

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний авіаційний університет

ПОЛЯ І ХВИЛІ В СИСТЕМАХ ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Розповсюдження радіохвиль

Лабораторний практикум
для студентів спеціальності
6.170102 "Системи технічного
захисту інформації"

Київ 2010

УДК 621.391.812(076.5)
ББК з880-082.03я7
П 54

Укладачі: *Ю.В. Пепа, О.А. Щербина, О.П. Нечипорук*

Рецензенти: *В.О. Хорошко, Н.А. Соколова*

Затверджено методично-редакційною радою Національного авіаційного університету (протокол № 6 від 12.05.2010 р.).

П 54 **Поля і хвилі в системах технічного захисту інформації. Розповсюдження радіохвиль:** лабораторний практикум / уклад.: Ю.В. Пепа, О.А. Щербина, О.П. Нечипорук. – К.: НАУ, 2010. – 51 с.

Містить опис лабораторних робіт, рекомендації щодо їх виконання, а також список літератури.

Виконання лабораторних робіт передбачає використання програмного забезпечення "LabVIEW 8.20", що є середовищем програмування для моделювання та автоматизації експериментів з дослідження особливостей розповсюдження радіохвиль у просторі.

Для студентів спеціальності 6.170102 "Системи технічного захисту інформації".

Навчальне видання

ПОЛЯ І ХВИЛІ В СИСТЕМАХ
ТЕХНІЧНОГО ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

Розповсюдження радіохвиль

Лабораторний практикум
для студентів спеціальності
6.170102 "Системи технічного
захисту інформації"

Укладачі: ПЕПА Юрій Володимирович
ЩЕРБИНА Ольга Алімівна
НЕЧИПОРУК Олена Петрівна

Технічний редактор *А.І. Лавринович*
Коректор *Л.М. Романова*
Комп'ютерна верстка *Н.С. Ахроменко*

Підписано до друку 24.09.10. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 3,19. Обл.-вид. арк. 3,0.
Тираж 100 прим. Замовлення № 211-1. Вид. № 12/II.

Видавництво НАУ-друк.
03680. Київ - 680, проспект Космонавта Комарова, 1.

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002.

ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Курс “Поля і хвилі в системах технічного захисту інформації” – одна з основних спеціальних дисциплін при підготовці студентів, що навчаються за спеціальністю 6.170102 “Системи технічного захисту інформації”.

Мета даного курсу – підготовка студентів до аналізу та дослідження особливостей поширення електромагнітних хвиль у просторі.

Лабораторні заняття є важливою складовою частиною навчального процесу, сприяють закріпленню і глибокому засвоєнню отриманих на лекціях і під час самостійного опрацювання курсу теоретичних знань.

Успішне проведення лабораторної роботи можливе лише за умови попередньої до неї підготовки. При підготовці до лабораторної роботи необхідно вивчити відповідні теоретичні розділи курсу, чітко уявляти мету, задачу і порядок виконання роботи.

Програмний пакет LabVIEW – це середовище програмування для автоматизації комп’ютерних вимірювань та зручного графічного представлення результатів експериментів з моделювання і аналізу процесів з розповсюдження радіохвиль.

При успішному виконанні студентом лабораторних робіт, які входять за навчальною програмою до відповідного модуля, і своєчасному їх захисті студент може бути допущений до виконання контрольної модульної роботи.

Лабораторна робота 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У ВІЛЬНОМУ ПРОСТОРИ

Мета роботи – вивчити закономірності поширення радіохвиль у вільному просторі і дослідити їх за допомогою віртуальної лабораторної установки.

Теоретичні відомості

Вільний простір є однорідним безмежним середовищем без втрат, відносно діелектрична і магнітна проникність якого дорівнюють одиниці. Вивчення поширення радіохвиль у вільному просторі дозволяє виявити загальні закономірності, властиві будь-якому механізму розповсюдження радіохвиль.

Розглянемо основні закономірності поширення радіохвиль у вільному просторі. Припустимо, що у вільному просторі організовано лінію зв'язку. Вона складається, з одного боку, з передавача та випромінюючої антени, що сполучаються фідерною лінією, з іншого боку – з приймальної антени, фідера і приймача (рис. 1.1).

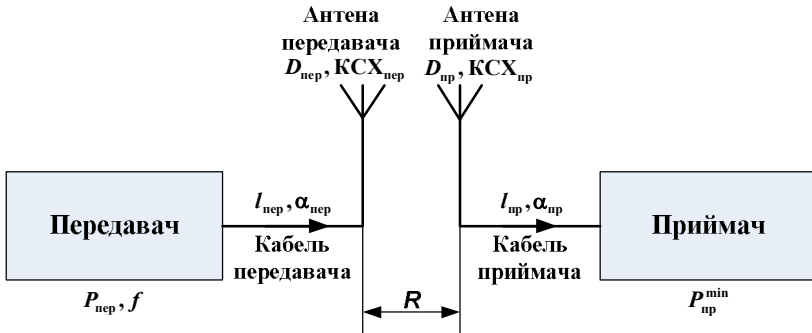


Рис. 1.1. Структурна схема радіолінії

Передавач працює на частоті f і має потужність $P_{\text{пер}}$. Потужність випромінювання $P_{\text{випр}}$ менша за потужність передавача через присутність теплових втрат в лінії фідера і неідеального узгодження передавальної антени

$$P_{\text{випр}} = P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}}, \quad (1.1)$$

де $\eta_{\text{пер}}$ – коефіцієнт корисної дії тракту передавача.

Теплові втрати в лінії фідера прийнято характеризувати погонним загасанням α , вираженим в дБ/м. Це загасання в лінії довжиною 1 м. При довжині фідера l загасання в ньому складе $A[\text{дБ}] = \alpha l[\text{дБ}]$ або

$$A = 10^{-\frac{\alpha l}{10}} \quad (1.2)$$

у відносних одиницях (разах).

Для неідеально узгодженої антени розподіл напруги вздовж лінії фідера утворюється накладенням двох хвиль: падаючою, що має амплітуду $U_{\text{пад}}$, і відбитою з амплітудою $U_{\text{відб}}$ (рис. 1.2). Напруга вздовж лінії змінюється, досягаючи мінімального $U_{\text{мін}}$ і максимального $U_{\text{макс}}$ значень в точках, зміщених на чверть довжини хвилі в лінії. Ступінь узгодження антени з лінією фідера прийнято характеризувати двома параметрами:

коефіцієнтом відбиття

$$\Gamma = \frac{U_{\text{відб}}}{U_{\text{пад}}} \quad (1.3)$$

або коефіцієнтом стоячої хвилі (КСХ)

$$\text{КСХ} = \frac{U_{\text{макс}}}{U_{\text{мін}}} \quad (1.4)$$

Один з цих параметрів легко виразити через інший (рис. 1.2):

$$\Gamma = \frac{\text{КСХ} - 1}{\text{КСХ} + 1} \quad (1.5)$$

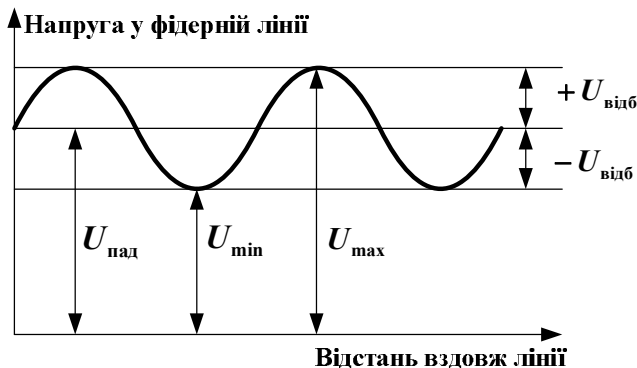


Рис. 1.2. Розподіл напруги вздовж фідерної лінії

Для ідеально узгодженої антени $\text{КСХ} = 1$, $\Gamma = 0$. В добре узгодженій антені $\text{КСХ} < 1,2 \div 1,5$. При врахуванні обох чинників коефіцієнт корисної дії тракту передавача складе:

$$\eta = A(1 - \Gamma^2) = A \left(1 - \left(\frac{КСХ - 1}{КСХ + 1} \right)^2 \right). \quad (1.6)$$

При всенапрявленій передавальній антені на відстані R від джерела модуль вектора Пойнтінга розраховується за формулою:

$$|\vec{\Pi}_0| = \frac{P_{\text{випр}}}{4\pi R^2}. \quad (1.7)$$

Будь-яка реальна антена має спрямоване випромінювання і завжди є напрям, в якому випромінюється максимум енергії. Коефіцієнтом спрямованої дії (КСД) антени називається відношення щільності потоку потужності, що створюється в напрямку максимального випромінювання направленою антеною, до щільності потоку потужності ізотропної антени при однаковій випромінюваній потужності.

Тоді у напрямі максимального випромінювання антени, що має КСД $D_{\text{пер}}$, щільність потоку потужності на відстані R буде дорівнювати:

$$\Pi = \frac{P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} D_{\text{пер}}}{4\pi R^2}. \quad (1.8)$$

З іншого боку, щільність потоку потужності виражається через діючі значення напруженостей електричного $E_{\text{д}}$ і магнітного $H_{\text{д}}$ полів, які, у свою чергу, пов'язані між собою характеристичним опором вільного простору $Z_0 = 120\pi$ [Ом]:

$$\Pi = H_{\text{д}} E_{\text{д}} = \frac{E_{\text{д}}^2}{Z_0}. \quad (1.9)$$

Це дозволяє визначити діюче значення напруженості електричного поля на відстані R

$$E_{\text{д}} = \frac{\sqrt{30 P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} D_{\text{пер}}}}{R} \quad (1.10)$$

та її амплітудне значення

$$E_m = \sqrt{\frac{60P_{\text{пер}} \eta_{\text{пер}} D_{\text{пер}}}{R}}. \quad (1.11)$$

Анени, що працюють на прийом, прийнято характеризувати діючою довжиною h_d або ефективною площею $S_{\text{еф}}$. Перший параметр застосовується для опису антен метрового і більш довгохвильових діапазонів. Такі антени представляють систему тонких металевих провідників, а напруга на їх вихідних затискачах дорівнюватиме:

$$U_{\text{вих}} = E_d h_d. \quad (1.12)$$

Для більш високочастотних діапазонів зазвичай визначається потужність на виході приймальної антени:

$$P_{\text{пр}} = \Pi S_{\text{еф}}. \quad (1.13)$$

Ефективна площа антени пов'язана з її КСД $D_{\text{пр}}$ співвідношенням

$$S_{\text{еф}} = \frac{\lambda^2}{4\pi} D_{\text{пр}}, \quad (1.14)$$

де $\lambda = \frac{c}{f}$ – довжина хвилі.

Втрати узгодження приймальної антени визначаються її КСХ, втрати у фідері приймального тракту визначаються таким самим чином, як і в передавальному. Разом вони враховуються введенням коефіцієнта корисної дії приймального тракту фідера $\eta_{\text{пр}}$. Тоді потужність на вході приймача буде дорівнювати:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} D_{\text{пер}} D_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} \lambda^2}{(4\pi R)^2}. \quad (1.15)$$

Приймач характеризується чутливістю $P_{\text{прм}}^{\text{min}}$, такою мінімальною потужністю на вході, при якій здійснюється прийом сигналів із заданою якістю. Зазвичай ця величина задається в дБ відносно 1 мВт [дБ/мВт], для переходу до системи СІ використовується співвідношення

$$P_{\text{прм}}^{\text{min}} = 10^{\frac{P_{\text{дБ/мВт}}}{10}} - 3. \quad (1.16)$$

Максимальну дальність зв'язку R_{\max} отримуємо, якщо у нерівність (1.15) підставити чутливість приймача і розв'язати його відносно R :

$$R_{\max} = \frac{\lambda}{4\pi} \sqrt{\frac{P_{\text{пер}} D_{\text{пер}} D_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}}}{P_{\text{прм}}^{\min}}} . \quad (1.17)$$

Приведені вище співвідношення дозволяють здійснити моделювання радіотраси у вільному просторі і розробити відповідну віртуальну лабораторну установку.

