

Затверджено
науково-методичною радою ЖДТУ
протокол від «19» листопада 2018 р. №6

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з навчальної дисципліни
«АНАЛІЗ І СИНТЕЗ ВИПРОМІНЮЮЧИХ СИСТЕМ»

для студентів освітнього рівня «магістр»
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
освітньо-професійна програма «Телекомунікації та радіотехніка»

Розглянуто і рекомендовано
на засіданні кафедри
біомедичної інженерії та
телекомунікацій
протокол від «29» серпня 2018 р. №1

Розробник: к.т.н., доцент Чухов В. В.

Житомир
2018 р.

Чухов В. В. Методичні вказівки до лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Аналіз і синтез випромінюючих систем» для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» – Житомир: ЖДТУ, 2018.– 19 с.

Зміст

Вступ.....	4
Лабораторна робота №1. Вимірювання діаграми напрявленості антени.....	5
Лабораторна робота №2. Вимірювання коефіцієнта підсилення антени.....	14
Література.....	19

Вступ

Метою даних методичних вказівок є допомога студентам у експериментальному дослідженні параметрів і характеристик антен.

Для виконання лабораторного практикуму у лабораторії організовано робочі місця, кожне з яких розраховане на 3 – 5 студентів. На робочих місцях знаходяться хвилеводи та хвилеводні елементи та необхідні прилади для проведення вимірювань. Безпосередні вимірювання на робочих місцях та їх обробку виконують відповідно до цих методичних вказівок.

До початку лабораторної роботи кожен студент повинен ознайомитись з методичними вказівками даної лабораторної роботи та отримати допуск до її виконання, продемонструвавши викладачу чітке розуміння ходу виконання лабораторної роботи та здавши необхідний мінімум теоретичних знань за темою цієї роботи.

Перед підключенням вимірювальної схеми до електричної мережі підгрупи студентів на робочих місцях повинні продемонструвати викладачу зібрану схему, яку той повинен перевірити. Якщо схему зібрано правильно, то викладач дає дозвіл на її підключення до електричної мережі та власне проведення вимірювань.

Звіт з виконаної лабораторної роботи оформлюється кожним студентом окремо на папері формату А4, з дотриманням вимог оформлення такої документації. Вимоги щодо структури звіту наведено у прикінцевому розділі кожної лабораторної роботи. Після оформлення звіту він захищається студентом у встановленому порядку, після чого такий звіт здається на кафедру.

Лабораторна робота №1

Вимірювання діаграми напрямленості антени

Мета роботи:

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

1 Короткі теоретичні відомості

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 напрямленості антени, граничну потужність.

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

Характеристикою напрямленості 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 напрямленості розподіляють на амплітудні, фазові та поляризаційні. На практиці найчастіше використовують амплітудні, і в таких випадках слово амплітудний опускається.

Функцію, що описує характеристику напрямленості, називають *функцією напрямленості*, а її графічне зображення – *діаграмою напрямленості (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'ємнісні) 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 1.1).

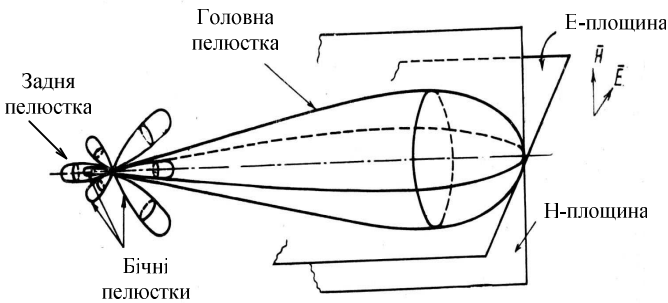


Рисунок 1.1 – Приклад просторової ДН антени

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 1.2), на якому можна вибрати будь-який

