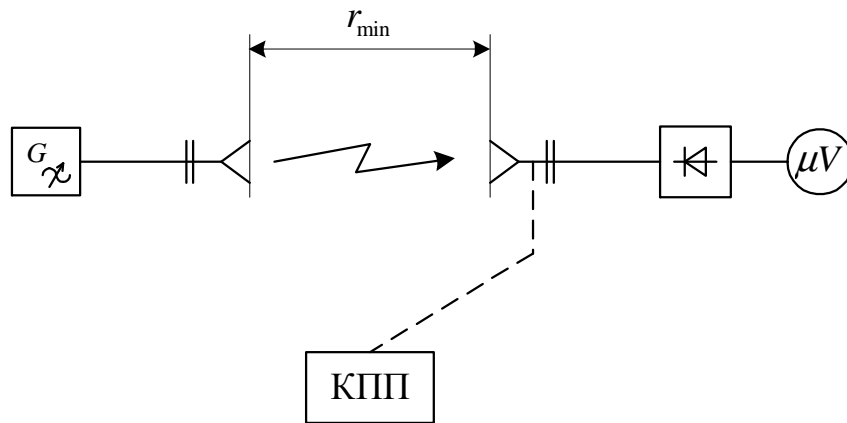


Рисунок 7.4 – Структурна схема лабораторної установки для вимірювання ДН антени

3.3 Встановіть на відстані r_{\min} від допоміжної (передавальної) антени досліджувану антену.

3.5 Обертаючи приймальну антену в азимутальній та кутомісній площинах, добийтесь того, щоб максимуми діаграм напрямленостей обох антен були спрямовані один на одного.

3.6 Методом обертової антени виміряйте ДН досліджуваної антени в Е- та Н-площинах.

Примітка: крок обертання досліджуваної антени має бути не меншим, ніж два градуси.

3.7 Повторіть юстування антен згідно п. 3.4.

3.8 Закріпіть на опорі імітатор земної поверхні з першим номером. Підберіть його положення в просторі таким чином, щоб його центр перебував в точці С (рисунок 7.5).

Змінюючи імітатори у порядку збільшення їхніх номерів, підберіть той імітатор, вплив якого на результуюче поле найбільший.

Зробіть висновок про зв'язок між висотою h , відстанню x_0 , розмірами імітатора та формою ДН передавальної антени.

3.9. Залишаючи положення в просторі вибраного імітатора без змін, виміряйте шляхом обертання приймальної антени розподіл результуючого поля для вертикально та горизонтально поляризованих хвиль.

Примітка: оптимальний крок переміщення приймальної антени у даному випадку становить $0,5^\circ$.

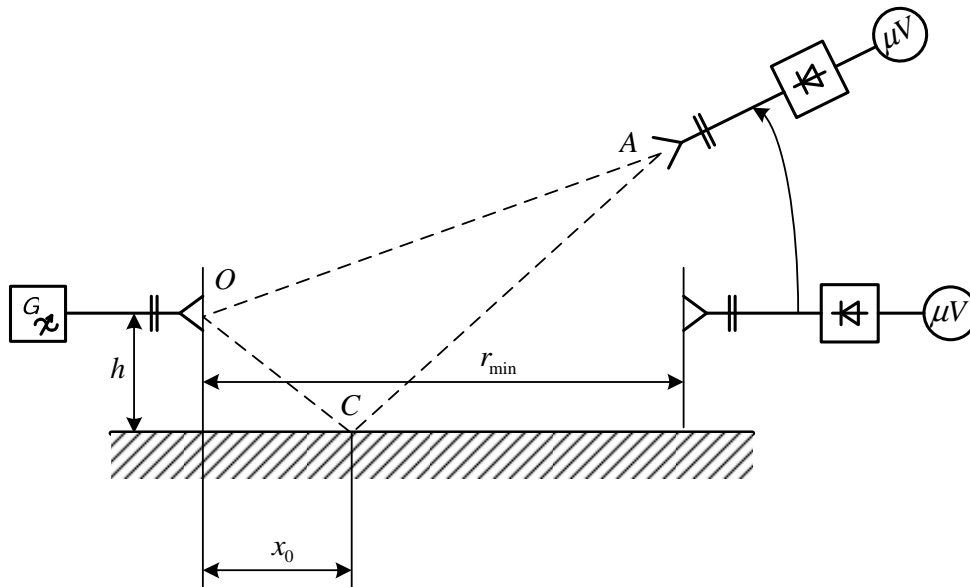


Рисунок 7.5 – Схема для вимірювання впливу відбиття радіохвиль від землі на ДН антени

4 Розрахункове завдання

4.1 Побудуйте ДН досліджуваної антени у полярній та прямокутній декартовій системах координат для обох випадків – вільного простору та з підстилаючою поверхнею. Для випадку підстилаючої поверхні ДН будувати для горизонтальної та вертикальної поляризацій.

4.2 Оцініть ширину ДН досліджуваної антени для обох випадків – вільного простору та з підстилаючою поверхнею.

4.3 Розрахуйте x_0 , x_{01} , a_1 та b_1 , використовуючи дані експерименту.

5 Вимоги до звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Коротке описання мети і методики проведення роботи.
2. Перелік використаних приладів.
3. Таблиці та графіки результатів вимірювань.
4. Розрахункове завдання.
5. Висновки.

6 Контрольні питання

1. Поясніть фізичний зміст терміну «діаграма направленості антени».
2. Які наслідки випливають з теореми взаємності для антени, яка працює як у передавальному, так і у приймальному режимах?
3. Який напрямок називається напрямком головного максимуму діаграми направленості?
4. Яке значення нормованої ДН антени в цьому напрямку?

5. Поясніть зв'язок між коефіцієнтом підсилення антени у довільному напрямку та її нормованою ДН.
6. Яким чином поверхня землі впливає на поле в освітленій області?
7. Що таке інтерференційний множник? Від яких величин він залежить?
8. Яким чином направленість джерела випромінювання впливає на розподіл результуючого поля над землею?
9. Як впливає поляризація падаючої хвилі на поле відбитої хвилі?
10. У якому випадку кажуть, що характеристика направленості джерела «відірвана» від землі?