Порядок виконання роботи

1. Запустити лабораторну установку, ознайомитися з органами управління (рис. 1.3). Включення приладу здійснюється натисканням на двонаправлену стрілку в рядку кнопок вікна LabVIEW.

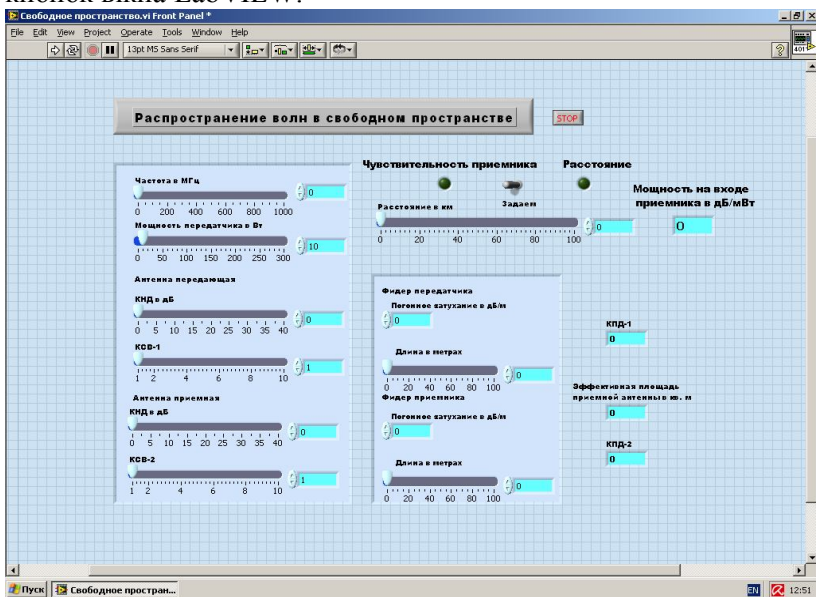


Рис. 1.3. Вид віртуальної лабораторної установки

2. Виконати дослідження відповідно до вибраного варіанту. Вихідні параметри радіолінії для кожного дослідження брати з табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Вихідні параметри для дослідження
радіолінії у вільному просторі

Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
f , МГц	50	100	200	300	600
$P_{\text{пер}}$, Вт	10	100	50	200	150
$D_{\text{пер}}$, дБ	3	6	12	15	10
$KCX_{\text{пер}}$	1,2	1,5	1,3	1,1	1,4
$D_{\text{пр}}$, дБ	6	4	6	8	4
$KCX_{\text{пр}}$	1,5	1,8	2	1,4	2
$\alpha_{\text{пер}}$, дБ/м	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03
$l_{\text{пер}}$, м	25	20	15	10	5
$\alpha_{\text{пр}}$, дБ/м	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06
$l_{\text{пр}}$, м	20	15	10	15	10
R , км	10	20	15	20	5
$P_{\text{прм}}^{\text{min}}$, дБ/МВ	- 40	- 45	- 50	- 55	- 60

Параметри, значення яких відрізняються від даних в табл. 1.1 вказані в описі конкретних досліджень.

3. Дослідження в режимі завдання відстані:

- встановити режим завдання відстані і ввести параметри радіолінії відповідно до вибраного варіанту (табл. 1.1). Змінюючи відстань, фіксувати значення потужності на вході приймача. Дані звести до таблиці;

- змінюючи KCX передавальної антени, фіксувати значення потужності на вході приймача. Дані звести до таблиці;

- змінюючи довжину кабелю передавача, фіксувати значення потужності на вході приймача. Дані звести до таблиці;

- побудувати графіки отриманих залежностей.

4. Дослідження в режимі завдання чутливості:

- встановити режим завдання чутливості приймача і ввести параметри радіолінії відповідно до вибраного варіанту (табл. 1.1). Змінюючи потужність передавача, фіксувати значення максимальної відстані зв'язку. Дані звести до таблиці;
 - змінюючи чутливість приймача, фіксувати значення максимальної відстані зв'язку. Дані звести до таблиці;
 - змінюючи частоту передавача, фіксувати значення максимальної відстані зв'язку. Дані звести до таблиці;
 - побудувати графіки отриманих залежностей.
5. Змінюючи КСД приймальної антени, фіксувати значення ефективної площі антени. Дані звести до таблиці. Побудувати графік отриманої залежності.
6. Встановити нульову довжину кабелю передавача. Змінюючи КСХ передавальної антени, фіксувати значення ККД тракту передавача. Дані звести до таблиці. Побудувати графік отриманої залежності.
7. Встановити режим ідеального узгодження передавальної антени. Змінюючи довжину кабелю передавача, фіксувати значення ККД тракту. Дані звести до таблиці. Побудувати графік отриманої залежності.
8. Пояснити отримані залежності, спираючись на знання теорії.
9. Оформити і захистити звіт по роботі.

Контрольні питання

1. Які параметри апаратури на передавальному кінці радіолінії впливають на дальність зв'язку?
2. Які параметри апаратури на приймальному кінці радіолінії впливають на дальність зв'язку?
3. Що таке КСД антени?
4. Що таке ефективна поверхня і діюча довжина антени?
5. Як зміниться дальність зв'язку при збільшенні КСД передавальної антени на 20 дБ?
6. Як зміниться дальність зв'язку при зменшенні КСД приймальної антени на 6 дБ?
7. Як зміниться дальність зв'язку при збільшенні потужності передавача у 9 разів?

8. Як зміна частоти впливає на дальність зв'язку?
9. На якому кінці радіолінії – приймальному або передавальному – краще поставити антену з великим КСД?
10. Що таке КСХ?
11. Як значення КСХ впливає на дальність зв'язку?
12. Чому передавач краще розмішувати поблизу передавальної антени?
13. Що таке погонне загасання кабелю?
14. Як довжина сполучного кабелю впливає на дальність зв'язку?
15. Як зміниться дальність зв'язку, якщо між передавачем і антеною включити додатково відрізок кабелю завдовжки 60 м з погонним згасанням 0,1 дБ/м?

Лабораторна робота 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАСТІ ПРОСТОРУ, ЯКА Є ІСТОТНОЮ ПРИ ПОШИРЕННІ РАДІОХВИЛЬ. ЗОНИ ФРЕНЕЛЯ

Мета роботи – вивчити особливості процесу розповсюдження радіохвиль та визначити область простору, в якій відбувається безпосередня передача енергії радіохвиль.

Теоретичні відомості

Дане питання доцільно почати розглядати з принципу Гюйгенса-Френеля.

Нехай у точці A (рис. 2.1) розташоване джерело електромагнітних хвиль. Необхідно визначити напруженість електричного поля в точці B . Навколо випромінювача умовно проведена замкнута поверхня S . Згідно принципу Гюйгенса, кожна елементарна ділянка поверхні ΔS може бути джерелом вторинних сферичних хвиль. Поле у точці B визначається шляхом векторного додавання полів вторинних джерел по всій поверхні S .

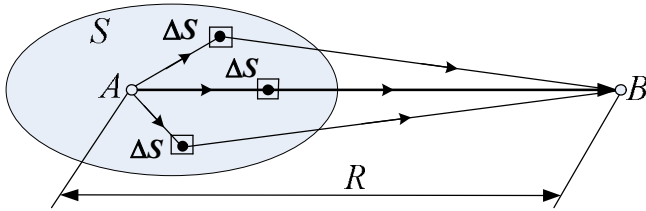


Рис. 2.1. Графічне зображення принципу Гюйгенса-Френеля

Процес формування поля в точці B розглянемо для випадку дифракції радіохвилі на круглому отворі в нескінченному екрані. Нехай точка випромінювання A і точка прийому B розташовані на відстані R одна від одної. На відстані R від точки B розміщений перпендикулярно відстані AB плоский металевий екран нескінченних розмірів (рис. 2.2).

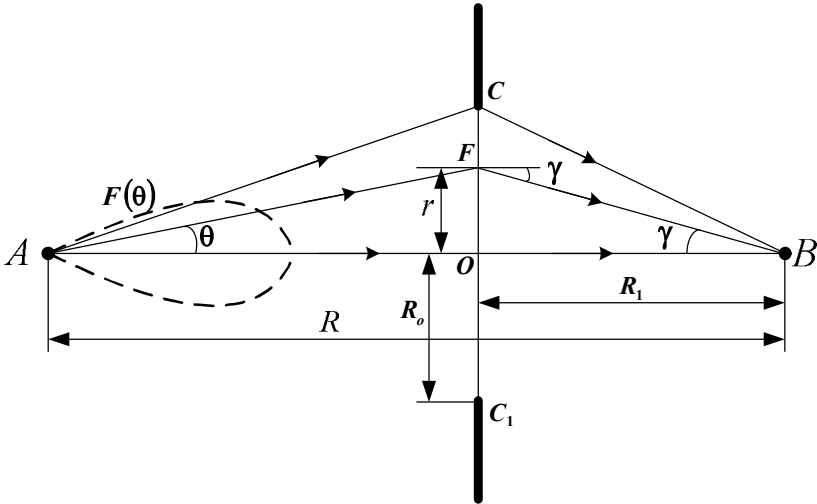


Рис. 2.2. Круглий отвір в нескінченному екрані

Випромінювач, поміщений в точку A , має діаграму спрямованості $F(\theta)$.

Замкнена навколо точки A поверхня S створена цим екраном і нескінченно віддаленою півсферою, що спирається на екран. При віддаленні від точки випромінювання напруженість електричного поля зменшується пропорційно відстані. Це

означає, що вторинні джерела на нескінченно віддаленій півсфері не впливають на формування поля в точці B . Істотний вплив будуть формувати джерела, що лежать поблизу точки перетину O прямої AB з площиною екрану. Якщо в екрані немає отвору, то через його нескінченність і непрозорість для хвиль поле в точці B дорівнюватиме нулю.

Якщо в екрані зробити невеликий круглий отвір площею ΔS з центром в точці O , то за рахунок випромінювання з його поверхні в точці B з'явиться напруженість поля ΔE_1 . Збільшимо площу отвору до $2\Delta S$. Тоді випромінювання з додаткової кільцевої поверхні дасть в точці B додаткову складову напруженості поля з амплітудою ΔE_2 . За рахунок більшого шляху складова поля ΔE_2 відстає по фазі від ΔE_1 на $\Delta\phi_1$ (рис. 2.3). Збільшимо площу отвору до $3\Delta S$. Тоді в точці B з'явиться додаткова складова напруженості поля з амплітудою ΔE_3 . Вона відстає по фазі від ΔE_2 на $\Delta\phi_2$ і т.д. В результаті отримуємо векторну діаграму (рис. 2.3), кінці якої замикаються результуючим вектором напруженості поля E в точці B . При достатньо малих приростах площі отвору лінія векторної діаграми буде плавною.