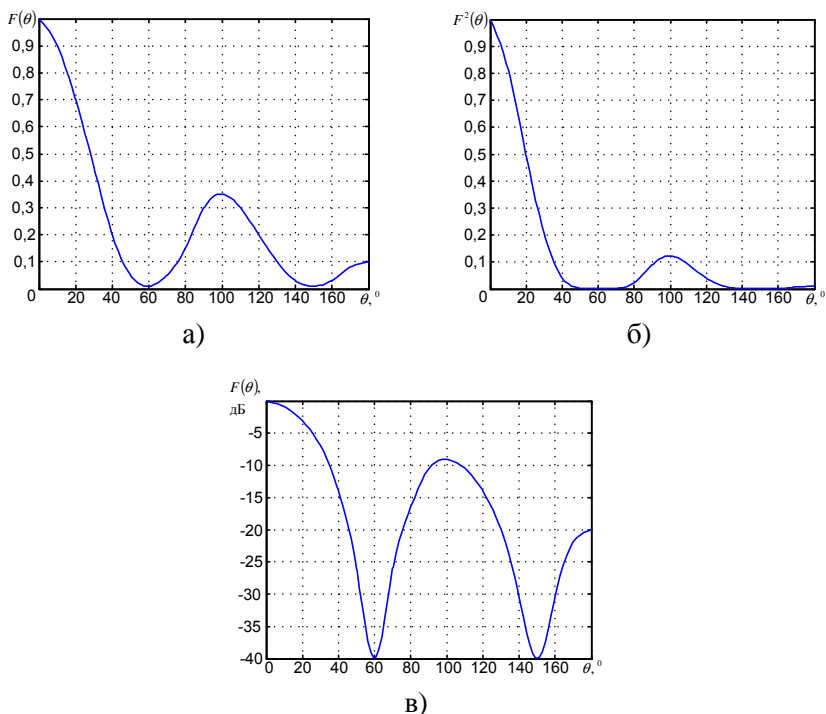


Рисунок 1.2 – Варіанти масштабів відліку ДН антен: а – лінійний; б – лінійний за потужністю; в – напівлогарифмічний

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:

$$F(\theta, \varphi) = f(\theta, \varphi) / f_{\max}(\theta, \varphi) = E_m / E_{m\max}, \quad (1.1)$$

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

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

$$N[\text{дБ}] = 10 \lg F^2(\theta, \varphi) = 20 \lg F(\theta, \varphi). \quad (1.2)$$

Числа, наведені у таблиці 1.1, ілюструють перерахунок у децибелі $N[\text{дБ}]$ нормованої функції напрямленості за потужністю $F^2(\theta, \varphi)$ і за полем $F(\theta, \varphi)$.

Таблиця 1.1

$F^2(\theta, \varphi)$	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 1.3), на рівні 0,1 – через $2\theta_{0,1}$.

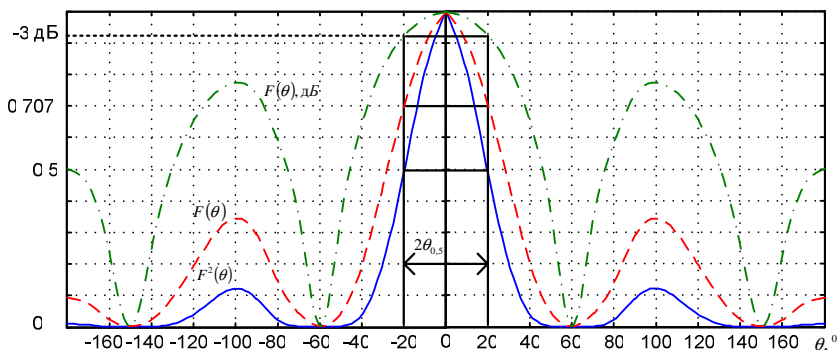


Рисунок 1.3 – Визначення ширини ДН антени на рівні „половинної потужності”

В цілому, комплексна векторна нормована ДН антени $\dot{\vec{F}}(\theta, \varphi)$ 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 $\dot{\vec{F}}(\theta, \varphi)$ складається з трьох множників:

$$\dot{\vec{F}}(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi) \dot{\vec{p}}(\theta, \varphi) e^{i\psi(\theta, \varphi)}, \quad (1.3)$$

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

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

Модуль вектора $\dot{\vec{p}}$ 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 (1.3)) 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

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

де $\vec{\theta}_{cl}$ – базисний одиничний вектор головної поляризації, $\alpha(\theta, \varphi)$ – дійсна додатна функція, $\vec{\theta}_{cp}$ – 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 напрямленості антени* по головній поляризації

випромінювання. Функція $\psi(\theta, \varphi)$ характеризує зміну фазового зсуву компоненти головної поляризації при переміщенні точки спостереження по поверхні великої сфери радіуса R з центром у початку вибраної системи координат i , 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.

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 $D_{осл}$ антен.

Користуючись отриманими даними, визначте мінімальну відстань r_{\min} (рисунок 1.4) між цими антенами.

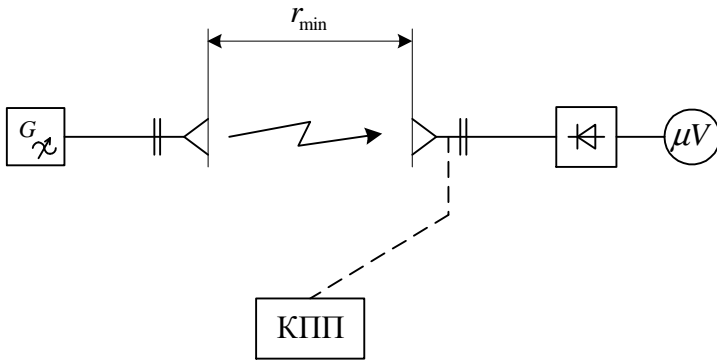


Рисунок 1.4 – Структурна схема лабораторної установки для вимірювання ДН антени

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

$$r_{\min} \geq 2 \frac{D^2}{\lambda}, \quad (1.4)$$

де λ – довжина хвилі у вакуумі. Причому у формулу (1.4) замість D підставляється розмір більшої антени.