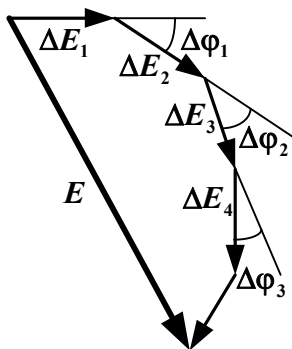


Рис. 2.3. Векторне сумування полів ділянок отвору

Для визначення напруженості поля в точці B скористаємося принципом Гюйгенса-Френеля. Вторинні джерела, що розташовані в отворі на радіусі r , мають комплексну амплітуду

$$dE_s = F(\theta) \frac{\exp\left(-jk\sqrt{r^2 + (R - R_1)^2}\right)}{\sqrt{r^2 + (R - R_1)^2}}, \quad (2.1)$$

яка визначається діаграмою спрямованості випромінювача і відстанню AF від випромінювача до отвору (рис. 2.2). Ці вторинні джерела, які розташовані на кільці dS , створюють в точці B поле

$$dE = dE_s \cos \gamma \frac{\exp\left(-jk\sqrt{r^2 + R_1^2}\right)}{\sqrt{r^2 + R_1^2}} dS. \quad (2.2)$$

Дріб у виразі (2.2) представляє сферичну хвилю, що приходить в точку B шляхом FB . З рис. 2.2 бачимо, що

$$\theta = \arctg\left(\frac{r}{R - R_1}\right), \quad (2.3)$$

$$\gamma = \arctg\left(\frac{r}{R_1}\right). \quad (2.4)$$

Сумарне поле в точці B отримуємо інтегруванням по кільцях рівної площі радіуса r , що змінюється від 0 до радіусу отвору R_o :

$$E(R_o) = \int_0^{R_o} dE(r). \quad (2.5)$$

При збільшенні площі отвору спочатку напруженість поля в точці B збільшується. При певному радіусі отвору R_o за рахунок збільшення шляхів AF і FB поле вторинних джерел, розташованих на периферії отвору біля екрана, буде в протифазі з полем від центру отвору (рис. 2.4, *a*). Амплітуда поля досягне максимуму. Це відбудеться при різниці шляхів в половину довжини хвилі, $AFB - AB = \lambda/2$. Отвір при виконанні цієї умови називається першою зоною Френеля. При подальшому збільшенні отвору амплітуда поля буде зменшуватися через протифазність полів, що створюються новими кільцевими вторинними джерелами. Амплітуда поля досягне мінімуму при $AFB - AB = \lambda$. Цей отвір відповідає другій зоні Френеля (рис. 2.4, *б*). При подальшому збільшенні отвору амплітуда поля

починає збільшуватися і досягає нового максимуму при $AFB - AB = 3\lambda/2$. Це буде третя зона Френеля (рис. 2.4, в). Якщо і далі збільшувати отвір, то векторна діаграма відобразить спіраль, що закручується.

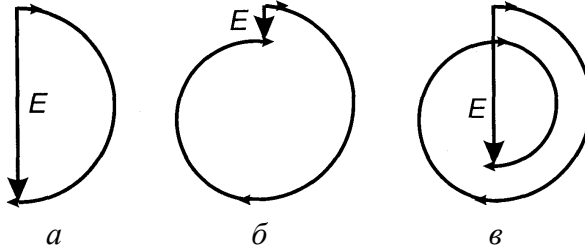


Рис. 2.4. Векторні діаграми при різних діаметрах отвору

Амплітуда поля в точці B приймає екстремальні значення при виконанні умови:

$$AFB - AB = n \frac{\lambda}{2}, \quad (2.6)$$

причому максимуми будуть при непарному n , а мінімуми - при парному n .

Позначивши радіус n -ї зони Френеля через ρ_n , перепишемо умову (2.6) у вигляді:

$$\sqrt{\rho_n^2 + (R - R_1)^2} + \sqrt{\rho_n^2 + R_1^2} - R = n \frac{\lambda}{2}. \quad (2.7)$$

За звичайних умов $R \gg \lambda$ і $R_1 \gg \lambda$, тоді з (2.7) отримуємо наближений вираз для радіусів зон Френеля:

$$\rho_n \approx \sqrt{\frac{n\lambda R_1 (R - R_1)}{R}}. \quad (2.8)$$

Перша зона Френеля – коло, а решта – кільця. Причому площі всіх зон Френеля однакові:

$$S_n = \pi \rho_n^2 - \pi \rho_{n-1}^2 = \frac{\pi \lambda R_1 (R - R_1)}{R}. \quad (2.9)$$

Зобразимо графік залежності співвідношення напруженості поля E до напруженості поля за відсутності

екрана E_0 від площі отвору S , віднесеної до площі першої зони Френеля S_1 (рис. 2.5).

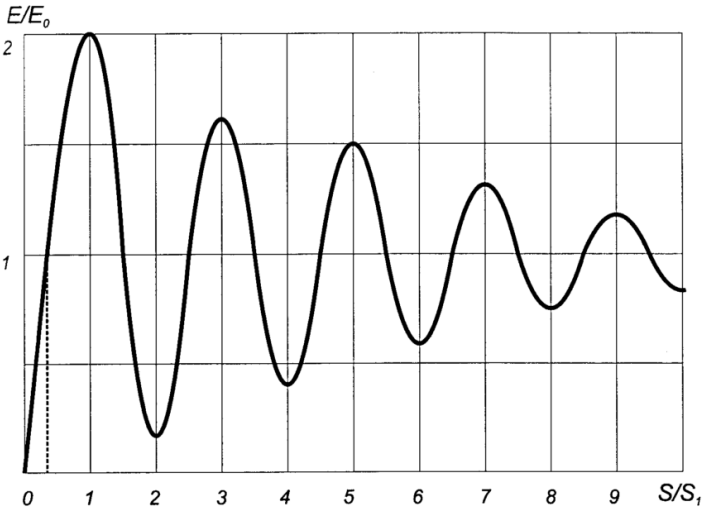


Рис. 2.5. Залежності відносної амплітуди поля від площі отвору

Ця залежність носить осцилюючий характер, причому амплітуда осциляції убуває зі збільшенням отвору. Для зон з великими номерами поля в точці B близькі за амплітудою і протифазні, тому вони взаємно компенсуються.

Результуюче сумарне поле за відсутності екрана E_0 в основному визначається першою зоною і декількома прилеглими до неї зонами. Амплітуда цього поля близька до половини амплітуди поля, що формується першою зоною Френеля. На практиці вважають, що перша зона Френеля є суттєвою зоною на площині екрану. При зсуві екрану вздовж осьової лінії AB радіус першої зони змінюється. Він буде максимальним в середині траси і зменшується до її початку і кінця. Так як різниця відстаней $AFB - AB$ постійна і дорівнює половині довжини хвилі, то радіус першої зони Френеля прокреслює еліпс з фокусами в точках A і B . Мінімальною зоною називають отвір екрану, при якому $E/E_0 = 1$, тобто досягається амплітуда, що дорівнює напруженості поля за

відсутності екрану. Її межа утворює більш витягнутий еліпс з фокусами в тих самих точках. Якщо ці еліпси змусити обертатися навколо осі AB , то утворяться еліпсоїди обертання (рис. 2.6). Ці еліпсоїди обмежують відповідно істотну і мінімальну області простору розповсюдження радіохвилі.

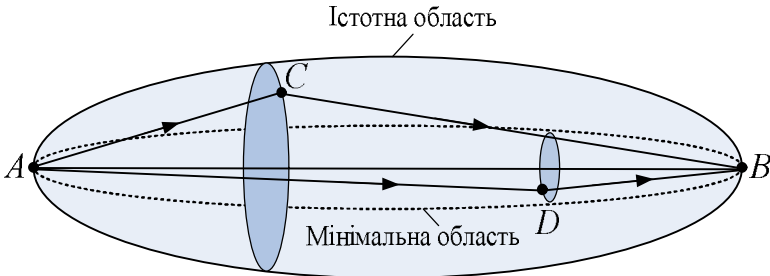


Рис. 2.6. Істотна і мінімальна області при поширенні радіохвиль

Викладене вище дозволяє стверджувати, що розповсюдження радіохвилі з точки передачі до точки прийому відбувається в деякій області простору, що має форму еліпсоїда обертання з фокусами в цих точках. Якщо суттєві або хоча б мінімальна зони не містять неоднорідностей: атмосферних утворень, поверхні Землі з розташованими на ній будівлями, рослинністю і т.д., то при розрахунках радіолінії можна вважати, що радіохвиля поширюється у вільному просторі. Відзначимо також, що вплив діаграми спрямованості випромінювача $F(\theta)$ проявляється лише при досить вузьких діаграмах. В реальних конструкціях антени такі діаграми одержують лише при роботі в дециметровому і більш високочастотних діапазонах. Для моделювання та вивчення викладених вище питань створимо віртуальну лабораторну установку.

Порядок виконання роботи

1. Запустити лабораторну установку, ознайомитися з органами управління (рис. 2.7).
2. Виконати дослідження відповідно з обраним варіантом. Вихідні параметри радіолінії для кожного дослідження брати з табл. 2.1.

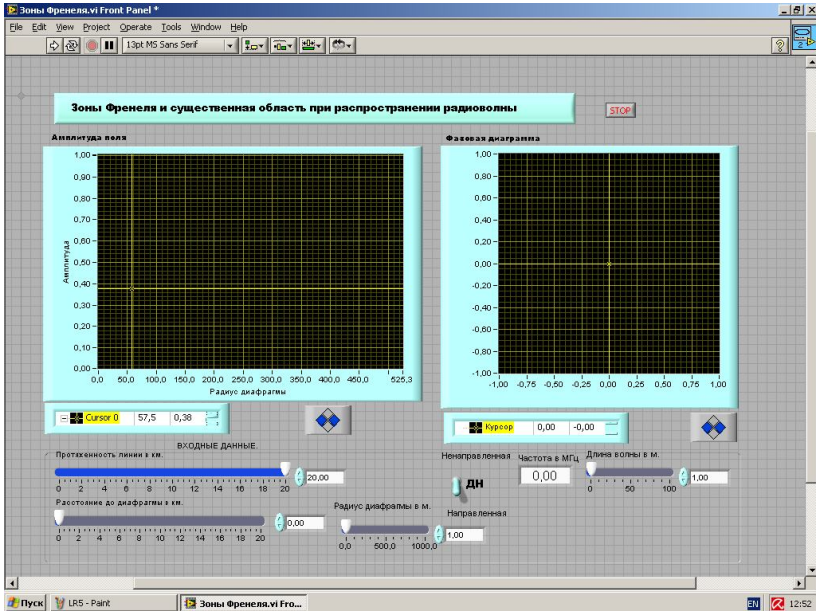


Рис. 2.7. Вид віртуальної лабораторної установки

Таблиця 2.1

Вихідні параметри для дослідження зон Френеля

Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
Протяжність лінії, км	20	10	20	5	2
λ_1 , м	50	70	100	30	5
λ_2 , м	10	20	15	12	10
$2\Delta\theta$, град	15	10	6	20	5
Відносна відстань до початкової і кінцевої точок траси Δ , %	10	5	20	15	10

3. Встановити довжину лінії і довжину хвилі λ_1 , відповідно з обраним варіантом (табл. 2.1). Діаграма спрямованості передавача – ненапрявлена:

- змінюючи відстань до діафрагми і за необхідності коригуючи радіус діафрагми, заміряти за допомогою курсору на лівому індикаторі радіус з першої зони Френеля. Дані звести до таблиці;

- повторити вимірювання для довжини хвилі λ_2 . Дані звести в таблицю;

- побудувати графіки першої зони Френеля вздовж довжини траси для λ_1 і λ_2 .

4. Встановити протяжність лінії і довжину хвилі λ_1 , відповідно з обраним варіантом (табл. 2.1). Діаграма спрямованості передавача – направлена. Встановіть її ширину $2\Delta\theta$.

- помістити діафрагму на відносній відстані (відношення довжини відрізка до повної довжини траси) Δ від початкової точки траси. За допомогою курсорів здійснити по точках вимірювання кривих на обох індикаторах установки. Дані звести до таблиці;

- помістити діафрагму на відносній відстані Δ від кінцевої точки траси. За допомогою курсорів здійснити по точках вимірювання кривих на обох індикаторах установки. Дані звести до таблиці;

- побудувати графіки отриманих залежностей.

5. Пояснити отримані залежності, спираючись на знання теорії.

6. Оформити і захистити звіт по роботі.

Контрольні питання

1. Поясніть суть принципу Гюйгенса-Френеля.
2. Що таке зони Френеля? Чому дорівнюють їх радіуси і площі?
3. Що таке істотна область простору при поширенні радіохвилі?

4. Що таке мінімальна область простору при поширенні радіохвилі?
5. Яку форму має істотна область простору при поширенні радіохвилі?
6. Як радіус істотної області простору змінюється вздовж траси?
7. Чому залежність амплітуди поля в точці прийому від радіуса отвору в діафрагмі носить осцилюючий характер?
8. Коли на радіотрасі існує пряма видимість?
9. Коли на радіотрасі можна не враховувати перешкоди і говорити про передачу інформації радіохвилею у вільному просторі?
10. Чи впливає ширина діаграми спрямованості передавальної антени на форму і розміри істотної і мінімальної областей?
11. Як впливає ширина діаграми спрямованості передавальної антени на залежності амплітуди і фази вектора поля в точці прийому від радіуса діафрагми?
12. Чому при використанні спрямованої передавальної антени залежності амплітуди і фази вектора поля в точці прийому від радіуса діафрагми різні при симетричному положенні діафрагми відносно середини траси?

Лабораторна робота 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ ПОБЛИЗУ ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ

Мета роботи – вивчити закономірності поширення радіохвиль поблизу поверхні Землі.

В рамках цієї роботи будемо вважати земну поверхню плоскою, що допустимо в межах 20 % зони прямої видимості. Будемо досліджувати вплив геометричних параметрів радіолінії і електромагнітних характеристик земної поверхні за допомогою віртуальної лабораторної установки.

Теоретичні відомості

В більшості реальних радіоліній передавальна та приймальна антени розташовані поблизу земної поверхні. При цьому її електромагнітні параметри, форма, рельєф істотно впливають на рівень сигналу в точці прийому.

Електромагнітні властивості будь-якого середовища характеризуються відносною діелектричною проникністю ϵ , питомою провідністю σ і відносною магнітною проникністю μ . За рідкісним винятком, всі види земної поверхні є немагнітними матеріалами, для яких $\mu \approx 1$. Експериментально встановлено, що електричні параметри ґрунтів визначаються в основному їх вологонасиченістю. Вона змінюється протягом року, а в зимовий період при мінусових температурах вода перетворюється на лід. В табл. 3.1 наведені орієнтовні значення відносної діелектричної проникності та питомої провідності для типових видів земної поверхні. Ці параметри визначені при різних температурах і для різних частотних діапазонів.

Середовища поділяють на діелектрики та провідники за відношенням густин струму зміщення δ_{3M} і струму провідності δ .

Це відношення дорівнює:

$$\left| \frac{\delta_{3M}}{\delta} \right| = \frac{\epsilon}{60\lambda\sigma}, \quad (3.1)$$

де $\lambda = \frac{c}{f}$ – довжина хвилі; f – частота; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла.

Якщо відношення $\left| \frac{\delta_{3M}}{\delta} \right| \geq 3$, то вплив струму провідності

незначний і ґрунт можна вважати діелектриком. При $\left| \frac{\delta_{3M}}{\delta} \right| \leq 0,3$ – ґрунт розглядається як провідник. Для частот менших 1,5 МГц поверхня Землі – провідник. В сантиметровому і дециметровому діапазонах вона діелектрик.

Таблиця 3.1

Електричні параметри типових видів земної поверхні

Вид земної поверхні		Частота в МГц	Відносна діелектрична проникність	Питома провідність у См/м
1	Прісна вода ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	< 300	90	$2 \cdot 10^{-2}$
2		3000	80	5
3		10000	40	20
4		100000	10	5
5	Морська вода ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	< 300	78	5
6		3000	70	5
7		10000	40	20
8		100000	10	5
9	Вологий ґрунт ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	< 300	15 - 30	$10^{-2} - 10^{-1}$
10		3000	15 - 30	$10^{-1} - 5 \cdot 10^{-1}$
11		10000	10 - 15	1 - 3
12	Сухий ґрунт ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$)	< 300	3 - 6	$10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$
13		3000	3 - 6	$5 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{-2}$
14		10000	2 - 5	$10^{-1} - 2 \cdot 10^{-1}$
15	Лід ($t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$)	< 300	4 - 5	$10^{-2} - 10^{-1}$
16		3000	3,5	$10^{-4} - 10^{-3}$
17		10000	3,2	$10^{-4} - 10^{-3}$
18	Сніг ($t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$)	< 300	1,2	10^{-6}
19		3000	1,2	10^{-5}
20		10000	1,2	10^{-5}
21	Мерзлий ґрунт ($t = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$)	< 300	3 - 7	$10^{-3} - 10^{-2}$
22	Ліс	< 30	1,004	$10^{-6} - 10^{-5}$
23		60 - 3000	1,04 - 1,4	$10^{-5} - 10^{-3}$

Вплив земної поверхні проявляється у появі відбитої електромагнітної хвилі. Напрямок руху падаючої хвилі вказує її вектор Пойнтінга $\vec{P}_{\text{пад}}$. При її падінні під кутом ковзання θ до

земної поверхні утворюється відбита хвиля. Її напрямок руху вказує вектор Пойнтінга $\vec{\Pi}_{\text{відб}}$ (рис. 3.1).

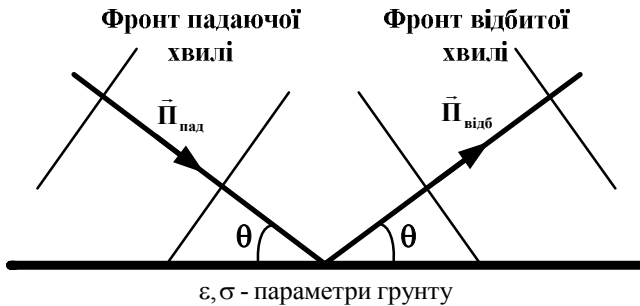


Рис. 3.1. Відбиття хвилі від поверхні Землі

Відношення комплексних амплітуд напруженостей електричних полів відбитої та падаючої хвиль називається коефіцієнтом відбиття

$$\dot{\Gamma} = \frac{\dot{E}_{\text{відб}}}{\dot{E}_{\text{пад}}} = |\dot{\Gamma}| e^{j\Phi}. \quad (3.2)$$

Коефіцієнт відбиття залежить від виду поляризації падаючої хвилі. Для горизонтальної поляризації:

$$\dot{\Gamma}_{\text{гор}}(\theta) = \frac{\sin \theta - \sqrt{(\varepsilon - j60\lambda\sigma) - \cos^2 \theta}}{\sin \theta + \sqrt{(\varepsilon - j60\lambda\sigma) - \cos^2 \theta}}. \quad (3.3)$$

Для вертикальної поляризації:

$$\dot{\Gamma}_{\text{верт}}(\theta) = \frac{(\varepsilon - j60\lambda\sigma)\sin \theta - \sqrt{(\varepsilon - j60\lambda\sigma) - \cos^2 \theta}}{(\varepsilon - j60\lambda\sigma)\sin \theta + \sqrt{(\varepsilon - j60\lambda\sigma) - \cos^2 \theta}}. \quad (3.4)$$

Аналіз показує, що залежність модуля $|\dot{\Gamma}_{\text{гор}}(\theta)|$ є монотонною, а залежність $|\dot{\Gamma}_{\text{верт}}(\theta)|$ – немонотонною. Вона має мінімум при певному куті, що називається кутом Брюстера.

Розглянемо поширення радіохвилі поблизу земної поверхні. Нехай на висоті h_1 в точці A розташована передавальна антена, яка випромінює потужність P . Передавальна антена має діаграму спрямованості $F(\theta, \varphi)$, де

θ – кут місця у вертикальній площині; φ – азимутальний кут в горизонтальній площині. Ширина діаграми спрямованості у вертикальній площині $2\Delta\theta$, в горизонтальній площині – $2\Delta\varphi$. Якщо обидві ці величини виражені в градусах, то коефіцієнт спрямованої дії антени D в напрямку максимуму діаграми спрямованості буде визначатися за формулою:

$$D \approx \frac{32000}{2\Delta\theta \cdot 2\Delta\varphi}. \quad (3.5)$$

Передавальну антену далі будемо вважати ненаправленою в горизонтальній площині, що характерно для всіх радіомовних антен. Ширина діаграми спрямованості в горизонтальній площині таких антен $2\Delta\varphi = 360^\circ$. Діаграма спрямованості передавальної антени у вертикальній площині $F(\theta)$.

На відстані r ($r = CD$) на висоті h_2 в точці B розташована приймальня антена (рис. 3.2).

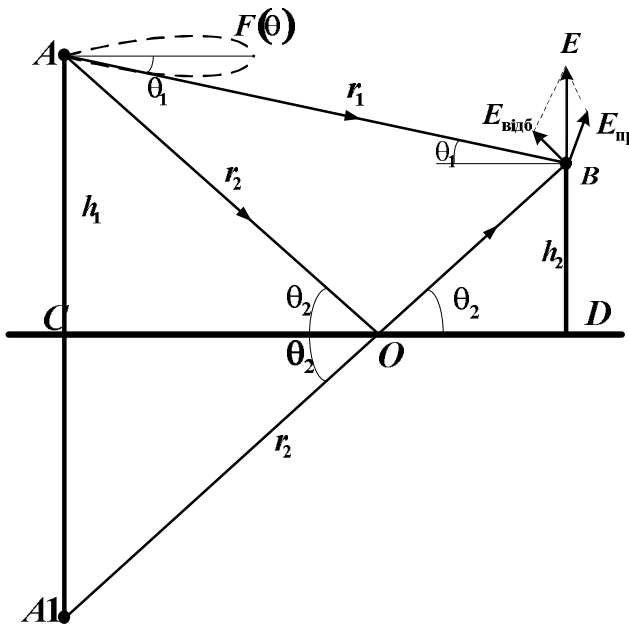


Рис. 3.2. Шляхи прямої й відбитої хвиль в точці прийому

З точки A в точку B радіохвиля може приходити двома шляхами: прямим і відбитим. Напруженість електричного поля утворюється підсумовуванням векторів напруженостей прямої й відбитої хвиль:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{пр}} + \vec{E}_{\text{відб}}. \quad (3.6)$$

Пряма хвиля розповсюджується під кутом θ_1 до горизонту по шляху $AB = r_1$:

$$\theta_1 = \arctg \frac{h_1 - h_2}{r}; \quad (3.7)$$

$$r_1 = \sqrt{r^2 + (h_1 - h_2)^2}. \quad (3.8)$$

Напруженість поля прямої хвилі в точці прийому

$$\vec{E}_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{60PD}}{r_1} F(\theta_1) \exp[-j(2\pi/\lambda)r_1]. \quad (3.9)$$