Інакше, якщо обидві антени мають приблизно однакові розміри, то

$$r_{\min} \geq 5 \frac{D_{\text{дон}} D_{\text{досл}}}{\lambda}. \quad (1.5)$$

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

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

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

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

4 Розрахункове завдання

4.1 Побудуйте ДН досліджуваної антени у полярній та прямокутній декартовій системах координат.

4.2 Оцініть ширину ДН досліджуваної антени.

5 Вимоги до звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Коротке описання мети і методики проведення роботи.
2. Перелік використаних приладів.
3. Розрахунки по п.3.2, таблиці результатів вимірювань по п. 3.4.
4. Розрахункове завдання.
5. Висновки.

6 Контрольні питання

1. Поясніть фізичний зміст терміну „діаграма напрямленості 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 напрямленості?

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. Знаючи ДН антени, які параметри антени можна розрахувати?

7. Які методи вимірювання ДН антен вам відомі?

8. З якою метою відстань між антенами під час виконання лабораторної роботи вибиралась не меншою за r_{\min} ?

9. Якими міркуваннями слід користуватись, вибираючи крок обертання досліджуваної антени?

10. Проаналізуйте переваги та недоліки побудови ДН антени в полярній та прямокутній декартовій системах координат.

Лабораторна робота №2

Вимірювання коефіцієнта підсилення антени

Мета роботи:

1. Практичне ознайомлення з методами вимірювання коефіцієнта підсилення антени.
2. Вимірювання коефіцієнта підсилення НВЧ антен.

1 Короткі теоретичні відомості

Коефіцієнт спрямованої дії (КСД) – це відношення щільності потоку потужності Π , випромінюваного антеною у даному напрямку θ, φ , до щільності потоку потужності Π_{cp} , яка б випромінювалась у цьому ж напрямку ізотропним випромінювачем чи іншою еталонною антеною за умови рівності повних потужностей випромінювання порівнюваних антен:

$$D = \Pi / \Pi_{cp} . \quad (2.1)$$

Коефіцієнт підсилення антени – це добуток КСД на ККД антени:

$$G = D \eta_A . \quad (2.2)$$

Коефіцієнт підсилення повніше характеризує антену, ніж КСД, оскільки множник D враховує концентрацію випромінювання у просторі, а множник η_A – ще і послаблення випромінювання, спричинене втратами у антені. Очевидно, що $G < D$. Якщо кути θ, φ не оговорено, то мають на увазі напрямки максимального випромінювання, де $\Pi = \Pi_{\max}$, $D = D_0 = \Pi_{\max} / \Pi_{cp}$ та $G = G_0 = D_0 \eta_A$.

2 Лабораторна установка

До складу лабораторної установки входять: панорамний вимірювач КСХН і послаблення; вимірювальна антена; мікровольтметр; координатно-поворотна платформа; металевий екран; досліджувані антени; НВЧ-вузли та з'єднувальні кабелі.

3 Хід виконання роботи

3.1 Ознайомтесь з лабораторною установкою та підготуйте її до роботи.

3.2 Виміряйте діаметри досліджуваних антен та розрахуйте відстань до дальньої зони r_{\min} за (1.4) чи (1.5).

3.3 Виміряйте коефіцієнт підсилення однієї з досліджуваних антен (у подальшому вона вважатиметься за еталонну) дзеркальним методом:

3.3.1 Складіть схему для вимірювань (рисунок 2.1), попередньо налаштувавши панорамний вимірювач для вимірювання КСХН.

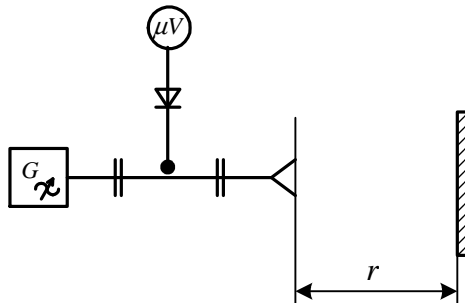


Рисунок 2.1 – Схема для вимірювання КП антени дзеркальним методом

3.3.2 На відстані $r \geq \frac{r_{\min}}{2}$ від антени встановіть металевий екран так, щоб він був перпендикулярний до напрямку головного максимуму ДН цієї антени.