Відбита хвиля приходить з A до B шляхом $AOB = r_2$. При падінні на поверхню Землі під кутом ковзання θ_2 в точці O хвиля відбивається:

$$\theta_2 = \arctg \frac{h_1 + h_2}{r}; \quad (3.10)$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 + (h_1 + h_2)^2}. \quad (3.11)$$

Коефіцієнт відбиття від земної поверхні $\dot{\Gamma}(\theta_2) = |\dot{\Gamma}(\theta_2)| e^{j\Phi(\theta_2)}$ у значній мірі визначає напруженість поля відбитої хвилі в точці прийому B :

$$\vec{E}_{\text{відб}} = \frac{\sqrt{60PD}}{r_2} F(\theta_2) |\dot{\Gamma}(\theta_2)| \exp[-j((2\pi/\lambda)r_2 - \Phi(\theta_2))]. \quad (3.12)$$

Передбачається, що радіозв'язок здійснюється на велику відстань ($r \gg h_2$). Тому як для горизонтальної, так і для вертикальної поляризацій хвилі в точці прийому вектори $\vec{E}_{\text{пр}}$ і $\vec{E}_{\text{відб}}$ можна вважати паралельними. Ця ж умова дозволяє при обчисленні амплітуд вважати $r_1 = r_2 = r$. Тоді амплітуда

напруженості сумарного електричного поля в точці прийому визначається за формулою:

$$\vec{E} = \frac{\sqrt{60PD}}{r} \times \sqrt{F^2(\theta_1) + F^2(\theta_2)|\Gamma(\theta_2)|^2 + 2F(\theta_1)F(\theta_2)|\Gamma(\theta_2)| \cos\left[(r_2 - r_1)\frac{2\pi}{\lambda} + \Phi(\theta_2)\right]}. \quad (3.13)$$

Радикал у виразі (3.13) описує відмінність поля при врахуванні впливу Землі від поля у вільному просторі. Він називається множником послаблення, чи інтерференційним множником. При переміщенні вздовж траси, коли змінюється r та при збереженні висот h_1 і h_2 , змінюється різниця фаз прямої і відбитої хвиль через фазовий набіг на $\Delta r = r_2 - r_1$. Залежність множника послаблення від відстані немонотонна (рис. 3.3).

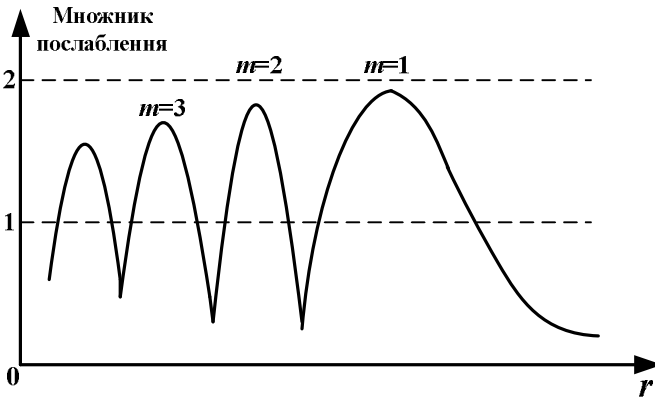


Рис. 3.3. Залежність множника послаблення від відстані

При підйомі приймальної антени вгору, коли змінюється h_2 при збереженні висоти h_1 і відстані r , також змінюється різниця фаз прямої й відбитої хвиль через фазовий набіг на $\Delta r = r_2 - r_1$. Залежність множника послаблення від висоти немонотонна (рис. 3.4).

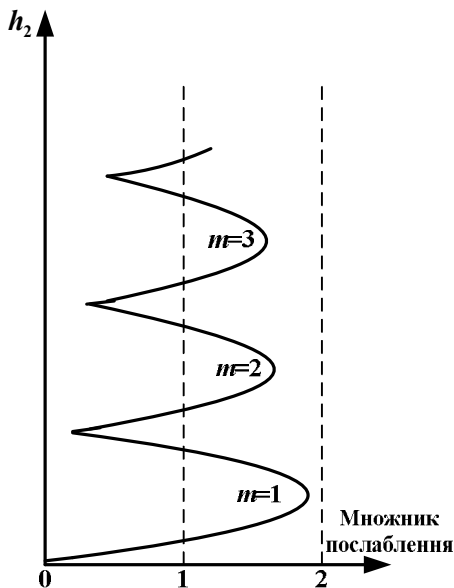


Рис. 3.4. Залежність множника послаблення від висоти

Аналіз множника послаблення зазвичай проводять за умов $r^2 \gg (h_1 + h_2)^2$ і $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \theta \ll 1$. За цих умов $\Delta r = r_2 - r_1 \approx \frac{2h_1 h_2}{r}$.

Максимуми поля будуть при виконанні умови:

$$\frac{2\pi}{\lambda} \Delta r + \Phi(\theta) = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda r} = 2m\pi, \quad (3.14)$$

де $m = 1, 2, 3, \dots$ – номери пелюсток, починаючи з дальнього по відстані або нижнього по висоті підйому приймальної антени (рис. 3.3 та рис. 3.4).

Вираз (3.13) є більш загальним, тому моделювання розповсюдження радіохвилі над плоскою землею поверхнею будемо здійснювати на його основі.

Порядок виконання роботи

1. Запустити лабораторну установку, ознайомитися з органами управління (рис. 3.4).

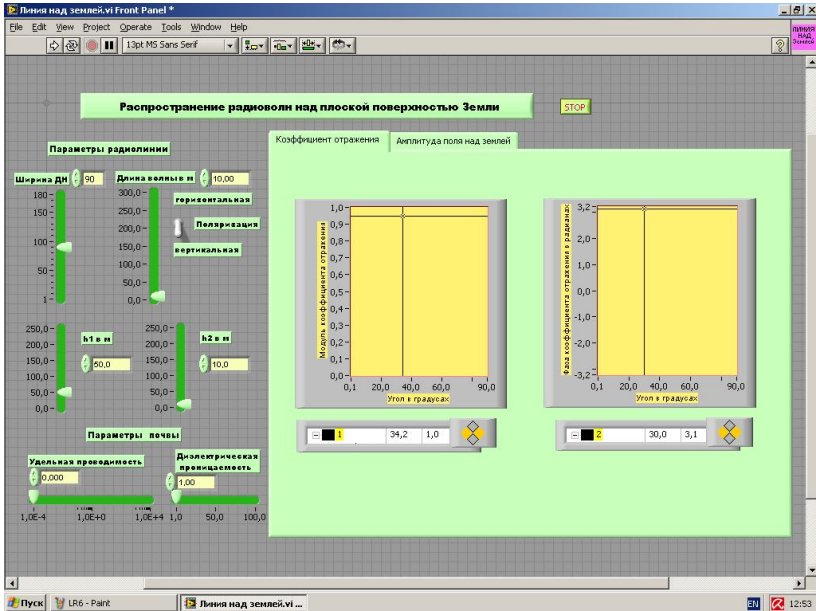


Рис. 3.4. Вид віртуальної лабораторної установки

2. Виконати дослідження відповідно до обраного варіанту. Вихідні параметри для кожного дослідження брати з табл. 3.2.

3. Дослідити відбиття хвилі від поверхні Землі при різних поляризаціях:

- встановити довжину хвилі λ , питому провідність σ і відносну діелектричну проникність ϵ відповідно до обраного варіанту (табл. 3.2);

- встановити горизонтальну поляризацію поля. Заміряти по точках за допомогою курсору на лівому індикаторі закладки «Коефіцієнт відбиття» залежність модуля коефіцієнта відбиття від кута ковзання. Дані звести до таблиці;

- заміряти по точкам за допомогою курсору на правому індикаторі закладки «Коефіцієнт відбиття» залежність фази коефіцієнта відбиття від кута ковзання. Дані звести до таблиці;

- встановити вертикальну поляризацію поля. Заміряти по точках за допомогою курсору на лівому індикаторі закладки

«Коефіцієнт відбиття» залежність модуля коефіцієнта відбиття від кута ковзання. Дані звести до таблиці;

- заміряти по точках за допомогою курсору на правому індикаторі закладки «Коефіцієнт відбиття» залежність фази коефіцієнта відбиття від кута ковзання. Дані звести до таблиці;
- побудувати графіки отриманих залежностей.

Таблиця 3.2

Вихідні параметри для дослідження розповсюдження радіохвиль над поверхнею Землі

Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
Питома провідність σ , См/м	0,001	0,05	0,1	0,5	2
Електрична проникність ϵ	25	20	10	15	5
Довжина хвилі λ , м	20	25	50	25	10
Висота передавальної антени h_1 , м	150	200	150	200	250
Висота приймальної антени h_2 , м	150	75	100	125	150
Ширина діаграми спрямованості $2\Delta\theta$, град	90	120	180	90	180
Довжина лінії, м	1	2	2	3	5

4. Дослідити розподіл поля вздовж відстані:

- не змінюючи довжину хвилі λ , питому провідність σ й відносну діелектричну проникність ϵ , перейти на закладку «Амплітуда поля над землею»;

- встановити висоту передавальної антени h_1 , висоту приймальної антени h_2 , ширину діаграми спрямованості $2\Delta\theta$ відповідно до обраного варіанту (табл. 3.2);

- встановити горизонтальну поляризацію поля;

- за допомогою регуляторів «Довжина лінії в км» і «Мінімальна відстань в км» досягти найбільш інформативного графіка амплітуди поля від відстані на індикаторі;

- за допомогою курсору здійснити по точках вимірювання кривої на індикаторі установки. Дані звести до таблиці. За необхідності окремі ділянки графіка можна розтягнути на індикаторі за допомогою регуляторів «Довжина лінії в км» і «Мінімальна відстань у км»;

- встановити вертикальну поляризацію поля;

- за допомогою курсору здійснити по точках вимірювання кривої на індикаторі установки. Дані звести до таблиці. За необхідності окремі ділянки графіка можна розтягнути на індикаторі за допомогою регуляторів «Довжина лінії в км» і «Мінімальна відстань у км»;

- побудувати графіки отриманих залежностей.

5. Дослідити розподіл поля за висотою:

- не змінюючи положення регуляторів, встановити курсор на екрані в положення довжини лінії r відповідно до обраного варіанту (табл. 3.2);

- змінюючи висоту приймальної антени h_2 за допомогою курсору, здійснити по точках вимірювання залежності амплітуди поля від висоти на фіксованій відстані. Дані звести до таблиці;

- змінити поляризацію поля на горизонтальну;

- змінюючи висоту приймальної антени h_2 за допомогою курсору, здійснити по точках вимірювання залежності амплітуди поля від висоти на фіксованій відстані. Дані звести до таблиці;

- побудувати графіки отриманих залежностей. Визначити положення перших максимумів на графіках.

6. Пояснити отримані залежності, спираючись на знання теорії.

7. Оформити і захистити звіт по роботі.

Контрольні питання

1. Якими параметрами характеризуються електричні властивості земної поверхні?

2. За яким критерієм середовища поділяють на провідники та діелектрики?

3. Як земна поверхня впливає на поширення радіохвилі?

4. Що таке коефіцієнт відбиття?

5. Що таке кут ковзання радіохвилі?

6. Чим відрізняються залежності модуля коефіцієнта відбиття для вертикальної та горизонтальної поляризації поля?

7. Що таке кут Брюстера?

8. Чи може відбита від Землі хвиля бути за амплітудою більше прямої хвилі?

9. Що таке коефіцієнт спрямованої дії антени?

10. Як коефіцієнт спрямованої дії антени пов'язаний з шириною її діаграми спрямованості у вертикальній і горизонтальній площинах?

11. Чому пряма і відбита хвилі приходять в точку прийому з різними фазами?

12. Як амплітуда поля в точці прийому залежить від потужності передавача?

13. Як амплітуда поля в точці прийому залежить від коефіцієнта спрямованої дії передавальної антени?

14. Чи можна збільшити дальність зв'язку, не змінюючи потужності передавача?

15. Який характер має залежність амплітуди поля від відстані і чому?

16. Який характер має залежність амплітуди поля від висоти приймальної антени і чому?

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ У ТРОПОСФЕРІ

Мета роботи – вивчити електричні властивості тропосфери і закономірності розповсюдження радіохвиль в ній.

Теоретичні відомості

Радіохвилі над поверхнею Землі поширюються в її газоподібній оболонці – атмосфері. Будова атмосфери змінюється в просторі і в часі. Зазвичай її поділяють на тропосферу, стратосферу і іоносферу. Тропосфера – найнижчий шар атмосфери. Вона знаходиться від поверхні Землі до висот порядку 15 км.

Електричні властивості тропосфери залежать від температури, тиску і вологості повітря. Нижні шари атмосфери нагріваються розсіяною земною поверхнею сонячною енергією. Із зростанням висоти в тропосфері температура падає. Тиск стовпа газу також падає з ростом висоти. Вологість теж різко зменшується з висотою. У верхньої межі тропосфери хмари не утворюються. На частотах до 15 - 20 ГГц втрати в тропосфері досить малі. Відносна діелектрична проникність тропосфери розраховується за формулою:

$$\varepsilon = 1 + \frac{a_1 p}{T} + \frac{a_2 \varpi}{T^2}, \quad (4.1)$$

де p – тиск газу в мілібарах; ϖ – абсолютна вологість повітря (тиск водяної пари) у мілібарах; T – температура в градусах за шкалою Кельвіна.

Постійні a_1 і a_2 визначені експериментально. Найбільш ймовірні їх значення: $a_1 = 1,552 \cdot 10^{-4}$, $a_2 = 0,745$. Тоді, з врахуванням цих значень, можемо записати:

$$\varepsilon = 1 + \frac{1,552 \cdot 10^{-4}}{T} \left(p + \frac{4810 \varpi}{T} \right). \quad (4.2)$$

Значення метеорологічних параметрів p , ϖ , T зазнають регулярних випадкових змін. Найбільш істотні зміни діелектричної проникності відбуваються за висотою. Ця залежність близька до експоненціальної:

$$\varepsilon(h) = 1 + \Delta\varepsilon_0 \exp\left(\frac{gh}{\Delta\varepsilon_0}\right), \quad (4.3)$$

де $\Delta\varepsilon_0 = 1 - \varepsilon(0)$ – відхилення відносної діелектричної проникності від одиниці на поверхні Землі ($h=0$); $g = -7,85 \cdot 10^{-8}$ 1/м – вертикальний градієнт діелектричної проникності біля земної поверхні.

Існує поняття «стандартної радіоатмосфери», для якої $\Delta\varepsilon_0 = 5,78 \cdot 10^{-4}$, а $g = -7,85 \cdot 10^{-8}$ 1/м. Стандартна радіоатмосфера характеризує середньостатистичний, найбільш ймовірний стан тропосфери в помірних кліматичних умовах і використовується як деякий еталон. Реально ці параметри зазнають сезонних змін. За певних метеорологічних умов можуть спостерігатися істотні відхилення від середньостатистичних залежностей.

Якщо діелектрична проникність атмосфери плавно змінюється за висотою, то поширення радіохвилі в ній супроводжується викривленням траєкторії – явищем рефракції.

Розглянемо плоскошарову модель тропосфери (рис. 4.1).

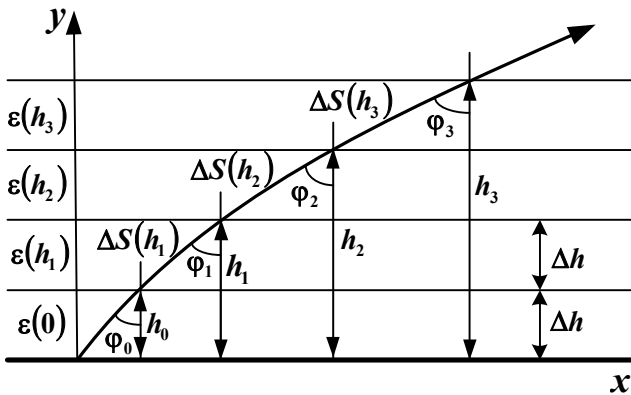


Рис. 4.1. Плоскошарова модель тропосфери

Координата x спрямована вздовж поверхні Землі, а координата y – вертикально вгору. За висотою тропосфера розбита на плоскі шари товщиною Δh .

В межах шару діелектрична проникність вважається постійною. На межі між шарами хвиля заломлюється.

Діелектричні проникності шарів і кути руху хвилі в них пов'язані співвідношенням:

$$\sqrt{\varepsilon(0)} \sin \varphi_0 = \sqrt{\varepsilon(h_1)} \sin \varphi_1 = \sqrt{\varepsilon(h_2)} \sin \varphi_2 = \dots = \sqrt{\varepsilon(h)} \sin \varphi(h), \quad (4.4)$$

де φ_0 – напрямок променю радіохвилі біля поверхні Землі.

Таким чином, промінь радіохвилі проходить через шари тропосфери під кутом, що змінюється з висотою

$$\sin \varphi(h) = \sqrt{\frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(h)}} \sin \varphi_0. \quad (4.5)$$

Довжина шляху хвилі всередині шару також залежить від висоти

$$\Delta S(h) = \frac{\Delta h}{\cos \varphi(h)} = \frac{\Delta h}{\sqrt{1 - \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(h)} \sin^2 \varphi_0}}. \quad (4.6)$$

Нехай траєкторія променя починається в точці початку координат $(0, 0)$ (рис. 4.1). Переходячи за висотою від шару до шару, будемо мати координати перетину променем i -го шару:

$$y_i = h = \Delta h_i; \quad x_i = x_{i-1} + \sqrt{[\Delta S(y_i)]^2 - \Delta h^2}. \quad (4.7)$$

Рефракція називається позитивною, якщо траєкторія радіохвилі вигинається у бік Землі. Це відбувається при спаданні діелектричної проникності з висотою ($g < 0$).

Рефракцію називають негативною, якщо траєкторія хвилі відхиляється від поверхні Землі. Це відбувається при зростанні діелектричної проникності з висотою ($g > 0$).

Порядок виконання роботи

1. Запустити лабораторну установку, ознайомитися з органами управління (рис. 4.2).

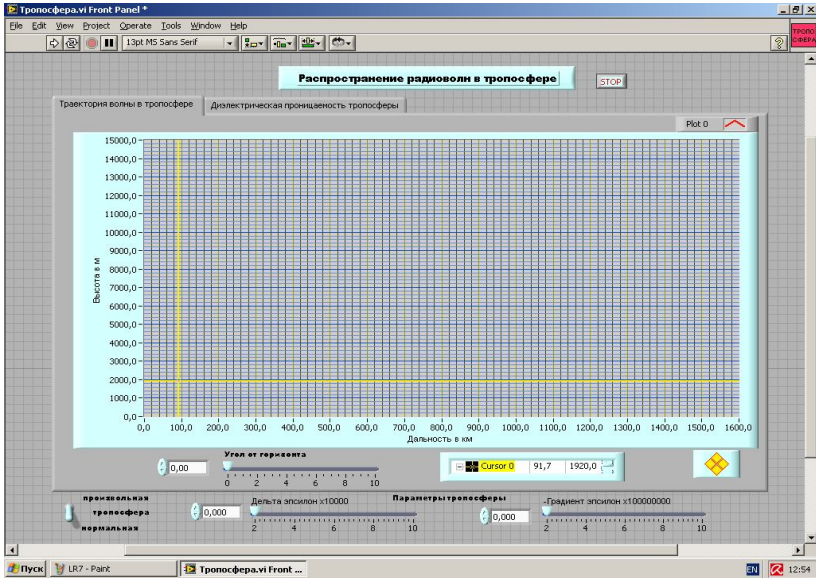


Рис. 4.2. Вид віртуальної лабораторної установки

2. Виконати дослідження відповідно до обраного варіанту. Вихідні параметри для кожного варіанту дослідження брати в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Вихідні параметри для дослідження розповсюдження радіохвиль у тропосфері

Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
Перший кут від горизонту, град	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Другий кут від горизонту, град	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
Дельта епсилон, $\cdot 10^4$	2	4	6	8	10
Градієнт епсилон, $\cdot 10^8$	4	5	6	7	8

3. Дослідити електричні властивості нормальної тропосфери і особливості розповсюдження радіохвилі у ній:

- встановити перемикач введення властивостей тропосфери в положення «Нормальна»;

- перейти на закладку «Діелектрична проникність тропосфери». За допомогою курсору виміряти залежність відносної діелектричної проникності від висоти. Дані звести до таблиці;

- побудувати графік виміряної залежності;

- перейти на закладку «Траєкторія хвилі в тропосфері».

Змінюючи напрямок хвилі регулятором «Кут від горизонту», визначити, при якому значенні кута стає можливим повернення хвилі до поверхні Землі;

- для двох значень кута від горизонту, відповідно до обраного варіанту (табл. 4.1) за допомогою курсору провести вимірювання траєкторії хвилі. Дані звести до таблиці;

- побудувати графіки траєкторій.

4. Дослідити електричні властивості довільної тропосфери і особливості розповсюдження радіохвилі в ній:

- встановити перемикач завдання властивостей тропосфери в положення «Довільна»;

- встановити параметри тропосфери відповідно до обраного варіанту (табл. 4.1);

- перейти на закладку «Діелектрична проникність тропосфери» та за допомогою курсору виміряти залежність відносної діелектричної проникності від висоти. Дані звести до таблиці;

- побудувати графік виміряної залежності;

- перейти на закладку «Траєкторія хвилі в тропосфері».

Змінюючи напрямок хвилі регулятором «Кут від горизонту», визначити, при якому значенні кута стає можливим повернення хвилі до поверхні Землі;

- для двох значень кута від горизонту, відповідно до обраного варіанту (табл. 4.1) за допомогою курсору провести вимірювання траєкторії хвилі. Дані звести до таблиці;

- побудувати графіки траєкторій.

5. Пояснити отримані залежності, спираючись на знання теорії.
6. Оформити і захистити звіт по роботі.

Контрольні питання

1. На які області поділяється атмосфера Землі? Чим вони відрізняються?
2. Якими параметрами характеризуються електричні властивості тропосфери?
3. Як з висотою змінюється діелектрична проникність тропосфери?
4. Що таке «нормальна» тропосфера?
5. Як тропосфера впливає на поширення радіохвилі?
6. Що таке плоскошарова модель тропосфери?
7. Що таке рефракція радіохвилі?
8. Коли рефракція буває позитивною і негативною?
9. Що відбувається з траєкторією радіохвилі при поширенні в тропосфері?
10. Яким залежностям підпорядковується кут траєкторії і довжина шляху в шарі при поширенні хвилі в тропосфері?
11. Як ви пояснюєте отримані у віртуальному експерименті результати?