Так як екран порушує узгодження антени, то реалізувати умову перпендикулярності можна обертаючи екран в азимутальній та кутомірній площинах, добиваючись максимального значення КСХН у фідері живлення.

3.3.3 Виміряйте КСХН K_{cm} у фідері живлення. Розрахуйте коефіцієнт підсилення антени:

$$G = \frac{4\pi r}{\lambda} \frac{K_{cm} - 1}{K_{cm}},$$

де λ – довжина хвилі у вакуумі.

3.3.4 З метою покращання точності та зменшення впливу багаторазових перевідбиттів на ділянці антена–екран, вимірювання по пп. 3.3.2, 3.3.3 потрібно провести для 3–4 відстаней r , після чого розрахувати G для кожного вимірювання та усереднити отримані результати (оптимальні відстані $r + n\lambda/4$, $n = 1, 2, \dots$).

3.4 Виміряйте коефіцієнти підсилення інших досліджуваних антен методом порівняння:

3.4.1 Складіть схему для вимірювань (рисунок 2.2). До генератора підключіть еталонну антену. У дальній зоні еталонної антени розмістіть допоміжну приймальну антену, до якої підключити детектор та індикатор (мікрровольтметр). Направити приймальну антену на еталонну.

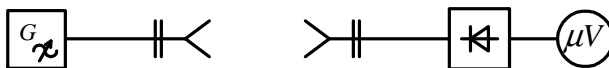


Рисунок 2.2 – Схема для вимірювання КП антени методом порівняння

3.4.2 Змінюючи орієнтацію у просторі еталонної антени, добитись максимальних показів індикатора $\alpha_{\max et}$.

3.4.3 Підключити до генератора досліджувану антену. Змінюючи її орієнтацію у просторі, знову добитись максимальних показів індикатора $\alpha_{\max досл}$.

3.4.4 Так як значення $\alpha_{\max et}$ та $\alpha_{\max досл}$ пропорційні потужності сигналу на виході приймальної антени, то їхнє відношення дорівнює відношенню коефіцієнтів підсилення досліджуваної $G_{досл}$ та еталонної G_{et} антен.

$$\text{Звідси } G_{досл} = \frac{\alpha_{\max досл}}{\alpha_{\max et}} G_{et}.$$

3.4.5 Повторити вимірювання для інших досліджуваних антен.

4 Розрахункове завдання

Зобразити графічно результати за п. 3.3.4 у вигляді залежності $G = f(r)$ та розрахувати середнє значення коефіцієнта підсилення за цими результатами.

5 Вимоги до звіту

Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

1. Коротке описання мети і методики проведення роботи.
2. Перелік використаних приладів.
3. Розрахунки вимірювань по п.3.2, 3.4.
4. Розрахункове завдання.
5. Висновки.

6 Контрольні питання

1. Поясніть зміст терміну „коефіцієнт підсилення антени”.

2. Який зв'язок між КП антени та її КСД у довільному напрямку?

3. Який зв'язок між КП антени та її нормованою ДН у довільному напрямку?

4. Які особливості вимірювання коефіцієнту підсилення переносної антени? стаціонарної антени?

5. Дзеркальний метод вимірювання КП антени.

6. Які джерела похибок цього методу?

7. Вимірювання КП антени методом заміщення.

8. Джерела похибок цього методу.

9. Чому у методі заміщення доцільно, щоб еталонна та досліджувана антени працювали на передачу, а не на прийом?

10. Які вимоги по узгодженню антени з її фідером живлення у дзеркальному методі?

Основна література

1. Нарытник Т. Н., Бабак В. П., Ильченко М. Е., Кравчук С. А. Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах. – К.: Техніка, 2000. – 304 с.
2. Фельд Я. Н. Основы теории антенн: учебное пособие для вузов / Я. Н. Фельд, Л. С. Бененсон. – 2-е изд., перераб. – М.: Дрофа, 2007. – 491 с.
3. Информационные технологии в радиотехнических системах: Учеб. Пособие. – 2-е изд., перераб и доп. / В. А. Васин, И. Б. Власов, Ю. М. Егоров и др.; Под ред И. Б. Федорова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 768 с.
4. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1988. – 432с.
5. Белоцерковский Г. Б. Основы радиотехники и антенны. В 2-х ч. Ч. II. Антенны. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.

Допоміжна література

1. Манойлов В. П. Ширококуглові рупорні антени зі складною формою поперечного перерізу / В. П. Манойлов, В. В. Павлюк, Р. Л. Ставісіук. – Житомир: ФОП О. О. Євенок, 2016. – 212 с.
2. Захарія Й. А. Методи прикладної електродинаміки. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 352 с.
3. Кочержевский Г. Н. Антенно-фидерные устройства. – М.: Радио и связь, 1981. – 280 с.