Лабораторна робота 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОШИРЕННЯ РАДІОХВИЛЬ В ІОНОСФЕРІ

Мета роботи – вивчити будову іоносфери та її вплив на особливості розповсюдження радіохвиль.

Теоретичні відомості

Починаючи з висот близько 50 км до зовнішньої межі атмосфери розташована іоносфера. Вона має суттєвий вплив на поширення радіохвиль. Так, дальнє поширення хвиль

короткохвильового діапазону можливе тільки за рахунок віддзеркалень від іоносфери.

Іоносфера відрізняється наявністю великої кількості вільних електронів та іонів. Вільні електрони і позитивні іони в атмосфері з'являються в результаті іонізації. Основним джерелом іонізації газів атмосфери є сонячна радіація. На висотах понад 80 км основний внесок у іонізацію вносить ультрафіолетове випромінювання Сонця. Нижче 80 км основний вплив робить рентгенівське випромінювання. Має місце і ударна іонізація за рахунок потоку заряджених частинок, які викидаються Сонцем, що називається сонячним вітром. Вплив останнього на іонізацію атмосфери значний в приполярних районах. Одночасно з іонізацією відбувається і рекомбінація. При зустрічі позитивного іона з електроном утворюється електрично нейтральна молекула. Рекомбінація відбувається тим інтенсивніше, чим більша густина газу.

Якщо вважати, що атмосфера однорідна за хімічним складом, а густина газу монотонно зменшується із зростанням висоти, то розподіл електронної густини N_e по висоті h повинен мати один максимум. Пояснюється це тим, що при наближенні до поверхні Землі інтенсивність іонізуючого випромінювання зменшується, а густина нейтральних молекул газу зростає. Однак експериментальні дослідження іоносфери показали її більш складну будову (рис. 5.1).

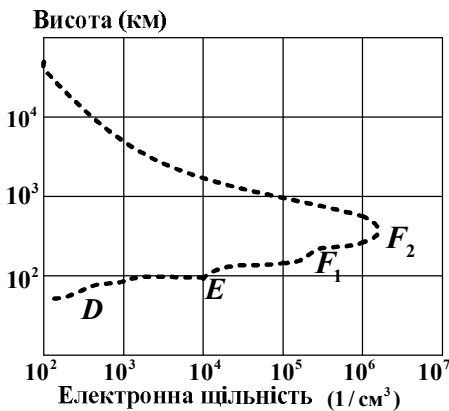


Рис. 5.1. Розподіл електронної густини в іоносфері

Вільні електрони присутні в кількості, достатній, щоб вплинути на поширення радіохвиль. Починаючи з висот близько 50 км і вище електронна густина зростає до висот порядку 200 - 400 км, де розташований її головний максимум. Вище нього електронна густина падає. Іоносферу нижче головного максимуму називають внутрішньою, а вище за нього – зовнішньою. Розподіл електронної густини у внутрішній іоносфері має кілька відносних максимумів, що називаються шарами D , E та F . Стан цих шарів піддається добовим і сезонним змінам. Розподіл електронної густини $N_e(h)$ є випадковою функцією і можна говорити лише про її середній регулярний стан. Шар D існує лише вдень під безпосереднім впливом сонячної радіації, а вночі він зникає. Шар F літнім днем розділяється на два шари F_1 та F_2 .

Для аналітичного опису іоносфери часто застосовують параболічну модель шару (рис. 5.2).

В цій моделі розподіл електронної щільності $N_e(h)$ у шарі задається виразом:

$$N_e(h) = N_{\text{er}} \left(\frac{2z}{z_m} - \frac{z^2}{z_m^2} \right), \quad (5.1)$$

де $z = h - h_0$; $z_m = h_m - h_0$; N_{er} – максимальна електронна густина в шарі ($1/\text{м}^3$); h – висота (м); h_0 – висота нижньої межі шару (м); h_m – максимальна висота шару (м).

Вираз (5.1) задає $N_e(h)$ у межах $h_0 < h < h_0 + 2z_m$, де z_m називається напівтовщиною шару. Поза цим інтервалом $N_e(h) = 0$.

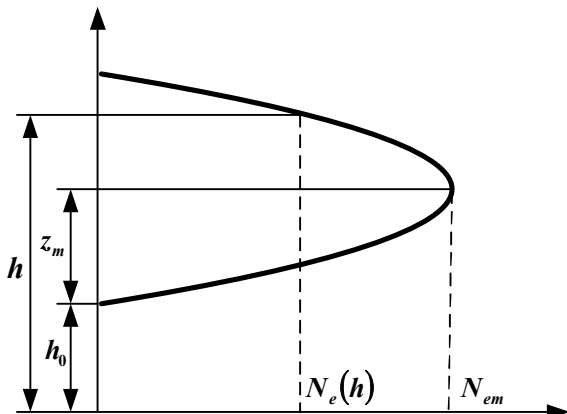


Рис. 5.2. Параболічна модель іоносферного шару

В табл. 5.1 наведені середні значення параметрів моделей шарів D , E та F для різного часу доби і сезону.

Таблиця 5.1

Середні параметри параболічної моделі іоносферних шарів

Параметри шарів	h_0 , км	z_m , км	N_{er} , $1/\text{см}^3$
D день ніч	50 –	40 –	10^3 0
E день ніч	100 100	60 60	$5 \cdot 10^4$ $5 \cdot 10^3$
F , зима день ніч	200 205	90 100	10^6 $2,5 \cdot 10^5$
F_1 , літо день ніч	160 –	80 –	$2,5 \cdot 10^5$ 0
F_2 , літо день ніч	220 200	120 100	$5 \cdot 10^5$ $5 \cdot 10^5$

Електромагнітні властивості середовища визначаються відносною діелектричною проникністю ε , відносною магнітною проникністю μ та питомою провідністю σ . Величина μ іоносфери практично не відрізняється від одиниці.

Під дією електричного поля з частотою ω та з напруженістю електричного поля E в іоносфері виникає повний струм з густиною, яка дорівнює сумі густин струмів зміщення і конвекційного

$$\vec{\delta} = \vec{\delta}_{\text{зм}} + \vec{\delta}_{\text{к}} = j\omega\varepsilon_0\vec{E} + \vec{\delta}_{\text{к}}. \quad (5.2)$$

В той же час відповідно до першого рівняння Максвелла в середовищі з втратами густина повного струму

$$\vec{\delta} = j\omega\left(\varepsilon_0\varepsilon - \frac{j\sigma}{\omega}\right)\vec{E}. \quad (5.3)$$

Конвекційний струм обумовлений рухом вільних електронів. Його густина

$$\vec{\delta}_{\text{к}} = eN_e\vec{V}_e, \quad (5.4)$$

де \vec{V}_e – середня швидкість упорядкованого руху електронів; e – заряд електрона.

Вважаємо, що іоносфера складається з електронів e , що мають негативний заряд і позитивних іонів, що мають позитивний заряд. Сила поля, яка діє на заряджені частинки:

$$\vec{F}_e = e\vec{E}. \quad (5.5)$$

Упорядкована швидкість частинки буде обернено пропорційна її масі. Це означає, що впливом позитивних іонів можна знехтувати, оскільки їх маса в сотні тисяч разів більша маси електрона m_e .

Електрична сила (5.5) врівноважується силою інерції частинки $m_e \frac{d\vec{V}_e}{dt}$ і силою тертя $m_e\vec{V}_e\nu_{\text{эф}}$, що створюється за рахунок зіткнень з іншими частками, де ефективна кількість зіткнень за секунду позначається як $\nu_{\text{эф}}$.

Диференціальне рівняння руху електрона має вигляд:

$$e\vec{E} = m_e \frac{d\vec{V}_e}{dt} + m_e \vec{V}_e v_{\text{эф}}. \quad (5.6)$$

Його розв'язок для гармонійного поля з частотою $\omega = 2\pi f$ запишеться у вигляді:

$$\vec{V}_e = \frac{e}{m_e} \frac{v_{\text{эф}}}{v_{\text{эф}}^2 + \omega^2} \vec{E} - j \frac{e}{m_e} \frac{\omega}{v_{\text{эф}}^2 + \omega^2} \vec{E}. \quad (5.7)$$

З врахуванням (5.4) і (5.7) отримуємо густину конвекційного струму, яку підставляємо в (5.2) і одержуємо вираз для густини повного струму

$$\vec{\delta} = j\omega \left\{ \epsilon_0 \left[1 - \frac{e^2 N_e}{m_e \epsilon_0 (v_{\text{эф}}^2 + \omega^2)} \right] - j \frac{e^2 N_e v_{\text{эф}}}{m_e \omega (v_{\text{эф}}^2 + \omega^2)} \right\} \vec{E}. \quad (5.8)$$

Прирівнюючи вирази (5.3) і (5.8), знаходимо відносну діелектричну проникність і питому провідність іоносфери:

$$\epsilon = 1 - \frac{e^2}{m_e \epsilon_0} \frac{N_e}{v_{\text{эф}}^2 + \omega^2}; \quad (5.9)$$

$$\sigma = \frac{e^2}{m_e} \frac{N_e v_{\text{эф}}}{v_{\text{эф}}^2 + \omega^2}. \quad (5.10)$$

На високих частотах при $\omega^2 \gg v_{\text{эф}}^2$ і після підстановки постійних значень m_e і ϵ_0 отримуємо:

$$\epsilon = 1 - 80,8 \frac{N_e}{f^2}; \quad (5.11)$$

$$\sigma = 7,17 \cdot 10^{-10} \frac{N_e v_{\text{эф}}}{f^2}. \quad (5.12)$$

Вирази (5.11) і (5.12) показують, що:

- діелектрична проникність іоносфери менше діелектричної проникності вакууму. Це відбувається за рахунок конвекційного струму, при якому електрони рухаються проти поля. Густина конвекційного струму віднімається від густини струму зсуву;

- діелектрична проникність іоносфери залежить від електронної концентрації. Іоносфера є електрично неоднорідним середовищем;
- діелектрична проникність іоносфери залежить від частоти, тобто в іоносфері присутнє явище дисперсії;
- діелектрична проникність іоносфери може приймати нульові значення, якщо частота поля ω дорівнює власній частоті іоносферної плазми:

$$\omega_e = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{m_e \epsilon_0}}; \quad (5.13)$$

- питома провідність іоносфери змінюється з висотою. Електронна густина $N_e(h)$ максимальна в шарі F і зменшується в шарі D . Кількість співударів в секунду $\nu_{\text{эф}}$ істотно більше в шарі D . В результаті провідність у шарі D більша. Цей шар існує лише вдень, значить, втрати в іоносфері у денний час значно більші, ніж в нічний;
- питома провідність іоносфери з ростом частоти зменшується.

Діелектрична проникність іоносфери плавно змінюється з висотою, спочатку зменшуючись у внутрішній іоносфері, потім збільшуючись у зовнішній іоносфері. Поширення радіохвилі у ній супроводжується викривленням траєкторії. Розглянемо найбільш просту плоскошарову модель іоносфери (рис. 5.3).

Координата x спрямована горизонтально, координата h спрямована вертикально вгору. За висотою іоносфера розбита на плоскі шари товщиною Δh . В межах шару діелектрична проникність вважається постійною. На межі між шарами хвиля заломлюється. Діелектричні проникності шарів і кути руху хвилі в них пов'язані співвідношенням:

$$\sqrt{\epsilon(0)} \sin \varphi_0 = \sqrt{\epsilon(h_1)} \sin \varphi_1 = \sqrt{\epsilon(h_2)} \sin \varphi_2 = \dots = \sqrt{\epsilon(h)} \sin \varphi(h), \quad (5.14)$$

де φ_0 – напрям променя радіохвилі від поверхні Землі до нижньої межі іоносфери.

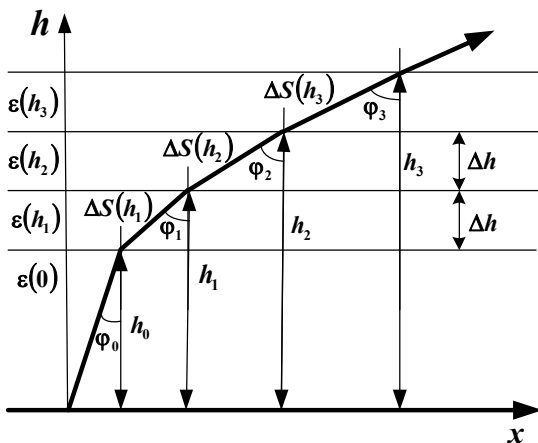


Рис. 5.3. Плоскошарова модель іоносфери

Таким чином, промінь радіохвилі проходить через шари під кутом, що змінюється з висотою

$$\sin \varphi(h) = \sqrt{\frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(h)}} \sin \varphi_0 . \quad (5.15)$$

Довжина шляху хвилі всередині шару також залежить від висоти

$$\Delta S(h) = \frac{\Delta h}{\cos \varphi(h)} = \frac{\Delta h}{\sqrt{1 - \frac{\varepsilon(0)}{\varepsilon(h)} \sin^2 \varphi_0}} . \quad (5.16)$$

Нехай траєкторія променя починається в точці початку координат (0, 0) (рис. 5.3). Переходячи з висотою від шару до шару, будемо мати координати перетину променем *i*-го шару:

$$h_i = \Delta h_i ; \quad x_i = x_{i-1} + \sqrt{[\Delta S(y_i)]^2 - \Delta h^2} . \quad (5.17)$$

Позитивна рефракція у внутрішній іоносфері викривляє траєкторію хвилі і, за певних умов, вона може повернутися до Землі. Це явище називають відбиттям від іоносфери.

Віддзеркалення хвилі від іоносфери відбудеться на висоті $h_{\text{відб}}$ при $\varphi(h_{\text{отт}}) = 90^\circ$. З використанням виразу (5.14) отримуємо значення електронної густини, необхідне для відбиття:

$$N_e(h_{\text{відб}}) = \frac{f^2 \cos^2 \varphi_0}{80,8}. \quad (5.18)$$

Із виразу (5.18) випливає, що від іоносфери можуть відбиватися хвилі с частотами

$$f \leq \frac{\sqrt{80,8 N_e(h_{\text{відб}})}}{\cos \varphi_0}. \quad (5.19)$$

Частота, на якій вираз (5.19) перетворюється в рівність, називається максимальною частотою відбиття f_m .

Максимальна частота хвилі, що відбивається при вертикальному падінні на іоносферний шар, називається критичною частотою цього шару

$$f_{\text{кр}} = \sqrt{80,8 N_{\text{ем}}}. \quad (5.20)$$

На частоті вище критичної відбиття від іоносфери можливе тільки при похилому падінні. Відбита хвиля не може повернутися до поверхні Землі поблизу від точки випромінювання. Близько точки випромінювання існує «мертва зона» (рис. 5.4).

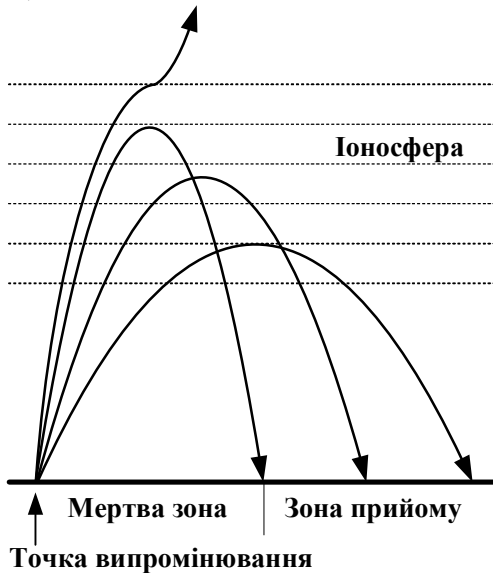


Рис. 5.4. Створення «мертвої зони»

На властивості іоносфери істотний вплив має магнітне поле Землі. Під його дією іоносферна плазма стає анізотропним середовищем, а її діелектрична проникність і питома провідність – тензорними величинами.

В рамках даної роботи виключається при моделюванні врахування впливу магнітного поля Землі та її сферичності. Наймовірно складна модель, закладена в навчальний віртуальний прилад, може ускладнити виявлення основних закономірностей, що вивчаються.

Порядок виконання роботи

1. Запустити лабораторну установку, ознайомитися з органами управління (рис. 5.5).

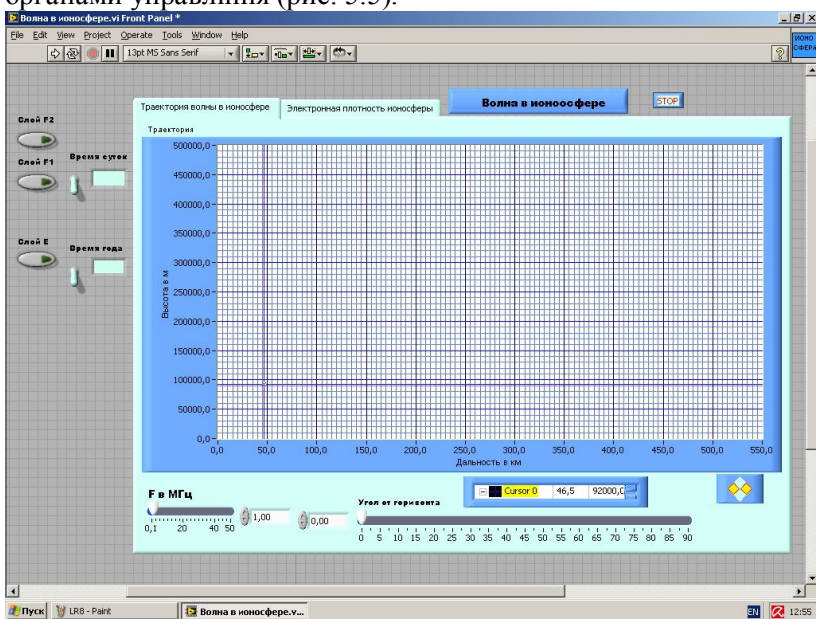


Рис. 5.5 Вид віртуальної лабораторної установки

2. Виконати дослідження відповідно до обраного варіанту. Вихідні параметри для кожного варіанту дослідження брати в табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Вихідні параметри для дослідження
розповсюдження радіохвиль в іоносфері

Параметри	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
Шар	F	E	F	F_1	F_2
Пора року	Зима	Літо	Зима	Літо	Літо
Час доби	День	Ніч	Ніч	День	Ніч
Φ_0 , град	30	20	30	25	40
Частота, МГц	9,2	4,5	4,7	6,4	5

3. Дослідити електронну концентрацію в окремому шарі іоносфери і її вплив на особливості поширення радіохвилі:

- встановити перемикачі «Пора року» і «Час доби» у положення, відповідно до обраного варіанту (табл. 5.2);
- кнопками включення шарів включити тільки шар, який вказаний в табл. 5.2;

- перейти на закладку «Електронна густина іоносфери».

За допомогою курсору виміряти залежність електронної густини від висоти. Дані звести до таблиці;

- побудувати графік вимірної залежності;
- перейти на закладку «Траєкторія хвилі в іоносфері».

Регулятором «Кут від горизонту» встановити напрям, максимально близький до вертикалі. Зручним є значення $89,5^\circ$;

- змінюючи частоту і спостерігаючи за траєкторією хвилі в іоносфері, визначити критичну частоту шару.

4. Дослідити електричні властивості іоносфери та розповсюдження радіохвилі в ній:

- встановити перемикачі «Пора року» і «Час доби» у положення, відповідно до обраного варіанту (табл. 5.2);

- кнопками включення шарів включити всі шари іоносфери;

- перейти на закладку «Електронна густина іоносфери».

За допомогою курсору виміряти залежність електронної густини від висоти. Дані звести до таблиці;

- побудувати графік вимірної залежності;

- перейти на закладку «Траєкторія хвилі в іоносфері». Регулятором «Кут від горизонту» встановити напрям φ_0 з табл. 5.2;

- змінюючи частоту і спостерігаючи за траєкторією хвилі в іоносфері, визначити максимальну частоту відбиття;

- для двох частот, перша з яких дещо більша, а друга – дещо менша від максимальної частоти відбиття, за допомогою курсору виміряти форму траєкторії радіохвилі. Дані звести до таблиці;

- побудувати графіки отриманих траєкторій.

5. Дослідити формування «мертвої зони», для чого:

- встановити перемикачі «Пора року» і «Час доби» у положення, відповідно до обраного варіанту (табл. 5.2);

- кнопками включення шарів включити всі шари іоносфери;

- встановити значення частоти відповідно до обраного варіанту (табл. 5.2);

- перейти на закладку «Траєкторія хвилі в іоносфері». Змінюючи напрям хвилі регулятором «Кут від горизонту» визначити розмір «мертвої зони».

6. Пояснити отримані результати, спираючись на знання теорії.

7. Оформити і захистити звіт по роботі.

Контрольні питання

1. Чому іоносфера має шарову структуру?
2. Що таке іоносферний шар?
3. На які шари поділяється іоносфера?
4. Які параметри входять до параболічної моделі іоносферного шару?
5. Як пора року впливає на структуру іоносфери?
6. Як час доби впливає на структуру іоносфери?
7. Як діелектрична проникність іоносфери залежить від електронної густини і від частоти?
8. Що таке максимальна частота відбиття?
9. Що таке критична частота шару?

10. Як частота радіохвилі впливає на її траєкторію в іоносфері?

11. Як зміна напрямку хвилі біля поверхні Землі впливає на її траєкторію в іоносфері?

12. Що таке «мертва зона» при іоносферному розповсюдженні радіохвилі?

Список літератури

1. *Петров Б.М.* Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия-Телеком, 2003. – 560 с.
2. *Неганов В.А., Осипов О.В., Раевский С.Б., Яровой Г.П.* Электродинамика и распространение радиоволн / Под ред. В.А. Неганова и С.Б. Раевского. – М.: Радио и связь, 2005. – 648 с.
3. *Іванов В.О., Габрусенко Є.І.* Поширення радіохвиль: Тексти лекцій. – К.: НАУ, 2002. – 64 с.
4. *Ерохин Г.А., Чернышев О.В., Козырев Н.Д., Кочержевский В.Г.* Антенно-фидерные устройства и распространение радиоволн. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 491 с.
5. *Пейч Л.И., Точилин Д.А., Поллак Б.П.* LabVIEW для новичков и специалистов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 544 с.

Зміст

Загальні методичні рекомендації	3
Лабораторна робота 1. Дослідження поширення радіохвиль у вільному просторі	3
Лабораторна робота 2. Дослідження області простору, яка є істотною при поширенні радіохвиль. Зони Френеля	11
Лабораторна робота 3. Дослідження поширення радіохвиль поблизу поверхні Землі	20
Лабораторна робота 4. Дослідження поширення радіохвиль у тропосфері	32
Лабораторна робота 5. Дослідження поширення радіохвиль в іоносфері	37
Список літератури	50